

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПАЛЛАДИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ЕЕ ОДНОСТОРОННЕМ НАСЫЩЕНИИ ВОДОРОДОМ

Е.Н. Любименко, М.В. Гольцова

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

E-mail: Lyubimenko@inbox.ru, тел. +38(062)301-03-81

Проведены исследования влияния температуры и давления на закономерности формоизменения консолюно закреплённой палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом. Показано, что формоизменение пластины развивается в два этапа. На первом коротком временном этапе достигается максимальное формоизменение (изгиб) пластины. На втором, существенно более длительном, этапе происходит распрямление пластины. Температурная зависимость максимального изгиба пластины подчиняется экстремальному закону. При низких температурах остаточный стационарный изгиб пластины составляет 20...30 % от величины максимального изгиба. С ростом температуры обратимость изгиба пластины возрастает, и при 320...350 °С явление становится полностью обратимым. Проведены испытания чисто механических изгибов пластины и доказано, что чисто механические изгибы и изгибы, индуцированные водородом, имеют совершенно разную физическую природу.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость обеспечения надежной работы атомной энергетики, а также перспективы развития термоядерной и водородной энергетики обуславливают живой интерес к проблемам взаимодействия водорода и его изотопов с металлами. Классическим модельным объектом для этих исследований служит система Pd-H.

Уникальность водородного воздействия обусловлена следующими факторами:

- водород имеет исключительно высокие коэффициенты диффузии, в связи с чем он может быть легко введен в металл и эвакуирован из него вплоть до комнатных температур;

- внедренный атом водорода расширяет кристаллическую решетку металла и вызывает появление в металле внутренних напряжений. В свою очередь, внутренние напряжения, индуцированные водородом в металле, становятся первопричиной целого ряда водородоупругих и водородопластических микро- и макроэффектов. К макроэффектам относится формоизменение (коробление) металла [1].

В настоящей статье представлены результаты систематических исследований, проводимых в Донецком национальном техническом университете, по изучению формоизменения (изгибов) консолюно закреплённой палладиевой пластины, вызванного водородным воздействием. Цель работы: установить закономерности формоизменений палладиевой пластины в широком интервале температур и давлений водорода.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемый образец в виде тонкой пластины размерами 68×5,5×0,27 мм из чистого палладия (99,98 %) был подвергнут отжигу при 700 °С в течение 60 мин и охлажден с печью. Одну сторону отожжённого образца электролитически покрывали медью.

Для исследований использовали водородовакуумную установку ВВУ-4, которая позволяет изучать формоизменение палладиевой пластины при температурах до 360 °С и при давлениях водорода от 0,01 до 2,5 МПа. ВВУ-4 состоит из рабочей камеры и обслуживающих её четырёх вспомогательных блоков. Установка ВВУ-4 описана в [2].

Образец закрепляли в держателе рабочей камеры одним торцом так, чтобы сверху была сторона образца с медным покрытием. Рабочая часть образца после закрепления составила 60 мм. Для снятия остаточных напряжений закреплённый образец подвергали низкотемпературному вакуумному отжигу непосредственно в рабочей камере: его медленно нагревали до 240 °С со скоростью 3 К/мин и затем охлаждали с печью.

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

Эксперименты всегда осуществляли в изотермических условиях. Температуру при этом поддерживали и измеряли прибором «ТРЦ-02 плюс» с точностью ± 1 К. Полученные видеозаписи затем анализировали в программе Sony Vegas кадр за кадром, что позволило получить зависимость стрелы прогиба образца от времени. Ошибка измерения времени составила $\pm 0,04$ с; ошибка измерения положения свободного конца пластины – $\pm 0,03$ мм. Использование видеозаписи особенно важно для первых секунд эксперимента, когда формоизменение образца развивается быстро.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с поставленной задачей в первой серии экспериментов индуцированное водородом формоизменение палладиевой пластины было изучено в интервале температур 110...350 °С. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 1 и 2. Во второй серии экспериментов исследовали влияние

давления водорода на индуцированное водородом формоизменение палладиевой пластинки при 240 °С и при различных давлениях водорода от 0,03 до 0,43 МПа. Всего было выполнено 7 экспериментов, условия проведения и результаты которых обобщены в табл. 3.

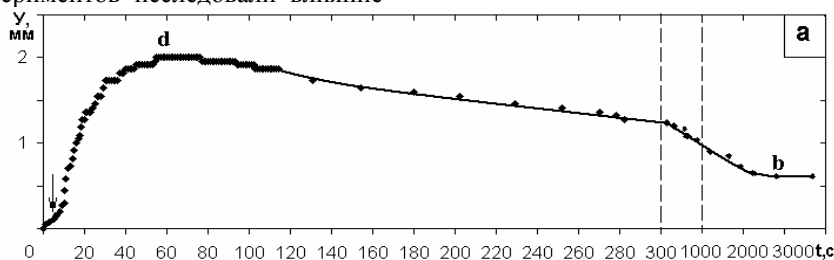


Рис. 1. Временная зависимость формоизменения палладиевой пластины при $P_{H_2}=0,03$ МПа и температуре 110 °С

Первая серия экспериментов

На рис. 1 показана характерная временная зависимость формоизменения палладиевой пластины. Из анализа рис. 1 и табл. 1 следует выявить три важных момента.

1. Как хорошо видно из рисунка, формоизменение пластины осуществляется в два временных этапа. На первом этапе пластина быстро изгибается, причём при всех исследованных температурах пластинка начинает изгибаться сразу от момента начала подачи водорода в рабочую камеру. При этом в момент достижения заданного давления $P_{H_2}=0,03$ МПа (отмечено стрелкой) изгиб пластины во всех случаях уже достигает экспериментально заметной величины. Например, при $T=110$ °С эта величина составляет 0,17 мм. При последующей выдержке при 110 °С стрела прогиба продолжает возрастать и достигает своего максимального значения $y_{max}=1,94$ мм за 55 с от момента начала подачи водорода (отмечено буквой d). Затем пластина начинает распрямляться.

С повышением температуры закономерности временной зависимости формоизменения пластины остаются качественно подобными описанным выше для 110 °С (см. рис. 1), однако количественные характеристики формоизменения оказываются сильно зависимыми от температуры, что можно проследить по табл. 1. Максимальный изгиб пластины постепенно увеличивается: при 240 °С – 2,33 мм, что на 17 % больше y_{max} при 110 °С. Напротив, при 350 °С максимальный изгиб ($y_{max}=1,75$ мм) сильно уменьшился по сравнению с y_{max} при 110 и 240 °С (меньше на 10 и 25% соответственно). Время достижения максимального изгиба с ростом температуры уменьшается и при 350 °С составляет всего 5 с.

2. После достижения максимального значения изгиба пластинка начинает распрямляться – наступает второй этап формоизменения. Здесь очень важно то, что второй этап длится значительно дольше первого. При температуре 110 °С, например, второй этап дольше первого в 35 раз (см. рис. 1). При 240 и 350 °С – в 10 и в 20 раз соответственно.

3. Из рис. 1 видно, что при температуре 110 °С через 2700 с от начала эксперимента пластина дос-

тигает стационарного состояния $y_{ст} = 0,61$ мм, которое при дальнейшей длительной выдержке 1000 с не изменяется.

С повышением температуры остаточный изгиб пластины проявляет интересную тенденцию. При 260 °С $y_{ст} = 0,10$ мм втрое меньше, чем при 110 °С ($y_{ст} = 0,61$ мм). При 320 °С и выше изгиб пластинки оказывается практически полностью обратимым (см. табл. 1).

Далее была поставлена задача выполнить такую же серию экспериментов, но при более высоком давлении водорода – 0,09 МПа. Результаты этой серии приведены в табл. 2.

Как показывает анализ экспериментальных результатов (см. табл. 1 и 2), вышеописанное влияние температуры на формоизменение пластины оказалось качественно одинаковым и при $P_{H_2}=0,03$ и 0,09 МПа.

Обобщим далее наиболее значимые закономерности влияния температуры на индуцированное водородом формоизменение палладиевой пластины. Как видно из табл. 1 и 2 (колонки 3 и 4), на первом этапе насыщения водородом с ростом температуры время достижения максимального изгиба Δt_{max} сильно уменьшается, а величина y_{max} изменяется по экстремальному закону. При этом при $P_{H_2}=0,03$ МПа наибольшее $y_{max} = 2,4$ мм достигается при ~200 °С, а при $P_{H_2}=0,09$ МПа наибольшее $y_{max} = 3,49$ мм достигается при более высокой температуре, равной ~240 °С.

Временная зависимость распрямления изогнутой пластины на втором этапе насыщения водородом с ростом температуры также претерпевает существенные изменения. При этом из экспериментальных данных, приведенных в колонках 5-8 табл. 1 и 2, вытекают следующие закономерности.

С ростом температуры до 350 °С время второго этапа насыщения водородом ($\Delta t - \Delta t_{max}$), за которое пластина практически полностью распрямляется, сильно уменьшается: при $P_{H_2}=0,03$ МПа – в 10 раз, а при $P_{H_2} = 0,09$ МПа – в 17 раз.

При низких температурах остаточный стационарный изгиб ($y_{ст}$) пластины составляет 20...30 % от

величины максимального изгиба. Интересно, что он сохраняется неизменным в течение достаточно длительного времени, что наглядно видно из рис. 1 и табл. 1 и 2.

В целом, при повышенных температурах (320...350 °С) время полного формоизменения (изгиб и распрямление) пластины оказывается весьма малым. Так, при $P_{H_2}=0,09$ МПа и $T=350$ °С пластина изгибается и распрямляется всего за ~30 с (см. табл. 2).

Вторая серия экспериментов

Влияние давления водорода на индуцированное водородом формоизменение палладиевой пластинки было изучено в настоящей работе при 240 °С при различных давлениях водорода от 0,03 до 0,43 МПа.

В целом, зависимость формоизменения от времени подчиняется описанным выше закономерностям. Оно складывается из двух этапов – собственно изгибов и распрямления, причём второй этап в десятки раз медленнее первого. Закономерный и достаточно большой изгиб пластинки фиксируется уже в начале подачи водорода в рабочую камеру. После окончания напуска водорода пластинка достигает максимального изгиба, и после распрямления также фиксируется некоторый остаточный изгиб $y_{ст}$, который не изменяется за всё время последующей выдержки. Результаты второй серии экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 1

Влияние температуры на формоизменение пластины при $P_{H_2}=0,03$ МПа

№	T, °С	$\Delta t_{и}$, с	Δt_{max} , с	y_{max} , мм	$\Delta t_{ст}$, с	$y_{ст}$, мм	$\frac{y_{cm}}{y_{max}} \cdot 100$ %	n, [Pd/H]	D, м ² /с
1	110	1,35	55	1,94	2700	0,618	31,9	0,0184	$2,71 \cdot 10^{-10}$
2	130	1,0	77	1,89	2400	0,40	21,4	0,0172	$3,95 \cdot 10^{-10}$
3	150	2,56	30	1,99	2400	0,17	8,9	0,0160	$5,55 \cdot 10^{-10}$
4	170	1,57	16	2,06	600	0,03	1,5	0,0146	$7,56 \cdot 10^{-10}$
5	200	1,35	18,8	2,40	489	0,218	9,1	0,0129	$1,14 \cdot 10^{-9}$
6	220	2,20	17,4	2,47	160	0,22	8,8	0,0117	$1,47 \cdot 10^{-9}$
7	240	2,61	11	2,3	121	0,218	9,3	0,0105	$1,85 \cdot 10^{-9}$
8	260	1,3	8,92	2,22	133	0,10	4,7	0,0097	$2,28 \cdot 10^{-9}$
9	280	0,94	7,4	2,22	540	0,10	4,7	0,0090	$2,78 \cdot 10^{-9}$
10	300	3,1	11,8	1,84	1200	0,07	3,8	0,0081	$3,33 \cdot 10^{-9}$
11	320	1,08	8,12	1,96	900	0	0	0,0074	$3,95 \cdot 10^{-9}$
12	350	1,12	4,69	1,75	277	0	0	0,0062	$5,0 \cdot 10^{-9}$

Таблица 2

Влияние температуры на формоизменение пластины при $P_{H_2}=0,09$ МПа

№	T, °С	$\Delta t_{и}$, с	Δt_{max} , с	y_{max} , мм	$\Delta t_{ст}$, с	$y_{ст}$, мм	$\frac{y_{cm}}{y_{max}} \cdot 100$ %	n ₀ , [Pd/H]
1	150	6,16	25	2,85	560	0,51	18,0	0,0370
2	170	7,1	15	2,85	1320	0,34	11,8	0,02998
3	200	8,46	10	3,32	1100	0,24	7,1	0,0243
4	220	7,47	13	3,53	170	0,16	4,5	0,0214
5	240	5,12	7	3,48	1080	0,13	3,6	0,0180
6	240	3,74	5,3	3,49	74	0,15	4,4	0,0180
7	260	5,16	6	3,41	300	0,00	0,0	0,0176
8	280	5,8	6	3,06	180	0,03	1,1	0,0162
9	300	5,89	7,3	3,00	600	0,00	0,0	0,0146
10	300	7,96	8	2,83	900	0,09	3,3	0,0146
11	320	7,15	8,4	2,85	300	0,00	0,0	0,0131
12	350	5,01	5	2,75	33	0,07	2,5	0,0109

Условия и результаты экспериментов по изучению влияния величины давления водорода на формоизменение Pd-пластинки при 240 °С

№	T, °С	P _{H₂} , МПа	Δτ _н , с	Δτ _{max} , с	У _{max} , мм	У _{ст} , мм	n _о , [H/Pd]
1	240	0,03	2,61	10,00	1,95	0	0,0105
2	240	0,10	4,68	12,64	3,45	0,25	0,0198
3	240	0,15	7,51	20,00	3,93	0	0,0260
4	240	0,20	6,48	11,68	5,34	0,11	0,0326
5	240	0,30	4,05	14,08	7,32	0,07	0,0464
6	240	0,30	9,94	14,85	7,19	0,19	0,0464
7	240	0,43	14,3	9,00	10,05	0,05	0,0644

Зависимость максимального и остаточного изгибов от давления подаваемого водорода при постоянной температуре показана на рис. 2, где видно, что максимальный изгиб пластины хорошо коррелирует с равновесной растворимостью водорода в палладии при данных температуре и давлении.

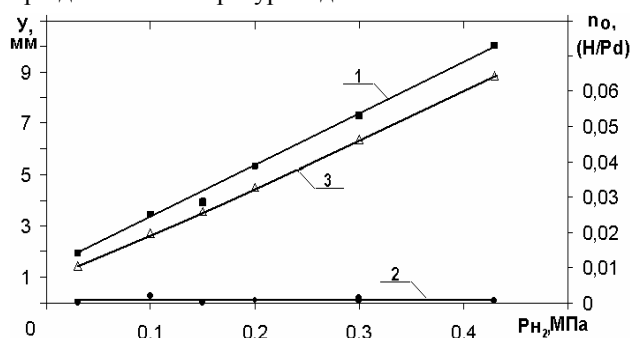


Рис. 2. Влияние давления водорода на максимальный (кривая 1) и остаточный стационарный (кривая 2) изгибы пластины при 240 °С. Кривая 3 – зависимость от давления равновесной растворимости водорода в палладии при 240 °С

Обсудим описанные выше экспериментальные данные, опираясь на современные знания о системах палладий-водород.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хорошо известно, что внедренные атомы водорода расширяют кристаллическую решетку металла [3]. Это обуславливает автолокализацию водорода вблизи поверхности металла при его насыщении водородом [4] по двум причинам.

Во-первых, между внедренными атомами водорода действуют силы притяжения [5]. Соответственно эффективный коэффициент диффузии водорода в металле уменьшается с ростом концентрации водорода. Как показано в работе [4], по этой причине «водород все медленнее проникает в глубь металла, локализуясь в основном в тонком приповерхностном слое».

Вторая причина автолокализации водорода вблизи приповерхностного слоя состоит в том, что градиенты концентрации водорода и соответствующие градиенты дилатации кристаллической решетки, возникающие при насыщении металла водородом,

порождают восходящую диффузию водорода, направленную против диффузионного потока, обусловленного наличием градиента концентрации (диффузия Фика). Известно, что восходящая диффузия в зависимости от условий эксперимента может замедлять проникновение водорода в металл [1] и обуславливать перенос водорода против его градиента концентрации (например, при гидридных превращениях). При определенных условиях [1] может наблюдаться динамическое равновесие между диффузионными потоками Фика и восходящей диффузией. Это явление термобароупруго-диффузионного (ТБУД) равновесия экспериментально изучено в работе [5]. В результате ТБУД-равновесия направленный перенос водорода между областями металла с разной концентрацией водорода приостанавливается [5].

Итак, специфика индуцированного водородом формоизменения металла определяется следующей фундаментальной особенностью систем металл-водород: при насыщении водородом в металле формируется временный автолокализованный градиентный материал «металл-водород» и возникают водородные концентрационные напряжения.

Рассмотрим, как работают эти представления применительно к явлению формоизменения палладиевой пластины, исследуемому в настоящей работе. Напомним, что изучаемая палладиевая пластинка длиной l и толщиной h подвергается одностороннему насыщению водородом. В результате в ней на первом этапе насыщения водородом образуются два разнородных слоя. У входной поверхности формируется растущий слой временного автолокализованного градиентного (ВГ) сплава α -PdH_n – это слой 1, толщиной h_1 и длиной $l_1 > l$. Слой 2 – остальная часть палладиевой пластины, практически ещё не насыщенная водородом. Соответственно $h_2 = h - h_1$. Ясно, что пластинка, в которой образуются сопряженные, но геометрически различающиеся слои 1 и 2, для сохранения своей целостности и достижения напряженно-скомпенсированного состояния претерпевает изгиб. Такова в главном механическая компонента механизма изгиба палладиевой пластины на первом этапе её одностороннего насыщения водородом.

Установленная и описанная выше экспериментальная закономерность зависимости от температу-

ры максимального изгиба пластины даёт дополнительные возможности для феноменологического анализа особенностей индуцированного водородом формоизменения металла. Как показано в работе [2], два фактора в основном определяют величину максимального изгиба пластины.

Один фактор – это концентрация водорода n во временном автолокализованном слое градиентного сплава α -PdH $_n$ – определяет разницу длин слоев 1 и 2.

При диффузионно-контролируемом процессе проникновения концентрация водорода в слое 1 должна быть соизмеримой с равновесной растворимостью водорода в палладии ($n \approx n_0$) при заданных температуре и давлении водорода. Таким образом, равновесная растворимость водорода в палладии – важный физический фактор, определяющий максимальный изгиб пластины и его зависимость от температуры.

Другим важным физическим фактором изгиба пластины является коэффициент диффузии водорода в палладии. Действительно, именно этот коэффициент определяет формирование временного самолокализованного слоя градиентного сплава α -PdH $_n$

и, таким образом, определяет толщину слоёв 1 и 2, сформировавшихся к моменту достижения максимального изгиба пластины.

Итак, есть все основания полагать, что эти два фактора: равновесная растворимость водорода в палладии и его коэффициент диффузии и определяют величину максимального изгиба пластины.

В связи с этим представляет интерес сопоставить температурные зависимости максимального изгиба пластины с температурными зависимостями коэффициента диффузии и равновесной концентрации водорода в палладии при наших экспериментальных давлениях

На рис. 3,а показаны вышеописанные экспериментальные данные (см. табл. 1 и 2) о температурной зависимости максимальных изгибов (y_{\max}) палладиевой пластины при $P_{H_2} = 0,03$ МПа (кривая 1) и $P_{H_2} = 0,09$ МПа (кривая 2). Наглядно видно, что в обоих случаях имеет место экстремальная зависимость $y_{\max} = f(t)$. При этом экстремум кривой 2 ($P_{H_2} = 0,09$ МПа) несколько сдвинут в область более высоких температур по сравнению с кривой 1 ($P_{H_2} = 0,03$ МПа).

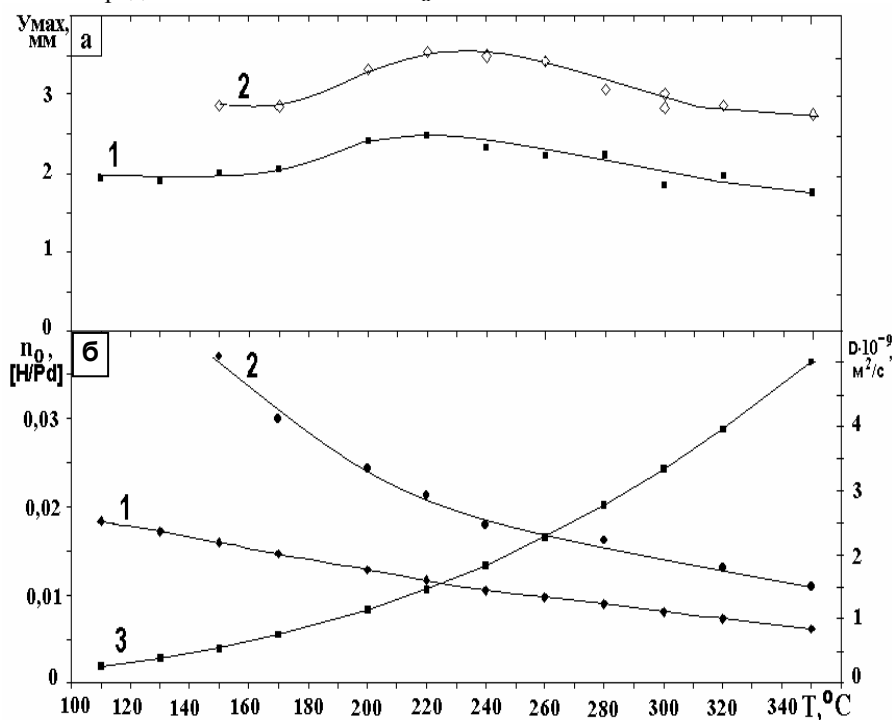


Рис. 3. Влияние температуры на максимальное формоизменение пластины (а), равновесную растворимость и коэффициент диффузии водорода в палладии (б).
Пояснения даны в тексте

На рис. 3,б приведены данные о коэффициентах диффузии водорода в палладии (кривая 3) и рассчитанные нами по методике, опубликованной в [1], значения равновесной растворимости водорода в палладии для $P_{H_2} = 0,03$ МПа (кривая 1) и $P_{H_2} = 0,09$ МПа (кривая 2).

Сопоставляя данные (см. рис. 3,а и б), видим, что именно совместное действие этих двух факторов (D и n_0) обуславливает экстремальную температурную зависимость максимального изгиба (y_{\max}) пластины

при ее одностороннем насыщении водородом. При этом закономерно, что наибольшие изгибы пластины имеются в районе температур 220...260 °С, где суммарное действие обсуждаемых физических факторов (D , n_0) – максимально.

Обсудим теперь тот экспериментальный факт, что индуцированное водородом формоизменение палладиевой пластины при повышенных давлениях является полностью обратимым. Необычность этого экспериментального результата очевидна. Действи-

тельно, мы были вправе ожидать, что с увеличением давления водорода и ростом максимального изгиба могут быть достигнуты условия водородного нагружения, при которых деформация приповерхностных слоев палладиевой пластины превзойдет предел упругости металла, и изгиб станет необратимым. Соответственно можно было ожидать, что доля необратимой составляющей изгиба будет увеличиваться с ростом водородного нагружения. Эксперимент, как описано выше, выявил противоположную закономерность.

В связи с этим была поставлена задача изучить закономерность изгибов пластины при чисто механическом нагружении. Для механических испытаний отожженную палладиевую пластину (наш образец) горизонтально закрепляли в держателе. Эксперименты проводили в комнатных условиях при $\sim 24^\circ\text{C}$. С помощью катетометра первоначально фиксировали исходное положение свободного торца пластины. Механическое нагружение пластины осуществляли подвешиванием равновеса на свободный торец пластины и измеряли стрелу прогиба (Y_{\max}). После снятия нагрузки фиксировали наличие необратимой составляющей $Y_{\text{ст}}$. Точность измерений с помощью катетометра составляет $\pm 0,02$ мм.

На рис. 4 приведены результаты выполненных экспериментов. Стрела прогиба (кривая 1) пластинки (Y_{\max}) растёт по линейному закону при увеличении нагрузки до $F = 0,029$ Н. Изгибы пластины в этой упругой области (I) являются полностью обратимыми. Действительно, как видно из кривой 2, в области I $Y_{\text{ст}} = 0$. В этой области обратимых упругих изгибов величина стрелы прогиба пластины при $F = 0,029$ Н достигает значения $Y_{\max} = 2,2$ мм.

При дальнейшем увеличении нагрузки изгибы пластины закономерно возрастают (кривая 1) и доля необратимой составляющей изгибов закономерно увеличивается (кривая 2). Отметим, что при механической нагрузке $F = 0,078$ Н максимальный изгиб пластины достигает $Y_{\max} = 8,9$ мм (см. рис. 4, кривая 1). Такой изгиб оказывается уже необратимым, и остаточное формоизменение при этом достигает 3,17 мм (кривая 2), что составляет $\sim 36\%$ от величины полного изгиба в этих условиях.

Описанные выше механические испытания были осуществлены на пластине, не покрытой медью. Поэтому проводились дополнительные механические эксперименты с пластинами, покрытыми медью. При этом пластинки испытывали таким образом, чтобы в одном случае покрытие медью было расположено снизу (область сжатия), а в другом – сверху (область растяжения). В обоих случаях было установлено, что покрытие медью несколько сужает область полностью упругих, обратимых изгибов пластины. В остальном поведение образцов, покрытых медью, было, в целом, аналогично таковому для пластины, не покрытой медью.

Проанализируем и обсудим теперь область обратимых упругих изгибов пластины при её механическом нагружении. С этой целью сопоставим результаты наших экспериментов (см. рис. 4, кривая 1) с предсказаниями теории упругости. Теория упругости для изгиба консольно закреплённой балки под

действием подвешенного груза (F) [6] даёт выражение, которое записано ниже в обозначениях, применительно к нашим условиям:

$$Y = \frac{l^3 \cdot F}{3 \cdot E \cdot J}; \quad (1)$$

$$J = \frac{1}{12} dh^3, \quad (2)$$

где Y – стрела прогиба пластинки под действием приложенной силы $F = mg$ (m – масса подвешиваемых грузов, g – ускорение свободного падения); E – модуль упругости палладия; $E = 1,15 \cdot 10^{11}$ Па [7]; l – рабочая длина пластины; J – момент инерции площадки поперечного сечения пластины; d – ширина пластины; h – толщина пластины.

Результаты расчётов представлены прямой 3 на рис. 4. Видно, что в области обратимых упругих изгибов результаты выполненных нами экспериментов (кривая 1 и 2) хорошо согласуются с предсказаниями теории упругости (прямая 3).

Для сравнительного анализа поведения пластины при водородном и механическом нагружении представляет интерес ещё один вопрос. В условиях наших механических экспериментов изгибы пластины вызываются действием вращательных моментов линейно уменьшающихся от максимального в точке закрепления пластины до нулевого значения в точке приложения нагрузки к свободному концу пластины. В то же время при насыщении водородом и равномерном расширении входной поверхности пластины на изгиб работают, как мы полагаем, вращательные моменты, одинаковые по всей длине пластинки. Соответственно выполнен анализ упругого обратимого изгиба палладиевой пластины при её механическом нагружении постоянным вращательным моментом по длине пластины. Такой подход реализуется следующим образом [6]. Длинная пластина помещается на две опоры горизонтально и нагружается подвешиванием равных грузов за пределами опор и на равных расстояниях от них. Рабочая часть пластины между опорами нагружается постоянным вращательным моментом, изгибается и принимает форму дуги круга [6]. Очевидно, что половина рабочей части рассматриваемой изогнутой пластины моделирует изгиб исследуемой в настоящей работе пластины в условиях действия постоянного механического вращательного момента. В соответствии с этим проанализируем далее упругий (обратимый) изгиб пластины, полностью аналогичной исследуемой в настоящей работе ($l = 60$ мм), но в 2 раза более длинной ($l = 120$ мм). Согласно [6] в упругой области радиус кривизны (r) такой пластины при нагружении постоянным вращательным моментом (M) описывается выражением:

$$r = E \frac{J}{M}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости палладия.

Подчеркнём, что рассматриваемый подход является корректным только в области упругости, когда изгибы пластины полностью обратимы. Используем далее результаты вышеописанных экспериментов, представленных на рис. 4 (область I, кривая 1). Как

уже обсуждалось, обратимые изгибы пластинки при её консольном механическом нагружении наблюдались при $F=0,01; 0,02$ и $0,03$ Н. В этих экспериментах максимальные вращательные механические моменты, прилагавшиеся к пластинке, составляли $M=F \cdot l$, где $l=60$ мм – рабочая длина пластины.

При приложении таких вращательных моментов, как постоянных по всей длине пластины, формула (3) даёт радиусы кривизны: 1,73; 0,865; 0,58 м. Этим радиусам соответствуют рассчитанные из геометрических соотношений стрелы прогиба исследуемой пластины равные $y_{\max} = 1,05; 2,09; 3,14$ мм. Результаты расчетов показаны на рис. 4 (кривая 4).

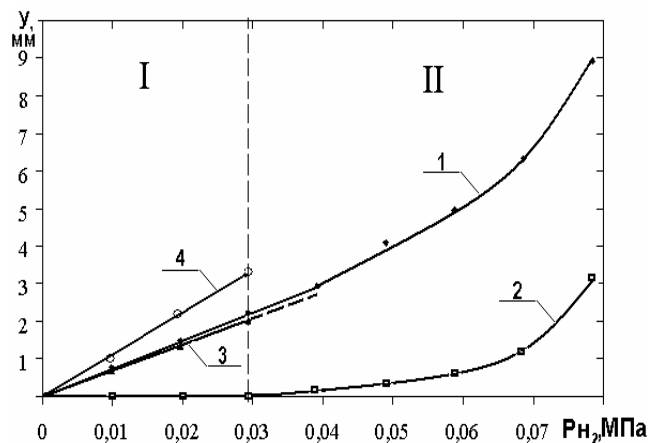


Рис. 4. Изгиб пластины при механическом нагружении:

- 1, 2 – полученные экспериментально зависимости от консольной нагрузки соответственно максимального и остаточного изгибов пластины;
3, 4 – теоретические оценки стрелы прогиба пластины соответственно при консольном нагружении и при нагружении пластины постоянным вращательным моментом

Наглядно видно, что величины стрел прогиба упругих обратимых изгибов пластины при её нагружении постоянным вращательным моментом только в $\sim 1,5$ раза больше таковых при консольном, механическом нагружении. Следовательно, выполненные эксперименты и их анализ в рамках теории упругости показали, что при механическом нагружении исследуемая палладиевая пластина изгибается полностью обратимо (упруго) до стрел прогиба, не превосходящих $y_{\max} \approx 3$ мм.

Неожиданный результат настоящей работы состоит в том, что при водородном нагружении исследуемая палладиевая пластина претерпевает по обратимому механизму изгибы, по величине много большие, чем при механическом нагружении, а именно, обратимые изгибы вплоть до стрелы прогиба ≈ 10 мм (см. табл. 3). Этот фундаментальный результат однозначно указывает на то, что физический механизм изгиба пластины при водородном воздействии коренным образом отличается от такового при изгибе пластины при «чисто» механическом нагружении.

Очевидно, полная обратимость явления (повышенные температуры и давления водорода) однозначно указывает на реализацию когерентного ме-

ханизма изгиба пластины. При этом при изгибе сохраняется когерентное строение формирующегося временного градиентного сплава α -PdH_n (слой 1), когерентное строение слоя 2 (напряженный палладий) и когерентное строение области сопряжения слоев 1 и 2.

ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования формоизменения консольно закреплённой палладиевой пластины размерами $68 \times 5,5 \times 0,27$ мм при её одностороннем насыщении водородом в температурном интервале $110 \dots 350$ °С. Показано, что формоизменение пластины развивается в два этапа. На первом этапе достигается максимальное формоизменение (изгиб) пластины. На втором, существенно более длительном, этапе происходит практически полное распрямление пластины при повышенных температурах. При низких температурах имеет место относительно небольшой остаточный изгиб пластины.

2. Максимальный изгиб пластины с повышением температуры изменяется по экстремальному закону, и в районе температур $220 \dots 260$ °С изгиб достигает максимального значения. Показано, что максимальный изгиб пластины определяется двумя фундаментальными свойствами системы Pd-H, а именно, коэффициентом диффузии и равновесной растворимостью водорода в палладии.

3. Увеличение давления газообразного водорода приводит к сильному росту максимального изгиба пластины так, что при давлении водорода, равном 0,43 МПа, максимальный изгиб пластины достигает весьма большой величины со стрелой прогиба 10 мм.

4. Степень обратимости индуцированного водородом изгиба пластины возрастает при увеличении давления водорода.

5. Экспериментальное исследование и анализ в рамках теории упругости показали, что палладиевая пластина при механическом нагружении демонстрирует упругие обратимые изгибы только при стрелах прогиба ≤ 3 мм, что в 3 раза меньше максимальных обратимых изгибов, достигаемых при водородном нагружении.

6. Механизм изгиба палладиевой пластины при водородном нагружении принципиально отличен от такового при механическом нагружении. Фундаментальная особенность механизма индуцированным водородом формоизменения заключается в том, что оно всегда реализуется через образование и развитие временного градиентного материала металл-водород. В экспериментальных условиях настоящей работы индуцированные водородом обратимые изгибы палладиевой пластины являются результатом «работы» временного градиентного упругонапряженного когерентного сплава α -PdH_n.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.A. Goltsov. Fundamentals of hydrogen Treatment of materials // *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*. Donetsk–Coral Gables: Kassiopeya Ltd, 2001, p. 3–36.

2. М.В. Гольцова, Е.Н. Любименко. Особенности формирования временного градиентного когерентного сплава палладий-водород и формоизменение палладиевой пластины в процессе одностороннего насыщения водородом // *Физика металлов и металловедение*. 2011 (В печати).
3. *Водород в металлах* / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля / Пер с англ. М.: «Мир», 1981, т.1, 475 с, т.2, 430 с.
4. В.А. Гольцов, В.В. Латышев, Л.И. Смирнов. Диффузия и растворимость водорода в металлах и упорядочивающихся сплавах // *Взаимодействие водорода с металлами* / Под ред. А.П. Захарова. М.: «Наука», 1987, с. 105-140.
5. М.В. Гольцова, Г.И. Жиров. Экспериментальное подтверждение явления термобароупруго-диффузионного равновесия превращающихся фаз при гидридных превращениях // *Физика металлов и металловедение*. 2002, т. 94, № 1, с. 70–74.
6. Р.В. Поль. *Механика, акустика и учение о теплоте*. М.: «Наука», 1971, 480 с.
7. Е.М. Савицкий, В.П. Полякова, Н.Б. Горина, Н.Р. Рошан. *Металловедение платиновых металлов*. М.: «Металлургия», 1975, 424 с.

Статья поступила в редакцию 13.05.2011 г.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМОЗМІНЕННЯ ПАЛАДІЄВОЇ ПЛАСТИНИ ПРИ ЇЇ ОДНОСТОРОННЬОМУ НАСИЧЕННІ ВОДНЕМ

О.М. Любименко, М.В. Гольцова

Проведено дослідження впливу температури і тиску на закономірності формозмінення консольно закріпленої палладієвої пластины при її односторонньому насиченні воднем. Показано, що формозмінення пластины розвивається в два етапи. На першому короткому тимчасовому етапі досягається максимальне формозмінення (вигин) пластины. На другому, істотно тривалішому, етапі відбувається розпрямлення пластины. Температурна залежність максимального вигину пластины підкоряється екстремальному закону. При низьких температурах залишковий стаціонарний вигин пластины складає 20...30 % від величини максимального вигину. Із зростанням температури зворотність вигину пластины зростає, і при 320...350 °С явище стає повністю зворотнім. Проведено випробування чисто механічних вигинів пластины і доведено, що чисто механічні вигини і вигини, що індукційованні воднем, мають зовсім різну фізичну природу.

MECHANISMS OF PALLADIUM PLATE FORMING ON ITS ONE-SIDED SATURATION BY HYDROGEN

E.N. Lyubimenko, M.V. Goltzova

The investigation of form change of hydrogen-charged palladium plate was fulfilled in a wide temperature and pressures range. It is shown that form change plates develops in two stages. At the first stage of a short time reached a maximal form changing (bend) of the plate. The second, substantially longer stage, there is straightening of plate. Temperature dependence of the maximum bend of a plate submits to the extreme law. At low temperatures, residual stationary bending plate is 20...30 % from size of the maximum bend. With increasing temperature, the reversibility of plate bending increases and at temperature range of 320...350 °C phenomenon is completely reversible. The investigation of cleanly mechanical bend of the plate prove that the cleanly mechanical bends and hydrogen-induced bends of Pd-plate have different physical nature.