

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лимарченко О. С. Динамика вращающихся конструкций с жидкостью / О. С. Лимарченко, Дж. Матаратцо, В. В. Ясинский. — К. : Гнозис, 2002. — 304 с.
2. Лимарченко О. С. Исследование задач нелинейной динамики резервуара с жидкостью вариационным методом / О. С. Лимарченко // Прикладная механика. — 1980. — №16. — С. 99-105.
3. Нариманов Г. С. Нелинейная динамика летательного аппарата с жидкостью / Г. С. Нариманов, Л. В. Докучаев, И. А. Луковский. — М. : Машиностроение, 1977. — 208 с.
4. Микишев Г. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г. Н. Микишев. — М. : Машиностроение, 1978. — 247 с.

## REFERENCES

1. Limarchenko, O.S., Mataratstso, Dzh. and Yasinskiy, V.V. (2002), *Dinamika vrashchayushchikhsya konstruksiy s zhidkostyu* [Dynamics of rotating structures with liquid], Gnozis, Kyiv, Ukraine.
2. Limarchenko, O.S. (1980), "Research of tasks of nonlinear dynamics of reservoir with a liquid a variation method", *Prikladnaya myekhanika*, no. 16, pp. 99-105.
3. Narimanov, G.S., Dokuchayev, L.V. and Lukvskiy, I.A. (1977), *Nelineynaiia Dinamika lyetatyelnogo apparata s zhidkostyu* [Nonlinear dynamics of aircraft with liquid], Mashinostroyeniye, Moskow, Russia.
4. Mikishyev, G.N. (1978), *Ekspyerimyentalnyye myetody v Dinamiky kosmchyeskikh apparatov* [Experimental methods are in the dynamics of space vehicles], Mashinostroyeniye, Moskow, Russia.

УДК 669.788 + 669.234: 539.373

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ИЗ СПЛАВА А-PdH<sub>N</sub> ПРИ ЕЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОДНОСТОРОННЕМ НАСЫЩЕНИИ ВОДОРОДОМ

Любименко Е. Н., к. ф.-м. н., доцент

*ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,  
пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 83500, Украина*

lyubimenko@inbox.ru

Экспериментально исследовано при скорости подачи водорода в камеру  $5,4 \times 10^{-3}$  МПа/с влияние исходного содержания водорода на формоизменение пластины из сплава  $\alpha$ -PdH<sub>0,009</sub> при ее одностороннем насыщении водородом до состава сплава  $\alpha$ -PdH<sub>0,018</sub> и сплава  $\alpha$ -PdH<sub>0,018</sub> до состава сплава  $\alpha$ -PdH<sub>0,027</sub>. 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. Установлено, что при 150°C исходное содержание водорода в палладии влияет на величину максимального изгиба, время достижения максимума, на кинетику распрямления пластины и величину остаточного стационарного формоизменения.

*Ключевые слова: водород, палладий, формоизменение, водородные концентрационные напряжения, диффузия.*

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМОЗМІНЕННЯ ПЛАСТИНИ ЗІ СПЛАВУ $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> ПРИ ЇЇ ДОДАТКОВОМУ ОДНОБІЧНОМУ НАСИЧЕННІ ВОДНЕМ

Любименко О. М., к. ф.-м. н., доцент

*ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,  
пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 83500, Україна*

lyubimenko@inbox.ru

Експериментально досліджено при швидкості подачі водню в камеру  $5,4 \times 10^{-3}$  МПа/с вплив вихідного вмісту водню на формозмінення пластини зі сплаву  $\alpha$ -PdH<sub>0,009</sub> при її додатковому насиченні воднем до сплаву  $\alpha$ -PdH<sub>0,0184</sub> та сплаву  $\alpha$ -PdH<sub>0,018</sub> до складу сплаву  $\alpha$ -PdH<sub>0,027</sub>. Підтверджено, що формозмінення пластини розвивається в два етапи: на першому етапі пластинка швидко досягає максимального вигину, а на другому – набагато тривалішому етапі – пластинка розпрямляється практично повністю зворотно. Встановлено, що при 150°C вихідний вміст водню в пластині впливає на величину максимального вигину, час досягнення максимального вигину, на кінетику розпрямлення пластини і величину залишкового стаціонарного формозмінення.

*Ключові слова: водень, паладій, формозмінення, водневі концентраційні напруження, дифузія.*

## FEATURES OF $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> ALLOY PLATE FORM-CHANGING AT ITS ONE-SIDE ADDITIONAL HYDROGEN SATURATION

Lyubimenko E. N., Ph.D. in Physics and Maths., associate professor

*Donetsk National Technical University,  
pl. Shibankova, 2, g. Krasnoarmeisk, 83500, Ukraine*

lyubimenko@inbox.ru

Dedicated to actual problem of metal physics, namely to the investigations of hydrogen induced form-change laws in palladium.

For the realization of the assigned task was used and modernized device HVD-4 with hydrogen-vacuum chamber. There was worked out the method of experiments realization in order to receive the time dependent of bending deflection of specimen during its one-side saturation with hydrogen.

The investigations at temperature 150°C and at some range of concentration has been described. The impact of the hydrogen initial content on the  $\alpha$ -PdH<sub>0,009</sub> alloy plate form-change at one-side additional saturation with hydrogen to the  $\alpha$ -PdH<sub>0,0184</sub> alloy composition and  $\alpha$ -PdH<sub>0,0184</sub> alloy to the  $\alpha$ -PdH<sub>0,027</sub> alloy composition was researched experimentally. As a result of experiments there was confirmed that the form-change plate develops in two stages: on the first stage the plate reaches very quickly the maximum bend, while on the second stage, significantly longer stage, the plate is straightened to its original condition or there is a residual steady-state bend.

It was found that hydrogen contained initially in palladium impacts on the value of the maximum bending, on the time to achieve maximum bending, on the kinetics and magnitude of the residual stationary form-changing at 150°C. Experimental comparison of palladium plates bending under the influence of hydrogen and mechanical loading was made.

Established experimental regularities are determined by two fundamental properties of Pd-H system: diffusion coefficient and equilibrium solubility of hydrogen in palladium as well as the external and internal conditions of the diffusion transport of hydrogen.

The physical causes of reversible hydrogen-induced shape change (bending) palladium plate are discussed. The conclusion about the nature of the phenomenon is given.

*Key words: hydrogen, palladium, form-change, hydrogen concentration stresses, diffusion.*

## ВВЕДЕНИЕ

Мембранная технология разделения водородосодержащих смесей и получения особо чистого водорода и его изотопов в связи с развитием термоядерной энергетики интенсивно развивается. Вследствие многообразия условий эксплуатации диффузионных фильтров водорода для их изготовления необходимы сплавы, обладающие рядом специальных свойств. Поэтому модельным объектом для исследований проблем, возникающих при взаимодействии водорода с металлами, служит система Pd-H. Появление в металле внутренних концентрационных напряжений происходит, когда растворенный в металле водород расширяет кристаллическую решетку металла, вследствие чего возникают обратимые формоизменения металла [1]. Это имеет место, когда внутренние концентрационные напряжения не превосходят предела пропорциональности металла.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представляет интерес экспериментально изучить формоизменение на пластине палладия, исходно насыщенной водородом до сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$ , где  $n$  – концентрация водорода в палладии, при увеличении  $n$  на  $\Delta n = n = \text{const.}$  при последующем напуске водорода в камеру. Это открывает дополнительные возможности для накопления информации о закономерностях водородоупругих эффектов в системах палладий-водород при повышенных температурах.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ

Исследуемый образец в виде тонкой пластины размерами ( $68 \times 5,5 \times 0,27$  мм) из чистого палладия (99,98%) был оттожен при  $700^\circ\text{C}$  в течение 60 мин. и охлажден с печью. Одну сторону отожжённого образца электролитически покрывали медью и закрепляли в держатель рабочей камеры водородо-вакуумную установку ВВУ-4 [2], одним торцом так, чтобы вверху была сторона образца с медным покрытием.

Эксперименты проводили в следующем порядке. Образец медленно ( $3 \text{ K/min}$ ) нагревали до  $180^\circ\text{C}$  и выдерживали при этой температуре 20 мин. После этого в изотермических условиях в рабочую камеру подавали диффузионно-очищенный водород до заданного давления, таким образом насыщая пластину до состава сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$ , выдерживали в таких условиях до тех пор, пока пластина вернется в исходное состояние и повторно насыщали водородом. От начала подачи водорода ( $t = 0 \text{ s}$ ) с помощью катетометра и видеокамеры Samsung записывали изменения стрелы прогиба образца через кварцевое окно в рабочей камере. Полученные видеозаписи затем анализировали в программе Sony Vegas кадр за кадром, что позволяет получить зависимость стрелы прогиба образца от времени. Ошибка измерения положения свободного конца пластины составляет  $\sim 0,03$  мм.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с поставленной задачей влияние исходно растворенного водорода на формоизменение палладиевой пластины было изучено при температуре  $150^\circ\text{C}$ . На рис. 1 представлена характерная временная зависимость формоизменения пластины. По описанной методике [2] насыщали сплав  $\alpha\text{-PdH}_{0,0095}$  до состава сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,018}$  и сплав  $\alpha\text{-PdH}_{0,018}$  до состава сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,027}$ , т.е., когда давление водорода в рабочей камере установки ВВУ-4 было увеличено от  $0,01 \text{ МПа}$  до  $0,037 \text{ МПа}$ , и от  $0,037 \text{ МПа}$  до  $0,061 \text{ МПа}$ .

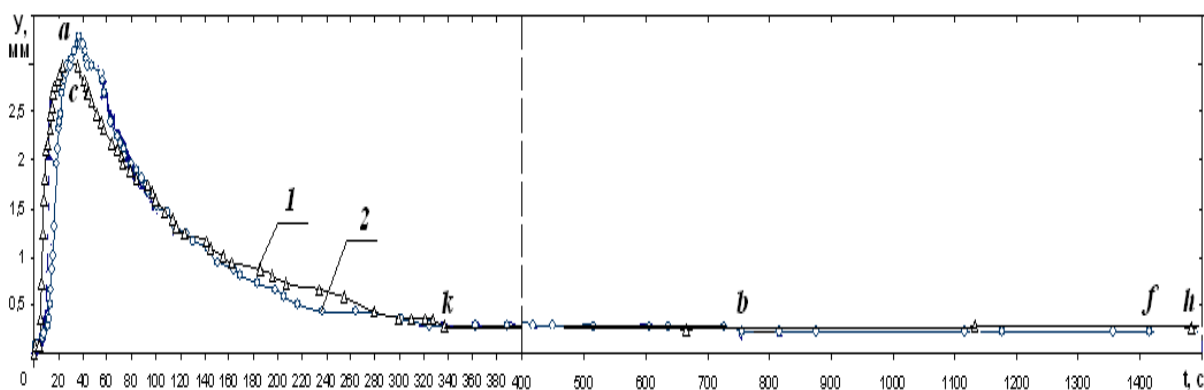


Рис.1. Временная зависимость стрелы прогиба пластины при  $150^\circ\text{C}$  из сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,009}$  при ее одностороннем насыщении водородом до состава сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,018}$  (1) и сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,018}$  до состава сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,027}$

Как видно из рис. 1, кривая 1, формоизменение пластины осуществляется в два временных этапа. На первом этапе пластина быстро изгибается, причём, непосредственно уже в процессе открытия вентиля на установке при скорости подачи водорода  $5,4 \times 10^{-3} \text{ МПа/с}$  в рабочую камеру. При этом в момент достижения заданного давления  $P_{\text{H}_2} = 0,037 \text{ МПа}$  ( $t = 4,45 \text{ с}$ ) изгиб пластины уже достигает экспериментально заметной величины. В

последующем при постоянном давлении водорода  $P_{H_2}$ , образец продолжал насыщаться водородом и интенсивно изгибаться и стрела прогиба достигла своего максимума  $y_{\max} = 3,4$  мм за промежуток времени  $\Delta t_{\max} = 37$  с (рис. 1, кривая 1, точка *a*) от начала подачи водорода. После достижения максимального изгиба (точка *a*), т.е. в начале второго, более длительного этапа, чем первый, образец стал медленно закономерно распрямляться, что свидетельствовало о постепенном уменьшении напряжений в образце в результате выравнивания градиента концентрации водорода по сечению образца. Через 750 с от начала эксперимента было достигнуто стационарное состояние ( $y_{\text{ст}} = 0,21$  мм), которое в последующем в течении 1740 с до завершения эксперимента оставалось неизменным (рис. 1, кривая 1, участок *b-f*). Подчеркнем, что  $y_{\text{ст}}$  составляет примерно 6% от величины максимального изгиба  $y_{\max} = 3,4$  мм.

Во второй части эксперимента (кривая 2, рис. 1) по описанной выше методике насыщали сплав  $\alpha\text{-PdH}_{0,018}$  до состава сплава  $\alpha\text{-PdH}_{0,027}$ , когда давление водорода в рабочей камере установки ВВУ-4 было увеличено от 0,037 МПа до 0,061 МПа при скорости подачи водорода  $v = 5,4 \times 10^{-3}$  МПа/с. Увеличение давления водорода не привело к существенному изменению кинетики формоизменения пластины, как на первом, так и на втором этапе её насыщения водородом. После окончания напуска изгиб продолжал увеличиваться и через 21 с от начала подачи водорода в камеру был достигнут меньший максимальный изгиб пластины:  $y_{\max} = 3,2$  мм (отмечен точкой *c* на кривой 2), чем в первом эксперименте. Второй этап начался с того, что максимальный изгиб удерживался в течении 8 с (рис. 1) и далее пластина начала распрямляться. Как видим, пластина распрямлялась, как и в первом эксперименте с такой же скоростью, однако, как видим из рис. 1, через 300 с после начала напуска наблюдается некоторое приостановление распрямления, которое со временем продолжается. Время достижения конечного стационарного изгиба пластины  $y_{\min} = 0,25$  мм составило 340 с (кривая 2, участок *k-h*) и в течении дополнительной выдержки 1100 с не изменилось.

Эти экспериментальные результаты качественно хорошо согласуются с нашими данными [3-5], полученными в экспериментах при насыщении пластины палладия, исходно не содержащей водород.

В описанных выше экспериментальных условиях максимальный изгиб пластины, в соответствии с развиваемой феноменологической моделью в работе [3], определяется параметрами сформировавшегося к этому моменту слоя градиентного самолокализованного упруго напряженного, когерентного сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$  (слой 1) толщиной ( $h$ ) и удлинением ( $\Delta l$ ). Фактор толщины слоя ( $h$ ) сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$  в момент достижения  $y_{\max}$  определяется коэффициентом диффузии водорода в палладии, который при  $T = \text{const}$  остается постоянным, (удлинение ( $\Delta l$ ) слоя 1 градиентный сплав  $\alpha\text{-PdH}_n$ ) определяется средним содержанием в нем водорода ( $n$ ) при данных  $P_{H_2}$  и  $T$  в момент достижения пластиной максимального изгиба.

Можно полагать, что концентрация водорода в слое 1 в момент достижения пластиной максимального изгиба вполне соизмерима с величиной, равновесной растворимости водорода в палладии ( $n \approx n_0$ ). Однако рост слоя 1 ( $\alpha\text{-PdH}_n$ ) в этот момент приостанавливается (тормозится) вследствие установления термо-баро-упруго-диффузионного (ТБУД)-равновесия и удерживаться в течение нескольких секунд (см на рис.1, кривые 1,2 наличие площадки, точки *a, c*). Это макроскопическое проявление ТБУД-равновесия есть равновесие между упругосжатым слоем 1 и упругорастянутым слоем 2 максимально изогнутой пластины.

Здесь установление ТБУД-равновесия является результатом действия взаимосвязанных *внутренних* процессов, и проявляется как макроскопическое явление – пластина как целое достигает максимального изгиба и удерживается в этом состоянии в течение некоторого времени и как, показывают эксперименты (рис. 1, кривых 1,2), наличие исходно

растворенного водорода в пластине увеличивает длительность ТБУД–равновесия (кривая 2 наличие площадки возле точки с).

ТБУД–равновесие возникает вследствие того, что термодинамическая движущая сила ( $P_{H_2}, T$ ) проникновения водорода в металл продолжает действовать и с необходимостью преодолевается путем смены условий и механизма диффузионного транспорта водорода в пластине. В результате слой 2 (палладий) начинает весьма медленно диффузионно насыщаться водородом с эффективным коэффициентом диффузии водорода, много меньшим истинного коэффициента диффузии водорода в палладии ( $D^* \ll D$ ) и, как показывают эксперименты рис. 1 (кривые 1,2), пластина постепенно распрямляется с весьма малой скоростью (много меньшей скорости изгиба пластины) из-за «работы» сильного ТБУД–торможения ( $D^* \ll D$ ) и реализации временных ТБУД–равновесий между упруго сжатыми и упруго растянутыми слоями пластины [6], о чем свидетельствуют площадки на рис. 1 (кривых 1,2), на которых изгиб прекращается, а затем очень медленно со временем изменяется.

В результате, как мы видим из экспериментальной части работы, распрямление пластины осуществляется до весьма высокой степени обратимости. После достижения стационарного состояния пластина обычно выдерживалась в водороде в течение дополнительного времени. Однако это не приводило к заметному уменьшению остаточного стационарного состояния (см. рис. 1) вследствие установления квазистационарного термо–баро–упруго–диффузионного (ТБУД)–равновесия [6–8] между неоднородным концентрационным полем водорода и полем остаточных упругих ВК–напряжений.

Наличие некоторого стационарного, остаточного изгиба на завершающей стадии насыщения пластины водородом (см. рис. 1, кривая 1,2 участок  $b-f, k-h$ ) мы не связываем с необратимой пластической деформацией. В работе [3] показано, что исследуемая палладиевая пластина при механическом нагружении вплоть до стрелы прогиба  $y_{\max} \leq 3 \div 3,5 \text{ mm}$  претерпевает изгибы гарантированно в пределах упругих свойств металла для чистого палладия. Если рассматривать изгибы в данной работе, то они осуществляются в упругой области, так как стрела прогиба составляет  $y_{\max} \leq 3,4 \div 3,2 \text{ mm}$ . Следовательно, можно полагать, что в условиях наших экспериментов пластина не подвергалась пластической деформации, и внутренние ВК–напряжения не превосходят упругих характеристик палладия и ВГ–сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$ .

Результаты этих экспериментов интересны тем, что сильного влияния исходно содержащегося водорода в пластинке (т.е. когда можно рассматривать Pd–пластинку как состоящую из сплава  $\alpha\text{-PdH}_n$ ) на достигаемый максимальный изгиб не было обнаружено по сравнению с теми, которые наблюдаются при насыщении Pd–пластины, не содержащей водород [2–5]. Оказалось, что полученные экспериментальные кривые (рис.1) противоречат эффекту Льюиса («Uphill» эффект) [9], который имел место при комнатной температуре, когда влияние восходящей диффузии водорода велико и для водородоупругого диффузионного потока [6] преобладает вторая часть уравнения:

$$J(x, y, z, t) = -D\nabla C + \frac{DC}{kT} \nabla U,$$

где  $J(x, y, z, t)$  – водородный поток;  $D = f(C, T)$  – коэффициент распространения;  $T$  – температура;  $C = f(x, y, z, t)$  – водородная концентрация;  $k$  – постоянная Больцмана;  $x, y, z$  – координаты;  $t$  – время;  $U = f(C, \mu)$  – потенциал области ВК–напряжений.

Первая (I) часть уравнения ( $-D\nabla C$ ) описывает водородный поток Фика, в то время, как вторая часть (II) описывает водородный поток, вызванный областью ВК–напряжений. В этом

случае результирующий поток водорода направлен против градиента концентрации и эффективный коэффициент диффузии  $D^* < 0$ .

Эффект Льюиса при исследовании проникновения водорода через трубчатые мембраны из палладия и его сплавов экспериментально проявлялся в том, что внезапное повышение содержания водорода на внешней поверхности мембраны, достигаемое изменением давления контактирующего газообразного водорода или электролитическими методами, приводило к начальному уменьшению давления водорода внутри трубки и наоборот. Все это противоречит законам нормальной (по Фику) диффузии.

Для объяснения наблюдаемых закономерностей авторы [9] сопоставляли изменения давления внутри трубки, с обратным изгибом стенки трубки, вызванным расширением ее внешней части при поглощении водорода. Такой изгиб способствует протеканию восходящей («Uphill») диффузии водорода [9, 10] из области, сжатой у внутренней поверхности стенки трубки, к расширенной у внешней поверхности. Нарушение равновесия (растворенный в металле – газообразный водород) приводит к поглощению водорода внутренней стороной стенки трубки и уменьшению давления внутри трубки.

Поэтому в наших экспериментах при дополнительном насыщении водородом пластины из сплава  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> должно было иметь место перераспределение исходно растворенного водорода под действием возникающего градиента внутренних напряжений по толщине пластины, что приводило бы к более сильным изгибам, чем те, которые мы наблюдали в работе.

Можно предположить, что более заметные эффекты будут проявляться при более низких температурах и при сильном влиянии восходящей диффузии водорода.

В настоящей работе экспериментально показано, что при дополнительном насыщении пластинки из сплава  $\alpha$ -PdH<sub>n</sub> до малых равновесных концентраций водорода в палладии (в нашем случае до  $n \leq 0,03$  H/Pd) исходное содержание водорода в пластине влияет на величину максимального изгиба, время достижения максимума, на кинетику распрямления пластины. Однако формоизменение пластины является практически полностью обратимым, но величина остаточного формоизменения увеличивается.

Углубление понимания физических особенностей процесса проникновения водорода в металл, который претерпевает формоизменение, когда особую роль играет перераспределение внутренних напряжений, взаимообусловленное перестройкой концентрационного поля водорода и изменением условий диффузионного транспорта водорода, требует систематической теоретической и экспериментальной разработки для совершенствования технологий эксплуатации металлических изделий в водородосодержащих средах.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально изучено формоизменение консольно закреплённой палладиевой пластины размерами  $68 \times 5,5 \times 0,27$  мм при ее одностороннем насыщении водородом при температуре  $150^\circ\text{C}$  и увеличении концентрации водорода в палладии на  $\Delta n = 0,009$  H/Pd при насыщении сплава  $\alpha$ -PdH<sub>0,018</sub>. Подтверждено, что формоизменение пластины развивается в два этапа. На первом этапе весьма быстро достигается максимальное формоизменение (изгиб) пластины. На втором, существенно более длительном этапе, происходит практически полное распрямление пластины до некоторого стационарного состояния.
2. Экспериментальные результаты работы подтверждают физическую обоснованность феноменологической модели явления индуцированного водородом формоизменения палладиевой пластины, что в момент достижения пластиной максимального изгиба его

рост приостанавливается (тормозится) вследствие установления термо-баро-упруго-диффузионного (ТБУД)-равновесия и удерживается.

3. Полученные в работе результаты могут быть использованы для повышения срока эксплуатации палладиевых мембран для получения особо чистого водорода и его изотопов диффузионным методом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Водород в металлах / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. Пер с англ. — М. : Мир, 1981. — Т. 1. — 475 с. — Т. 2. — 430 с.
2. Гольцов В. А. Установка, методика и результаты исследования водородоупругой деформации палладиевой пластины / В. А. Гольцов, Е. Н. Любименко, Ж. Л. Глухова // Физико-химическая механика материалов. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 55-60.
3. Гольцова М. В. Особенности формирования градиентного сплава палладий-водород и формоизменение палладиевой пластины в процессе одностороннего насыщения водородом / М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко // Физика металлов и металловедение. — 2011. — Т. 112, № 4. — С. 393-403.
4. Гольцова М. В. Формоизменение палладиевой пластины при ее одностороннем насыщении водородом: влияние скорости роста давления газообразного водорода / М. В. Гольцова, Е. Н. Любименко // Физика металлов и металловедение. — 2012. — Т. 113, № 11. — С. 1073-1079.
5. Любименко Е. Н. Формоизменение палладиевой пластины, индуцированное водородом / Е. Н. Любименко // Физико-химическая механика материалов. — 2012. — Т. 48, №1. — С. 83-88.
6. Goltsov V. A. Fundamentals of hydrogen Treatment of materials. // Progress in Hydrogen Treatment of Materials. — Donetsk–Coral Gables : Kassiopeya Ltd, 2001. —543 p. — P. 3-36.
7. Жиров Г. И. Экспериментальное подтверждение явления термо-баро-упруго-диффузионного равновесия превращающихся фаз при гидридных превращениях / Г. И. Жиров, М. В. Гольцова // Физика металлов и металловедение. — 2002. — Т. 94, №1. — С. 70-74.
8. Водородные концентрационные напряжения: термодинамическое описание и математическое моделирование / Ж. Л. Глухова, В. А. Гольцов, Т. А. Щеголева, Е. Н. Любименко // Металлофизика и новейшие технологии. — 2009. — Т. 31, №3. — С. 333-342.
9. Lewis F. A. Uphill Hydrogen Diffusion Effects: Nature and Manifestations / F. A. Lewis // Progress in Hydrogen Treatment of Materials / [editor V. A. Goltsov]. — Donetsk–Coral Gables : Kassiopeya Ltd, 2001. — 543 p. – P. 147-161.
10. Lewis F. A. Palladium- and Platinum-Hydrogen / F. A. Lewis, K. Kandasamy, X. Q. Tong // Hydrogen In Metal System II / Eds. F.A. Lewis and A. Aladjem. Solid. State Phenomena. — Zurich : Scitec Publications, 2001. — Vol. 73. — 75. — P. 207-517.

#### REFERENCES

1. Vodorod v metallakh [Hydrogen in metals] (1981), pod red. G. Alefel'da i I. Fel'klya, Translation from English, Moskov, Russsia.
2. Gol'tsov, V.A., Lyubimenko, E.N. and Glukhova, Zh.L. (2009), "Installation, method and results of the study hydrogen-elasticity deformation in plate palladium", *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, vol. 45, no. 5, pp. 55-60.

3. Goltsova, M.V. and Lyubimenko, E.N. (2011), "Features of formation of a gradient alloy palladium-hydrogen and form-changing palladium plate in a process of unilateral hydrogen saturation", *Fizika metallov i metallovedenie*, vol. 112, no. 4, pp. 393-403.
4. Goltsova, M.V. and Lyubimenko, E.N. (2012), "Form-changing of palladium plate in a process of unilateral hydrogen saturation: the influence of the growth rate of hydrogen gas pressure", *Fizika metallov i metallovedenie*, vol. 113, no. 11, pp. 1073-1079.
5. Lyubimenko, E.N. (2012), "Form-changing of palladium plate induced by hydrogen", *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, vol. 48, no. 1, pp. 83-88.
6. Goltsov, V.A. (2001), Fundamentals of hydrogen Treatment of materials, *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*, pp. 3-36.
7. Zhiron, G.I. and Goltsova, M.V. (2002), "Experimental confirmation of the phenomenon of thermo-elastic-baro-diffusion-equilibrium phases convert in hydride transformation", *Fizika metallov i metallovedenie*, vol. 94, no. 1, pp. 70-74.
8. Glukhova, Zh.L., Goltsov, V.A., Shchegoleva, T.A. and Lyubimenko, E.N. (2009), "Hydrogen concentration stresses: thermodynamic description and mathematical modeling", *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, vol. 31, no. 3, pp. 333-342.
9. Lewis, F.A. (2001), "Uphill Hydrogen Diffusion Effects: Nature and Manifestations", *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*, pp. 147-161.
10. Lewis, F.A. Kandasamy, K. and Tong, X.Q. (2001), "Palladium- and Platinum-Hydrogen", *Hydrogen In Metal System II*, vol. 73-75, pp. 207-517.

УДК 519.876.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ТОЛСТЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛИТ В СИСТЕМАХ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ

Овский А. Г.

*Запорожский национальный университет,  
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69600, Украина*

mastergiver@yandex.ua

В работе охарактеризован препроцессор для решения трехмерных и двумерных задач теории упругости для многослойных пластин, плит с заданными начальными и граничными условиями. Для разработки препроцессора используется система компьютерной математики Maxima, которая эффективно производит вычисления с символическими данными в задачах. Процессор осуществляет перевод символического дифференциального решения в формульное без производных и дифференциалов. Из формульного решения в результате подстановки данных получается числовое решение, удобное для визуализации результатов задач. На базе разработанного препроцессора построены математические модели для решения задач теории упругости в двумерной и трехмерной постановках. В частности в статье построены модели двумерных многослойных плит. Решения трехмерных задач не приведены в силу большого объема формульной информации полученного результата. Препроцессор осуществляет вывод символического решения в форме дифференциальных операторов, записанных с помощью упрощенной символики. В статье приведены алгоритмы автоматизации аналитических методов, с помощью которых осуществляется предварительный вывод препроцессором символического дифференциального решения общей задачи статической теории упругости для многослойных тел. Алгоритмы, с помощью которых строятся модели, носят общий характер и могут быть применены для любой из систем компьютерной математики.

*Ключевые слова: система компьютерной математики (СКМ), автоматизация, многослойные плиты, препроцессор, символическое решение.*