

# Расчет и конструирование

УДК 539.3:539.56:669.017

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДИФФУЗИИ

*Ю.Н. Ребяков, А.О. Чернявский, О.Ф. Чернявский*

## DEFORMATION AND DESTRUCTION OF MATERIALS AND STRUCTURES IN THE DIFFUSION

*Yu.N. Rebyakov, A.O. Chemiavsky, O.F. Chemiavsky*

Приведен обзор публикаций по влиянию сред (в основном - водорода) на процессы деформирования и разрушения. Выделен ряд нерешенных проблем. Предложено новое решение связанной задачи расчета диффузии и напряженно-деформированного состояния. На примере установок для производства водорода показано, что напряжения от диффузионной дилатации, не учитывавшиеся ранее, могут быть основной причиной разрушения, а понимание механизмов явлений позволяет эффективно влиять на долговечность и безопасность конструкций. Описаны созданные в ЮУрГУ установки для малоцикловых испытаний материалов в газовых средах и результаты пробных испытаний циркониевого и титанового сплавов.

*Ключевые слова: диффузия, дилатация, напряжения, прочность, разрушение, долговечность.*

The article contains overview of publications on the influence of mediums (mostly - hydrogen) on deformation and fracture processes. Some unresolved problems are pointed out. A new solution of coupled problem of diffusion and stress-strain state calculation is given using as example hydrogen equipment. It is shown that stresses caused by diffusion dilatation, which was not taking into account previously, may be the main cause of low-cycle fracture. Understanding of role and mechanisms of the phenomena allow to influence the lifetime and safety of structures effectively. Results of pilot tests of zirconium and titanium alloys in gaseous environments are also discussed along with the testing equipment created in South-Ural State University for that purposes.

*Keywords: diffusion, dilatation, stress, strength, fracture, durability.*

Влияние среды на механические свойства металлов и процессы деформирования и разрушения конструкций является одним из важных, но недостаточно изученных факторов, определяющих проектный и остаточный ресурс многих потенциально опасных объектов в энергетике [1,2], нефтегазовой, химической, атомной [3, 4], металлургической отраслях. Несмотря на то, что работы в этой области начались более 30 лет назад [5], достаточное для практических целей решение проблемы пока не достигнуто.

При анализе влияния среды традиционно рассматривается 2 типа эффектов - поверхностные и объемные. Поверхностные эффекты выражаются либо в растворении («уносе») материала вследствие химического взаимодействия со средой, либо в изменении вязкости разрушения вследствие взаимодействия вершины трещины с поляризованными молекулами среды (эффект Ребиндера [6]). Анализ и учету поверхностных эффектов, в первую очередь - коррозии, посвящено множество исследований. Объемные эффекты более сложны и многообразны. Хорошо известно, например, необратимое изменение свойств сталей под действием водорода - водородное охрупчивание, выражающееся в уменьшении характеристик прочности и пластичности вследствие химических и структурных изменений [7]. Аналогичные (хотя и менее изученные) изменения свойств в объеме детали наблюдаются при действии кислорода, морской воды, продуктов сгорания в ГТД. В то же время слабо изученными являются обратимые влияния среды, особенно дила-

тационные. При растворении, например, водорода в магнии объем последнего может уменьшаться вдвое уже при давлении около 10 МПа. Насыщение водородом палладия может увеличивать объем теоретически до 45 %, практически в установках Уралхиммаш для производства особо чистого водорода оно достигает 4,5 %. Для сравнения: увеличение объема стали при нагреве до 1000 °С не превышает 4..5,5 %.

Дилатационные процессы в микронеоднородных материалах приводят к появлению микронапряжений, изменяющих характеристики диаграмм деформирования. В зависимости от состава, структуры и состояния материала эти изменения могут быть различны. Так, по данным работы [8], из нескольких десятков сталей, применяемых в газовой отрасли, примерно у половины пределы текучести и прочности одинаковы на воздухе и в природном газе. У остальных они различаются до полутора - двух раз и эти различия являются обратимыми: при испытаниях на воздухе после длительной выдержки в газе влияние газовой среды не обнаруживалось. Скорости диффузии чаще всего сравнительно велики, поэтому возврат свойств происходил уже через 10-15 минут после переноса образца из газовой среды в воздушную. Обзор работ по обратимому влиянию диффузии водорода на пластичность металлов (водородную хрупкость шестого вида) при однократном монотонном нагружении приведен в [7]. При малоцикловых испытаниях можно ожидать более существенного влияния среды вследствие нелинейности зависимости циклической долговечности от ресурса пластичности и специфики действия самоуравновешенных дилатационных напряжений.

Неравномерная по объему конструкции дилатация, вызванная диффузией, может приводить к появлению макронапряжений. Их влияние на поведение конструкции аналогично влиянию температурных напряжений. При однократном нагружении конструкций из пластичных материалов оно чаще всего оказывается слабым. При повторных нагружениях эти напряжения могут, при определенных условиях [9], приводить к трещинам малоциклового усталости, а также прогрессирующему с числом циклов накоплению остаточных перемещений и статических повреждений. Температурные напряжения в обязательном порядке учитываются при оценках прочности и долговечности конструкций [10], но аналогичные им напряжения от дилатационных воздействий среды, как правило, не рассматриваются, несмотря на возможность весьма значительных изменений объема.

При рассмотрении эффектов, возникающих при работе металлических конструкций в активных газовых средах, основное влияние уделяется взаимодействию металлов с водородом по двум причинам: во-первых, водород, вследствие минимального размера ионов, сравнительно быстро диффундирует в материалах на значительные глубины, и, во-вторых, водород присутствует - или возникает (например, при разложении метана на поверхности железа, или воды на поверхности алюминия [11]) - во многих технических системах. Влияние водорода на механические характеристики материалов в настоящее время активно изучается - как физическими средствами для систем, масштабы которых сравнимы с размером ячейки кристаллической решетки материала, так и механическими испытаниями образцов, размеры которых значительно превышают характерные размеры структурных составляющих материала. Влияние других сред (кислорода, сероводорода, морской воды, природного газа) на процессы внутри деталей может, как показывает опыт эксплуатации ряда конструкций, быть не менее сильным, но пока оно изучено значительно слабее.

Взаимодействие водорода с металлом на микроуровне рассматривается в большом количестве работ, в том числе недавних. Ряд работ посвящен изучению потенциалов взаимодействия атомов различных металлов с водородом и другими примесями. Так, например, в работе [12] приведены параметры потенциалов для расчета взаимодействий водорода с атомами алюминия, меди, серебра и никеля, в [13] - железа, в [14] рассматривается взаимодействие водорода с цирконием.

Достаточно большое число работ [15-17] посвящено изучению влияния дефектов кристаллической структуры (типа вакансий, дислокаций, внедренных атомов) на диффузию и накопление (растворение) водорода. Показано, в частности, что дефекты структуры могут существенно влиять на скорость диффузии - например, скопления вакансий вдоль дислокации создают «эффект трубы» и увеличивают скорость диффузии [15]. С другой стороны, примесные атомы могут играть роль ловушек, адсорбирующих водород, и замедлять его диффузию [16]. Отметим, что трудоемкость первопринципных (квантовомеханических) расчетов ограничивает их возможности системами из сотен или тысяч атомов, что не позволяет напрямую использовать их результаты для оценки механического поведения систем с размерами порядка миллиметров (или хотя бы микрометров). Использование квантово-механических подходов позволяет получать определенные качественные результаты (например, в последнее время - даже некоторые оценки характера

влияния напряжений на растворимость [18]), однако при рассмотрении систем типа дислокаций авторам приходится заменять квантово-механические подходы, развитые для пар атомов, на более простые - например, использовать элементы механики сплошной среды и записывать уравнения классической теории упругости для напряжений в окрестностях дислокаций [16, 17, 19, 20]. Даже с такими упрощениями расчеты не позволяют пока перейти к описанию диффузии и связанных с этим эффектов в поликристаллических образцах, и изучение таких эффектов ведется экспериментальным путем.

Результаты экспериментального определения коэффициентов диффузии водорода (и азота) в титане в зависимости от температуры приведены, например, в работе [21], в сплавах ниобия - в работе [22], палладия - [23, 24], железа - [25, 26]. Изменение параметров кристаллической решетки материала при нагружении, а также изменение систем дефектов (дислокаций, пор) при пластическом деформировании, приводит к экспериментально обнаруживаемому изменению скоростей диффузии. Например, в работе [25] обнаружено снижение коэффициента диффузии водорода в стали на 15...20 % (в зависимости от марки стали) при приложении растягивающих напряжений, составляющих 0,8 от условного предела текучести. Влияние пластической деформации еще больше - до 50 %, что приводит, например, к заметному влиянию остаточных напряжений и деформаций, возникающих в процессе холодной вытяжки проволоки, на скорость диффузии водорода и связанное с ней водородное охрупчивание [27, 28].

Растворимость водорода в металлах также является функцией напряжений и пластических деформаций. Результаты экспериментального изучения влияния приложенных напряжений на растворимость водорода в титановых сплавах приведены, в частности, в [29]; показано, что растворимость при растяжении и сжатии описывается одной линейной зависимостью, в то время как сдвиг практически не влияет на растворимость. В то же время анизотропия материала может приводить и к влиянию сдвиговых напряжений: в работе [30] расчетным путем показано, что растворимость водорода должна зависеть от напряжений сдвига в окрестностях вершины трещины, направление которой не совпадает с осями кубической кристаллической решетки материала. Попытки описания равновесной (установившейся после достаточного времени) концентрации водорода, исходя из физических соображений о влиянии гидростатического напряжения и эквивалентной пластической деформации, приведены в работах [31, 32].

Растворение водорода может приводить к существенному изменению механических характеристик материалов. Так, хорошо известно, что для титана присутствие водорода ведет к увеличению статической и циклической прочности, увеличению пластичности, сдвигу в сторону увеличения критической температуры хрупкости [33, 34]. В то же время предел текучести никеля, определенный на монокристаллах, уменьшается в водороде [35]; для нержавеющей сталей и никелевых сплавов характерно разупрочнение и охрупчивание - [36]. Влияние водорода на механическое поведение конструкций чаще всего рассматривают в связи с водородно-индуцированным растрескиванием, одними из основных механизмов которого считаются снижение сил взаимодействия атомов металла в присутствии ионов водорода (hydrogen enhanced decohesion model - HEDE) и снижение предела текучести, приводящее к локализации пластического течения перед вершиной трещины (hydrogen-enhanced local plasticity model - HELP) [31, 32, 37-45], обзор [46] (в отличие от поверхностного эффекта Ребиндера, рассматриваемые элементы связаны с наличием водорода в объеме металла). Несмотря на достаточно большое число экспериментальных данных по снижению трещиностойкости, прямой перенос результатов испытаний лабораторных образцов на расчеты конструкций не всегда удается [31]. Причиной этого может быть то, что различные условия роста трещин - например, различная объемность напряженного состояния (соотношение между средним напряжением и 1-м главным напряжением) для лабораторных компактных образцов с одной высоконагруженной трещиной и реальных конструкций с мелкими приповерхностными трещинами - приводят к различному растворению водорода. Рассматривая влияние водорода на механические свойства металлов, отметим еще, что изменение упругих характеристик под действием водорода измеряется единицами процентов [47] и им, по-видимому, можно пренебречь. Кроме того, диффузия водорода может приводить к некоторому увеличению коэффициента демпфирования (внутреннего трения) в материале за счет так называемого «эффекта Горского» - возникновения поперечных потоков диффузии при наличии градиентов напряжений [48, 49].

Одним из существенных последствий растворения водорода в материале является водород-

ная дилатация - изменение объема. Экспериментальные данные по изучению дилатации для ниобия приведены в упоминавшейся выше работе [31], для алюминия - [48], палладиевых сплавов - [49]. Дилатация может, в частности, приводить к уменьшению напряжений перед вершиной трещины [31, 38].

Попытки расчетного описания напряженно-деформированного влияния напряжений, создаваемых внешними механическими воздействиями, на скорость диффузии, делаются в настоящее время путем использования уравнений теории упругости, дополняемых уравнениями дилатации, и решения связанной задачи. С помощью такого подхода в работе [50] аналитически решена (в общей безразмерной постановке) задача об установившемся состоянии диффузии через плоскую пластину. Для диффузии водорода в цирконии аналогичная задача (установившееся состояние толстостенной трубы, нагруженной перепадом температур по толщине стенки) решалась в [51, 52]. Запись системы уравнений теории упругости с учетом диффузии, дилатации и их взаимного влияния приведена в [53].

Несмотря на значительное число работ в данной области, задача неупругого деформирования конструкций под действием дилатационных напряжений, и связанной с таким деформированием возможностью малоциклового разрушения конструкций, исследована совершенно недостаточно. Выполненные ранее работы ограничивались рассмотрением упругого действия дилатационных напряжений, в то время как экспериментально определенные параметры дилатации достаточно велики для развития пластического течения, особенно на переходных режимах работы конструкции - при меняющейся концентрации растворенного водорода. С другой стороны, упругое дилатационное деформирование, как правило, практически не влияет на прочность и долговечность конструкций.

Возникающая в процессе диффузии неравномерная дилатация исходного вещества создает напряжения, которые в свою очередь влияют на коэффициент диффузии и растворимость водорода в материале. Решение такой связанной задачи является более сложным, чем традиционное решение в предположении, что напряжения на диффузию не влияют. Для оценки количественного уровня эффектов, возникающих в связанной задаче, рассмотрим в качестве методического примера диффузию водорода сквозь стенку трубки, изготовленной из палладия. Выбор такого примера обусловлен тем, что фильтрация через палладиевые мембраны, конструктивно изготавливаемые либо в виде трубок-капилляров, либо в виде плоских мембран-«конвертов», применяется на практике для производства особо чистого водорода [54], в связи с чем для палладиевых сплавов имеются достаточно надежные экспериментальные данные по коэффициенту диффузии и величине дилатации [55-57].

Уравнение диффузии

$$\frac{\partial}{\partial t} c(\mathbf{r}, t) = (\nabla, D \nabla c(\mathbf{r}, t)), \quad (1)$$

или в одномерном случае (плоская пластина или тонкостенная трубка)

$$\frac{\partial}{\partial t} c(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial}{\partial x} c(x, t), \quad (2)$$

где  $c$  - концентрация,  $t$  - время,  $\mathbf{r}$  и  $x$  - пространственные координаты,  $D$  - коэффициент диффузии, должно быть дополнено уравнениями теории упругости (пластичности) и уравнением связи вида  $D = D(\sigma)$ . Для этого последнего уравнения в литературе предложено несколько форм, например [50]

$$D_{eff} = D_0 \left( 1 - \frac{c \Omega}{RT} \frac{\partial \sigma}{\partial c} \right), \quad (3)$$

здесь  $D_0$  - коэффициент диффузии в ненапряженном теле,  $\Omega$  - изменение объема материала при растворении 1 моля вещества. При не слишком больших градиентах это уравнение может быть линеаризовано, что подтверждается экспериментальными данными [25] и упрощает процедуру расчетов. Отметим еще, что при решении нестационарной задачи коэффициент  $D$ , фигурирующий в уравнениях (1)-(3), включает в себя и растворимость, которая в свою очередь зависит от напряжений; соответствующие данные для титана приведены в работе [29]. Однако при решении дифференциальных уравнений (1) или (2) разделение коэффициента  $D$  на отдельные величины (как это делается для аналогичного по форме уравнения теплопроводности - с выделением теплоемкости и теплопроводности) не обязательно, если есть возможность использовать прямые экспериментальные данные по определению величины этого коэффициента.

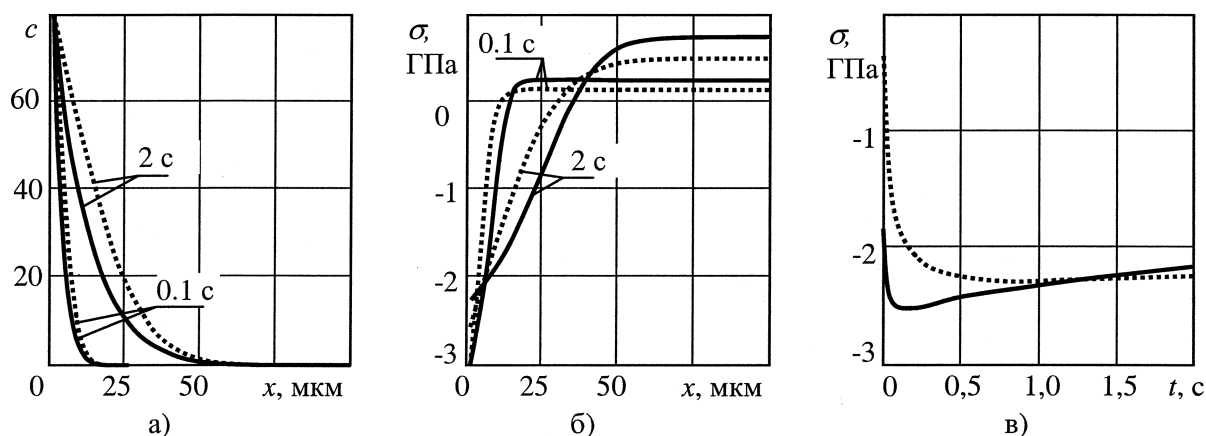
Расчет диффузии проводился для трубки диаметром 0,8 мм с толщиной стенки 0,1 мм. Трубка полагалась длинной - градиент концентрации по длине и краевые эффекты для напряжений отсутствуют. Традиционно влияние водорода на палладий выражается главным образом в появлении расширения, линейно зависящего от концентрации водорода [56]; при максимальной концентрации водорода (800 объемов водорода на 1 объем палладия при комнатной температуре) это расширение достигает 15 %. Влияние водорода на механические характеристики (в частности, модуль упругости - [57]) незначительно - 5...7 % - и им в данных расчетах пренебрегалось. Равновесная растворимость водорода в палладии, по данным работы [58] описывается уравнением

$$\lg(H_{Pd}) = \frac{1}{2} \lg P_{H_2} (\text{Па}) - 2,12 + \frac{535}{T(K)}, \quad (4)$$

в условиях, характерных для работы установок очистки водорода, эта концентрация и соответствующее ей расширение примерно на порядок меньше максимального: концентрация около 80 объемов водорода на 1 объем палладия и расширение до 1,5 %.

Коэффициент диффузии, в соответствии с [55, 56, 59], принимался равным  $10^{-10}$ , а его изменение в зависимости от напряжений - 10 % при достижении напряжениями предела текучести (заметим, что для палладия прямые измерения влияния напряжений на коэффициент диффузии отсутствуют, а для стали в работе [25] экспериментально получено снижение коэффициента диффузии на 15...20 % при приложении растягивающих напряжений, составляющих 0,8 от предела текучести, поэтому выбранный уровень - 10 % - не представляется завышенным). Предел текучести палладиевых сплавов, применяемых в трубчато-капиллярных теплообменниках, составляет в среднем 490 МПа (в последние годы разработаны методы легирования и термообработки, повышающие предел текучести до 1000 МПа, предел прочности - до 1350 МПа с одновременным снижением пластичности до 10 и даже 3 % [60, 61]). Расчет напряжений проводился в линейно-упругой постановке. В качестве граничных условий для концентрации рассматривалась внезапная подача водорода на одну из стенок, от второй стенки водород отводится и его концентрация около этой стенки близка к 0 (второе граничное условие в данной задаче не является важным - максимальные градиенты концентраций и, соответственно, максимальные напряжения возникают раньше, чем концентрация водорода у второй стенки достигнет заметного уровня).

Дифференциальное уравнение (2) решалось численно с использованием разностной схемы Кранка-Николсона [62], обеспечивающей, по сравнению с прямым интегрированием, лучшую сходимость и отсутствие осцилляции. Результаты расчетов показаны на рис. 1. Сплошными линиями изображены решения связанной задачи, а пунктирными линиями - решения, полученные без учета влияния напряжений на диффузию.



**Рис. 1. Результаты расчета тонкостенной трубки: а – распределение концентрации по толщине стенки в различные моменты времени; б – распределение упругих напряжений; в – изменение напряжений в приповерхностном слое со временем**

Водород, начинающий диффундировать внутрь стенки, вызывает дилатацию - увеличение объема материала, что создает в приповерхностном слое сжимающие напряжения. Связанное с этим снижение скорости диффузии (рис. 1,а) ведет к уменьшению концентрации водорода и замедлению его проникновения в стенку по сравнению с решением, полученным без учета влияния

напряжений на диффузию. Однако градиент концентрации при этом оказывается выше, что приводит к повышению напряжений (рис. 1,в).

Заметим, что расчеты проводились в упругой постановке, но получившиеся напряжения значительно превышают предел текучести (даже современных высокопрочных палладиевых сплавов). Циклические изменения концентрации водорода при включении и выключении установок будут сопровождаться неизбежным пластическим деформированием, а малый наклон диаграммы деформирования в пластической области - приводит к тому, что относительно небольшие отличия в рассчитанных упругих напряжениях (около 10 % - см. рис. 1,в) приведут к заметным отличиям в ширине петли пластического гистерезиса и, тем более, в циклической долговечности (связанной с шириной петли квадратичной зависимостью). Таким образом, учет связанного характера задачи может существенно повлиять на результаты оценки надежности и долговечности, включение такой связанности в расчетную процедуру представляется важным.

Анализ процессов малоциклового деформирования реальной конструкции, обусловленных водородной дилатацией, выполнялся на примере упомянутого выше капилляра трубчато-капиллярной установки производства особо чистого водорода. Капилляр герметизируется расплавлением его свободного конца с образованием капли (рис. 2). Расчеты выполнялись в предположении полной осевой симметрии; длина моделируемой части капилляра выбиралась достаточной для затухания краевых эффектов. В качестве граничных условий рассматривалась «мгновенная» (по сравнению с характерными временами диффузии) подача водородсодержащей среды к наружной стенке капилляра; температура среды 200 °С; давление (по водороду) 0,6 МПа; давление водорода во внутренней полости в установившемся режиме 0,1 МПа. Для решения дифференциального уравнения диффузии использовался модуль тепловых расчетов пакета программ ANSYS. Результаты расчета диффузии водорода показаны на рис. 3 в виде линий уровня концентрации.

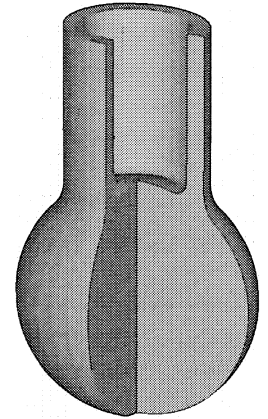


Рис. 2. Моделируемая конструкция

Наличие капилляра с относительно тонкими стенками и массивной «капли» приводит к неравномерному проникновению водорода и связанному с этим неравномерному расширению (дилатации) материала конструкции: увеличение радиальных перемещений точек «капли» отстает по времени от увеличения радиальных перемещений точек капилляра. Возникающие вследствие этой неравномерности напряжения меняются со временем (рис. 4) и достигают максимума через примерно 100 с от начала воздействия.

Размахи напряжений за цикл включения-выключения установки (даже если предположить, что при выключении давления и концентрации меняются медленно и не приводят к значительным напряжениям) достаточно велики (рис. 5). Изменение компонент тензора напряжений не слишком далеко от пропорционального, поэтому для оценки условий начала знакопеременного течения может быть использовано сравнение размахов напряжений с удвоенным пределом текучести.

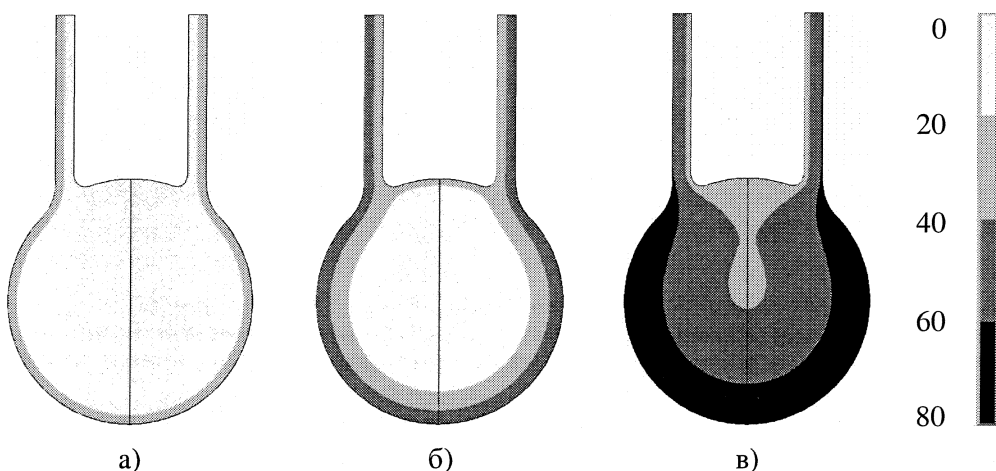


Рис. 3. Результаты расчета концентрации водорода в различные моменты времени: а – 20 с; б – 100 с; в – 500 с

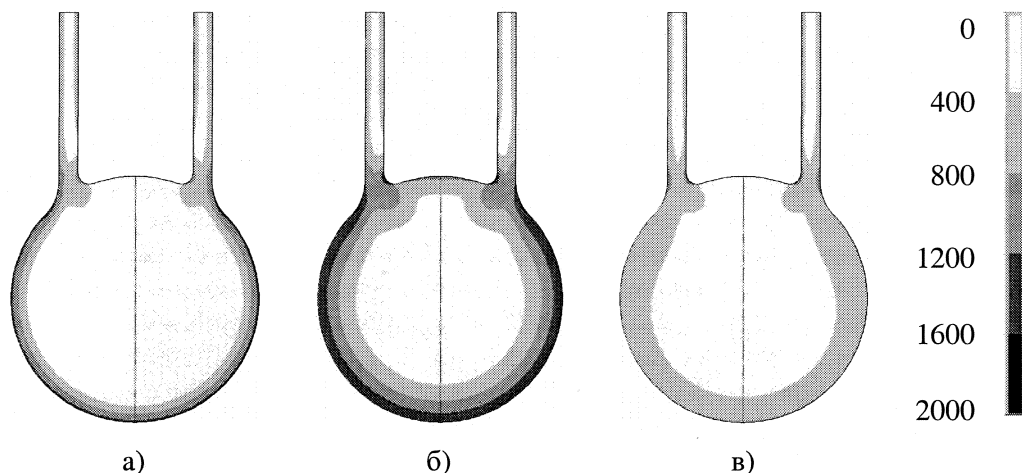


Рис. 4. Эквивалентные (по Мизесу) дилатационные напряжения, МПа:  
а – 20 с; б – 100 с; в – 500 с

Значительное превышение напряжениями величины  $2\sigma_{0,2}$  (а в данной задаче размах напряжений превышает  $2\sigma_{0,2}$ ) свидетельствует о неизбежном появлении знакопеременного течения и возможности возникновения малоциклового усталости (к сожалению, усталостные характеристики используемых палладиевых сплавов изучены недостаточно и оценить число циклов до возникновения трещины не представляется возможным). Наиболее вероятным местом зарождения усталостной трещины является точка *A* (см. рис. 5) на внутренней поверхности капилляра; развитие этой трещины может привести к нарушению герметичности и снижению чистоты получаемого водорода за счет подмешивания исходного газа к очищенному, что и наблюдается при работе таких установок.

Отметим еще, что напряжения, связанные с давлением и неравномерным нагревом, в данной задаче в десятки раз меньше дилатационных (водородных) напряжений и не могут оказать заметного влияния на зарождение и развитие трещин, лимитирующих качественную работу установки. Несмотря на ограниченность расчета, связанную с недостаточностью характеристик материала, очевидными являются вытекающие из него пути повышения долговечности: исключение пайки (т.е. придание капилляру U-образной формы), устраняющее основную причину появления больших дилатационных напряжений, и уменьшение числа циклов (пусков - остановок).

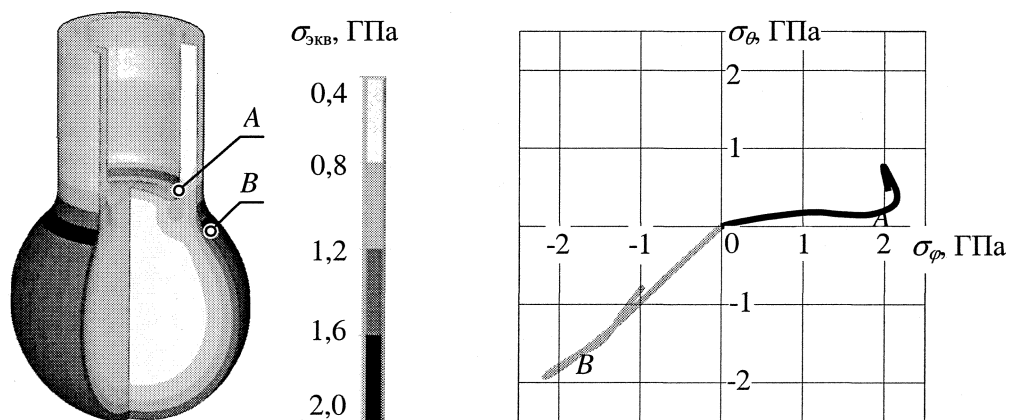


Рис. 5. Распределение размахов напряжений за цикл по объему конструкции и годографы напряжений в наиболее нагруженных точках

Очевидная необходимость получения данных о деформационных и прочностных характеристиках материалов при малоциклового нагружениях в активных средах привела к созданию в ЮУрГУ двух испытательных стендов на базе созданных ранее и хорошо себя зарекомендовавших установок [63, 64] для программных кратковременных и длительных испытаний на малоциклового кручение и растяжение - сжатие при нормальных и повышенных температурах. Общие схемы этих установок показаны на рис. 6 и 7.

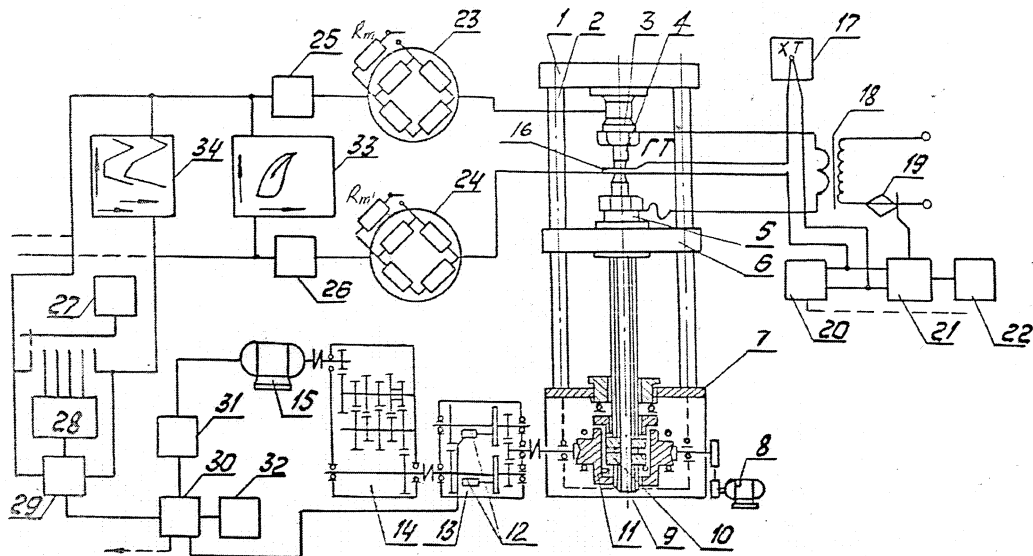


Рис. 6. Установка для испытаний на циклическое кручение: 1 – образец; 2 – редуктор; 3 – редуктор с электрическими муфтами для обеспечения реверса; 4 – электродвигатель; 5 – деформометр; 6, 7 – тензорезисторы; 8 – опора с осевой подвижностью; 9–14 – система управления нагружением и регистрации

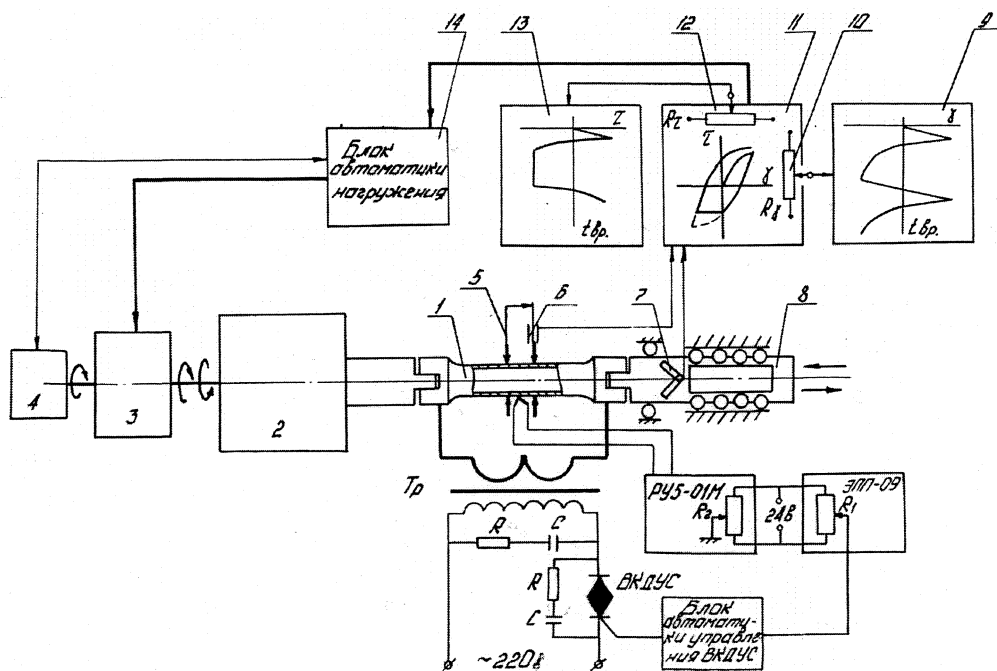


Рис. 7. Установка для испытаний на циклическое растяжение-сжатие: 1 – верхняя траверса; 2 – колонна; 3 – верхний (неподвижный) захват; 4 – образец; 5 – нижний захват; 6 – нижняя траверса; 7 – станина; 8 – двигатель быстрого перемещения траверсы; 9 – ходовой винт; 10 – гайка; 11 – червячная передача; 12 – электрические муфты; 13 – реверсор; 14 – редуктор; 15 – электродвигатель; 16 – термопара (спай на образце); 17 – термопара (холодный спай); 18 – трансформатор; 19 – тиристорный блок; 20, 21, 22 – блоки управления; 23 – тензомост динамометра; 24 – тензомост деформометра; 25, 26 – усилители; 27–32 – блоки автоматики и управления двигателем; 33, 34 – самописцы, выход на компьютерную регистрацию

В установке для испытаний на циклическое кручение испытываются стандартные трубчатые тонкостенные образцы, герметизированная внутренняя полость которых заполняется газом заданного состава. Наружная поверхность образца контактирует с воздухом, поэтому концентрации газа, растворенного в металле, является переменной по толщине. Нагрев рабочей части образца с температурами от 20 до 900 °С может осуществляться пропусканием тока.



На второй установке, изготовленной на базе модифицированной (тиристорный привод) испытательной машины УМЭ-10Т, реализуется малоцикловое растяжение - сжатие образца в камере, заполненной газом. Могут испытываться стандартные плоские и круглые (корсетные) образцы. Спроектированы (но пока не изготовлены) две системы нагрева образца: пропусканием тока и размещенным в камере спиральным нагревателем.

Для обеспечения безопасности испытаний объем газа в образце (при кручении) и камере (при растяжении - сжатии) ограничен с помощью специальных вытеснителей. Давление газа в рабочих полостях - до 15 МПа.

Управление процессом нагружения в обеих установках автоматическое, программное - по деформациям или напряжениям, времени и температуре, давлению и составу газа. Установки позволяют реализовать циклы заданного типа (жесткий, мягкий) с выдержками при заданных условиях (напряжении, деформации, длительности).

Система подачи газа на каждой установке включает источник (стандартный баллон или - для особо чистого водорода - металлгидридный аккумулятор производства филиала НИКИЭТ на Белоярской АЭС) и системы редуцирования и контроля.

На данном этапе работ проведены испытания на малоцикловое знакопеременное кручение (симметричный жесткий цикл) циркониевого и титанового сплавов Э-125 и ВТ-14 при нормальной температуре в среде водорода с чистотой 99,999 объемных процентов. Программа нагружения включала заполнение образца водородом при давлении 5 МПа, выдержку в течение двух часов, снижение давления водорода до 0,5 МПа и циклическое нагружение при постоянном давлении и заданном размахе полной деформации. Испытания проводились при разных размахах деформаций - от 0,2 до 3 %. Записывались диаграммы деформирования и определялось число циклов до образования трещины длиной 0,5-1 мм, вызывающей заметную разгерметизацию образца. Для сравнения испытания по той же программе проводились в среде аргона. Кроме того, записывалась диаграмма деформирования при однократном нагружении. Для уменьшения разбросов результатов образцы изготавливались из одной заготовки.

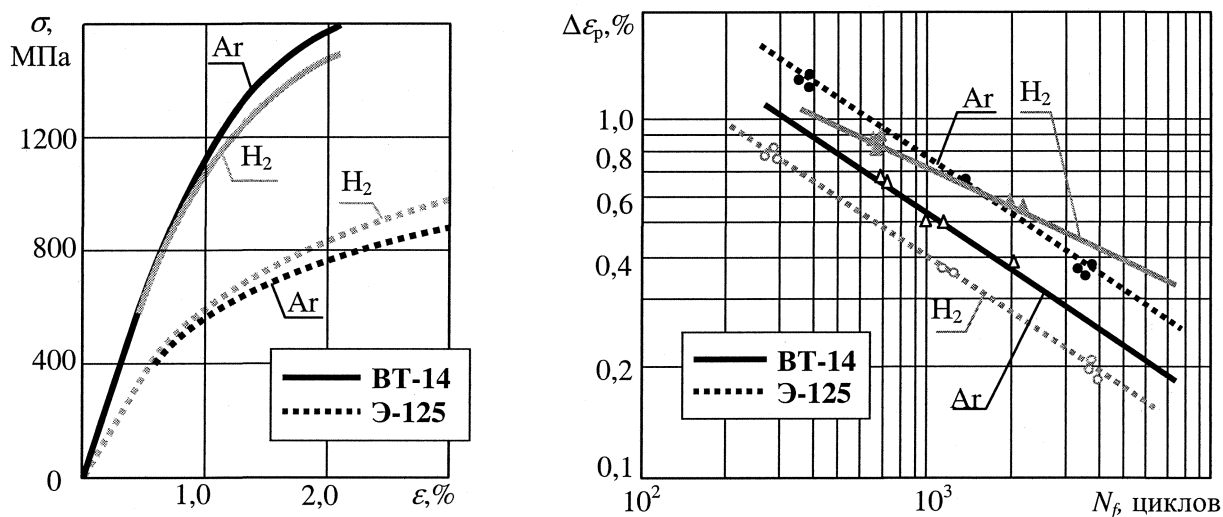


Рис. 8. Диаграммы деформирования и кривые малоциклового усталости двух сплавов в нейтральной среде и водороде

При однократном нагружении диаграммы деформирования каждого сплава в водороде и аргоне практически не отличались. При циклических нагружениях диаграммы стабилизировались после нескольких десятков первых циклов и оставались стабильными до 70-85 % долговечности образца. Стабилизированные кривые циклического деформирования соответствовали гипотезе единой кривой; они показаны на рис. 8, где сплошные линии соответствуют сплаву Э-125, штриховые - ВТ-14. Стабилизация деформационных свойств циркониевого сплава Э-125 сопровождалась циклическим упрочнением, а сплава ВТ-14 - разупрочнением. Влияние водорода на диаграммы деформирования (см. рис. 8), оказалось качественно различным; количественные изменения для рассмотренных условий нагружения доходили до 12 %.

Существенно различным оказалось влияние водорода на число циклов до образования трещины (см. рис. 8): у сплава Э-125 наблюдалось снижение долговечности, а у титанового сплава ВТ-14 ее повышение до 2-2,5 раз. Очевидно, что при изменении программы и температуры нагружения влияние водорода на деформационные и прочностные характеристики может стать значительно более сильным.

#### Литература

1. Chapelle, D. *Optimal design of a Type 3 hydrogen vessel: Part I - Analytic modelling of the cylindrical section* / D. Chapelle, D. Perreux // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2006. - №31.-P. 627-638.
2. *Scaling up effects of Mg hydride in a temperature and pressure-controlled hydrogen storage device* / M. Verga, F. Armanasco, C. Guardamagna et al. // *International journal of hydrogen energy*. - 2009. - № 34. - P. 4602-4610.
3. *Возможность промышленного внедрения РУ с ВТГР для промышленного производства водорода* / В.И. Костин, Н.Г. Кодочигов, А.В. Васяев и др. // *Тяжелое машиностроение*. — 2007. - № 3. - С. 9-14.
4. Inaba, Y. *Analytical study on fire and explosion accidents assumed in HTGR hydrogen production system*/Y. Inaba, T. Nishinara, Y. Nitta//*Nuclear technology*. - 2004. - V. 146, № 1.-P. 49-57.
5. *Водород в металлах: пер. с англ. В 2 т. - М.: Наука, 1981. - Т. 1: Основные свойства. - 475 с; Т. 2: Прикладные аспекты. - 437 с.*
6. Черепанов, Г.П. *Механика хрупкого разрушения* / Г.П. Черепанов. - М.: Наука, 1974. - 640 с.
7. Колачев, Б.А. *Водородная хрупкость металлов* / Б.А. Колачев. - М.: Металлургия, 1985. - 216 с.
8. Фот, А.П. *Разработка комплекса экспериментального оборудования и методик коррозионно-механических испытаний: дис.... д-ра техн. наук/А.П. Фот. - Курган, 1998. -447 с.*
9. Gokhfeld, D.A. *Limit analysis of structures at thermal cycling* / D.A. Gokhfeld, O.F. Cherniavsky. - Netherlands, Alphen aan den Rijn, USA, Rockville, Maryland: Sijthoff and Noordhoff Int. - Publ, 1980. - 537p.
10. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 524 с.*
11. Баранов, А.А. *Фазовые превращения и термоциклирование металлов* / А.А. Баранов. - Киев: Изд-во «Наукова думка», 1974. - 232 с.
12. Clouet, E. *The vacancy-edge dislocation interaction in fee metals: A comparison between atomic simulations and elasticity theory* / E. Clouet // *Acta Materialia*. - 2006. - № 54. - P. 3543-3552.
13. Itsumi, Y. *Electronic bonding characteristics of hydrogen in bcc iron. Part I: Interstitials* / Yoshio Itsumi // *Journal of materials research*. - 1996. - V. 11, № 9. -P. 2206-2213.
14. Domain, C. *Atomic-scale Ab-initio study of the Zr-H system: Bulk properties* / C. Domain, R. Besson, A. Legris//*Acta Materialia*. - 2002. - №50.- P. 3513-3526.
15. Gavriljuk, V.G. *Change in the electron structure caused by C, N and H atoms in iron and its influence on their interaction with dislocations* / V.G. Gavriljuk, V.N. Shivanyuk, B.D. Shanina // *Acta Materialia*. - 2005. - № 53. - P. 5017-5024.
16. Vlasov, N.M. *Structural and impurity traps for hydrogen atoms* / N.M. Vlasov, I.I. Fedik // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2006. - М 31. - P. 265-267.
17. Taketomi, S. *Atomistic study of hydrogen distribution and diffusion around a {112}<111> edge dislocation in alpha iron* / Shinya Taketomi, Ryosuke Matsumoto, Noriyuki Miyazaki // *Acta Materialia*. - 2008. - № 56. - P. 3761-3769.
18. *Influence of shear strain on the hydrogen trapped in bcc-Fe: A first-principles-based study* / Ryosuke Matsumoto, Yoshinori Inoue, Shinya Taketomi and Noriyuki Miyazaki // *Scripta Materialia*. - 2009. - М 60. - P. 555-558.
19. Johnson, W.C. *Thermodynamics of stress-induced interstitial redistribution in body-centered cubic metals* / W. C. Johnson, J. Y. Huh // *Metallurgical and Materials Transactions A*. — 2003. - V. 34, №12. -P. 2819-2825.
20. Chateau, J. P. *Numerical simulations of hydrogen-dislocation interactions in fee stainless steels. Part I: hydrogen-dislocation interactions in bulk crystals* / J.P. Chateau, D. Delafosse, T Magnin // *Acta Materialia*. - 2002. - № 50. - P. 1507-1522.

21. Кинетика тепловых и диффузионных процессов при растворении газов  $N_2$ ,  $H_2$  в дисперсном титане / Т.П. Садлий, Л.Г. Милова, Т.А. Баранова и др. // Физика аэродисперсных систем: межведомств, науч. сб. /Одесса: Одесский национальный ун-т, 2004. -№41. - С. 124-129.
22. *Micro structures and hydrogen permeability of directionally solidified Nb-Ni-Ti alloys with the Nb-NiTi eutectic microstructure* / Kyosuke Kishida, Yuji Yamaguchi, Katsushi Tanaka et al // *Intermetallics*. - 2008. -№ 16. - P. 88-95.
23. *Studying permeation of hydrogen (H and D) through Palladium membrane dynamically with ERDA method* / S. Markelj, P. Pelicon, J. Simcic et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. - 2007. -№ 261. - P. 498-503.
24. *The permeability of hydrogen in bulk palladium at elevated temperatures and pressures* / B.D. Morreale, M.V. Ciocco, R.M. Enick et al. // *Journal of Membrane Science*. - 2003. — № 212. - P. 87-97.
25. Баранов, В.П. Определение эффективных коэффициентов диффузии водорода в деформированных высокопрочных сталях / В.П. Баранов // *Современные проблемы науки и образования*. - 2007. -№2.- С. 23-26.
26. Определение коэффициента диффузии водорода в поковках из легированных сталей / Е.А. Фоминых, О.К. Токовой, Н.И. Воробьев и др. // *Известия Челябинского научного центра*. - 2007. -Вып. 4 (38). - С 29-34.
27. *Influence of residual stresses and strains generated by cold drawing on hydrogen embrittlement of prestressing steels* / J. Toribio, V. Kharin, D. Vergara et al. // *Corrosion Science*. - 2007. -№ 49. - P. 3557-3569.
28. *Toribio, J. Effect of residual stress-strain profiles on hydrogen-induced fracture of prestressing steel wires* / J. Toribio, V. Kharin // *Materials Science*. -2006. - V. 42, №2. -P. 263-271.
29. *Waisman, J.L. Diffusion of hydrogen in titanium alloys due to composition, temperature, and stress gradients* / J.L. Waisman, G. Sines, L.B. Robinson // *Metallurgical transactions*. - 1973. - V. 4, Мl.-P. 291-302.
30. *Zhang, T.-Y. The equilibrium concentration of hydrogen atoms ahead of a mixed mode I-Mode III crack tip in single crystal iron* / T.-Y. Zhang, T.E. Hack // *Metallurgical and Materials Transactions A*. - 1999. - V. 30, № 1. - P. 155-159.
31. *Liang, Y. Interaction of hydrogen with crack-tip plasticity: effects of constraint on void growth* / Y. Liang, P. Sofronis, R.H. Dodds Jr. // *Materials Science and Engineering*. - 2004. —A 366. - P. 397-411.
32. *Effect of hydrogen trapping on void growth and coalescence in metals and alloys* / Y. Liang, D.C. Ahn, P. Sofronis et al. // *Mechanics of Materials*. - 2008. -№ 40. - P. 115-132.
33. Влияние водорода на пластичность и сопротивление деформации технического титана ВТ10 при температурах до 750 °С / Ю.А. Аксенов, И.О. Башкин, В.Л. Колмогоров и др. // *Физика металлов и металловедение*. - 1989. - Вып. 5. — Т. 67. - С. 993-999.
34. *Effect of hydrogen on mechanical properties of  $\beta$ -titanium alloys* / H.-J. Christ, A. Senemmar, M. Decker, K. Prusner // *Sadhana*. - 2003. - V. 28, № 3-4. - P. 453-465.
35. *Cyclic plastic deformation behaviour of Ni single crystals oriented for single slip as a function of hydrogen content* / T. Magnin, C Bosch, K. Wolski, D. Delafosse // *Materials Science and Engineering*. - 2001.-A 314.-P. 7-11.
36. *Elkebir, O.A. Comparison of hydrogen embrittlement of stainless steels and nickel-base alloys* / O.A. Elkebir, A. Szummer // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2002. —М 27. - P. 793-800.
37. *Cohesive zone modeling of hydrogen-induced stress cracking in 25 % Cr duplex stainless steel* / V. Olden, C. Thaulow, R. Johnsen, E. Ostby // *Scripta Materialia*. -2007. -№57.-P. 615-618.
38. Карпинский, Д.Н. Расчет коэффициента интенсивности напряжения в наводороженном пластичном кристалле с трещиной / Д.Н. Карпинский, С.В. Санников // *Письма в ЖТФ*. - 2003. - Вып. 20. - Т. 29. - С 16-20.
39. *Ahn, D.C. Modeling of hydrogen-assisted ductile crack propagation in metals and alloys* / D.C. Ahn, P. Sofronis, R. Dodds Jr. // *International Journal of Fracture*. - 2007. - V. 145, №2. - P. 135-157.
40. *Taha, A. A micromechanics approach to the study of hydrogen transport and embrittlement* / A. Taha, P. Sofronis // *Engineering Fracture Mechanics*. -2001. -№ 68. -P. 803-837.
41. *Delafosse, D. Hydrogen induced plasticity in stress corrosion cracking of engineering systems* / D. Delafosse, T. Magnin // *Engineering Fracture Mechanics*. -2001. -№ 68. -P. 693-729.

42. *Application of hydrogen influenced cohesive laws in the prediction of hydrogen induced stress cracking in 25 % Cr duplex stainless steel / V. Olden, C. Thaulow, R. Johnsen et al. // Engineering Fracture Mechanics. - 2008. - № 75. - P. 2333-2351.*

43. *Effects of alloy composition and strain hardening on tensile fracture of hydrogen-precharged type 316 stainless steels / C San Marchi, B.P. Somerday, X. Tang, G.H. Schiroky // International Journal of Hydrogen Energy. - 2008. - №33. - P. 889-904.*

44. *On hydrogen-induced plastic flow localization during void growth and coalescence / O. C Ahn, P. Sofronis, R.H. Dodds Jr. // International Journal of Hydrogen Energy. — 2007. - №32. - P. 3734-3742.*

45. Спивак, Л.В. Синергетические эффекты микропластичности в системе «никель - водород» / Л.В. Спивак, Л.Н. Малинина // Альтернативная энергетика и экология. - 2007. - №3(47). - С 84-87.

46. *Olden, V. Modelling of hydrogen diffusion and hydrogen induced cracking in supermartensitic and duplex stainless steels / V. Olden, C Thaulow, R. Johnsen // Materials and Design. - 2008. - №29. — P. 1934-1948.*

47. Спивак, Л.В. Влияние водорода на модуль сдвига поликристаллического алюминия / Л.В. Спивак, Л.А. Лунарска // Письма в ЖТФ. - 2006. - Вып. 2. — Т. 32. - С. 15-20.

48. *Sinning, H.-R. The inter crystalline Gorsky effect / H.-R. Sinning // Materials Science and Engineering. - 2004. - A 370. - P. 109-113.*

49. *Vengallatore, S. Gorsky damping in nanomechanical structures / S. Vengallatore // Scripta Materialia. - 2005. - № 52. - P. 1265-1268.*

50. *Yang, F. Interaction between diffusion and chemical stresses / F. Yang // Materials Science and Engineering. - 2005. - A 409. - P. 153-159.*

51. Власов, Н.М. Термодиффузия водорода в цирконии с учетом термонапряжений / Н.М. Власов, В.А. Зазноба // Журнал технической физики. - 2009. - Вып. 5. - Т. 79. - С 49-53.

52. *Vlasov, N.M. Hydrogen permeability of metals at presence of internal stresses transport / N.M. Vlasov, LI. Fedik // NATO Science for Peace and Security, Series C: Environmental Security, Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems / eds. B. Baranowski. - Netherlands: Springer, 2008. - P. 587-594.*

53. *Paukshto, M. V. Diffusion-induced stresses in solids / M. V. Paukshto // International Journal of Fracture. - 1999. - V. 97, № 1-4. - P. 227-236.*

54. Результаты прикладных исследований в области водородной мембранной технологии / М.Н. Сивков, КН. Саханская, Д.И. Словецки и др. // Цветные металлы. - 2007. - № 1. - С. 36-38.

55. Новый сплав В-2 на основе палладия для диффузионных фильтров водорода / В.А. Гольцов, НИ. Тимофеев, Г.Е. Каган и др. // Известия вузов. - 1977. - №4. - С. 117-120.

56. Гапонцев, А.В. Диффузия водорода в неупорядоченных металлах и сплавах / А.В. Гапонцев, В.В. Кондратьев // Успехи физических наук. - 2003. - Т. 173, № 10. - С. 1107-1129.

57. Товбин, Ю.К. Оценка влияния растворенного водорода на механические свойства палладия / Ю.К. Товбин, Е.В. Вотяков // ФТТ. - 2000. - Вып. 7. - Т. 42. - С 1158-1160.

58. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин, Е.Л. Бибииков. - М.: Металлургия, 1986. - С. 332-333.

59. Спивак, Л.В. Синергетические эффекты микропластичности в системе «никель - водород» / Л.В. Спивак, Л.Н. Малинина // Альтернативная энергетика и экология. - 2007. - № 3(47). - С. 84-87.

60. Волков, А.Ю. Влияние пластической деформации на кинетику фазовых превращений в сплаве Си-47Pd / А.Ю. Волков, НА. Кругликов // Физика металлов и металловедение. - 2008. — Т. 105. - С. 215-224.

61. Волков, А.Ю. Получение высоких физико-механических свойств в упорядоченном по типу В2 сплаве палладий-медь / А.Ю. Волков, Е.Г. Волкова // Материаловедение. - 2006. - Вып. 6. - С. 25-30.

62. Холл, Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Дж. Холл, Дж. Уайт. - М.: Мир, 1979. - 312 с.

63. Горский, СВ. Определение характеристик сопротивления длительному малоцикловоому разрушению: базовый эксперимент и испытательное оборудование / СВ. Горский, КМ. Кононов, В.Б. Порошин // Экспериментальные методы в механике твердого деформируемого тела: тез. докл. Всесоюзной научн.-техн. конф. - Калининград, 1987. - С. 46-47.

64. Мартыненко, Н.Е. Испытательная установка для исследования термической усталости конструкционного графита / Н.Е. Мартыненко, С.В. Горский // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузениях: темат. сб. науч. трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1989.

*Поступила в редакцию 11 января 2010 г.*

**Ребяков Юрий Николаевич.** Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин. Область научных интересов - экспериментальные исследования свойств материалов.

**Yuri N. Rebyakov.** Candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor of applied mechanics, dynamics and strength machines. The area of scientific interests - experimental studies of material properties.

**Чернявский Олег Федорович.** Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, профессор кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - термомеханика и термопрочность конструкций.

**Oleg F. Cherniavsky.** Doctor of technical sciences, professor, Honoured Scientist and Engineer of Russian Federation, professor of applied mechanics, dynamics and durability of machines department of the South-Ural State University. Interests - thermomechanics and termo-strength of structures.

**Чернявский Александр Олегович.** Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, динамики и прочности машин Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - расчетный анализ деформирования и разрушения теплонапряженных конструкций.

**Alexander O. Cherniavsky.** Doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of Applied Mechanics, dynamics and durability of machines of the South Ural State University. Research Interests - numerical analysis of deformation and fracture of heat-stressed structures.