

УДК 539.2:546.11

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДА ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДВУХ- И ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛОСКИХ ПЛАСТИН, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Поливанов А.А., Белов А.В., Неумоина Н.Г.

*Камышинский технологический институт (филиал) Государственного образовательного учреждения «Волгоградский государственный технический университет»,*

*Камышин, e-mail: polivanov@kti.ru*

В представленной статье излагается методика решения комплексной задачи по оценке прочности, жесткости и долговечности различных типов многослойных оболочек вращения с учетом процессов необратимых деформаций, высокотемпературной ползучести, водородной коррозии и ухудшения свойств материалов во времени. Получены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния двух- и трехслойных плоских пластин с центральным отверстием. В трехслойной пластине верхний и нижний слои выполнены из хром-никелевого сплава, один из которых расположен со стороны водородосодержащей среды, средний слой – из малоуглеродистой стали, в двухслойной – нижний слой выполнен из малоуглеродистой стали, верхний – из хром-никелевого сплава. Пластина находилась под давлением водорода при температуре 500 °С с верхней стороны. Вычислены основные компоненты напряженно-деформированного состояния пластин, время до начала их разрушения, а также ряд других важных параметров. В ходе исследований было установлено, что трехслойная пластина при идентичных внешних условиях обладает большей долговечностью, чем двухслойная, толщина защитного слоя в которой равна суммарной толщине обоих защитных слоев трехслойной.

**Ключевые слова:** высокотемпературная водородная коррозия, многослойные стальные пластины, высокотемпературная ползучесть, пластичность, разрушение

## THE EFFECTS OF HYDROGEN'S HIGH PARAMETERS ON THE LONG-TERM STRENGTH OF THE TWO- AND THREE-LAYER FLAT LAMINAS WORKING UNDER CONDITIONS OF TEMPERATURE CREEP

Polivanov A.A., Belov A.V., Neumoina N.G.

*Kamyshin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University,*

*Kamyshin, e-mail: polivanov@kti.ru*

In the article describes the methods of complex problem solution of evaluating strength, stiffness and durability of different types of multilayer shells of rotation with an account of the irreversible deformations processes, high-temperature creep, hydrogen corrosion and deterioration of material properties over time. The results of calculations of the two- and three-layer flat laminas stress-strain state with a central hole are obtained. In the three-layered lamina, the upper and lower layers are made of a chromium-nickel alloy, one of which is located on the side of the hydrogen-containing environment, the middle layer is made of low – carbon steel. In the two-layer lamina – the lower layer is made of low-carbon steel, the upper layer is made of chromium-nickel alloy. The lamina was under hydrogen pressure at a temperature of 500 °C with the upper side. The main components of the stress-strain state of the laminas are calculated, as well as the time before their destruction. The main components of the stress – strain state of the lamina, the time before the onset of their destruction, as well as a number of other important parameters are calculated. In the course of the research, it was found that a three-layer lamina under identical external conditions has a greater durability than a two-layer lamina, the thickness of the protective layer in which is equal to the total thickness of both protective layers of the three-layer lamina.

**Keywords:** high-temperature hydrogen corrosion, multi-layered steel plates, high temperature creep, plasticity, fracture

В настоящей статье изложены некоторые результаты, полученные при решении комплексной задачи по оценке прочности и долговечности плоской стальной пластины с учетом необратимых деформаций, повреждаемости ее материалов при ползучести, а также водородной коррозии при высоких температурах. Для выполнения расчетов применялась методика прочностного расчета пластин и оболочек, разработанная авторами, описание которой изложено в работах [1, 2] и в ряде других публикаций.

Для учета влияния деградации структуры материалов при ползучести на процесс деформирования пластины используется традиционный подход, который заключается в использовании числового (скалярного) параметра повреждаемости, вводимого в расчетные соотношения. Вычисление этого параметра выполняется с помощью кинетического уравнения повреждаемости Ю.Н. Работнова, которое неоднократно использовалось при решении многих аналогичных задач, таких как [3–5]. Для учета влияния коррозион-

ного воздействия высокотемпературного водорода на процесс деформирования конструкции любого типа может быть использован какой-либо из подходов, подробно рассмотренных в монографии [6]. Примерами практического применения этих подходов к прочностным расчетам пластин и оболочек являются работы [7–9]. В работе [10] показан пример использования одной из известных моделей такого типа к исследованию влияния воздействия высокотемпературного водорода на поведение металлов и некоторых видов конструкций, а в работе [11] – пример применения программного комплекса ANSYS к решению аналогичных задач.

Таким образом, к настоящему времени разрушающее воздействие водорода на большинство видов малоуглеродистых сталей изучено достаточно подробно и на эту тему опубликовано большое количество исследовательских и обзорных научных работ. В них говорится, что воздействие водорода высоких параметров (давления и температуры) приводит к значительному ухудшению пластических и прочностных свойств большинства конструкционных сталей, что в конечном итоге способствует их охрупчиванию [6].

Однако в настоящее время практически нет публикаций, в которых была бы рассмотрена возможность совместного учета повреждаемости материалов, вызванных водородной коррозией и температурной ползучестью. Таким образом, главной задачей исследований, частью которых является настоящая работа, является определение условий, которые приводят к деградации механических характеристик материалов вследствие водородной коррозии, а также определение степени этой деградации.

Целью исследования является описание некоторых наиболее известных подходов, применяемых для учета влияния коррозионного воздействия высокотемпературного водорода на процесс деформирования машиностроительных конструкций, и их практическое применение для расчета реальных объектов.

Далее подробно рассмотрим эти подходы.

### Материалы и методы исследования

#### Обобщенная модель химического взаимодействия

Данная модель строится в предположении, что разрушающее воздействие водородосодержащей среды на конструкционные стали проявляется не сразу, а по прошествии некоторого отрезка времени, получившего название инкубационный период  $t_{инк}$ , продолжительность которого в общем случае зависит от давления водорода, температуры, вида напряженного состояния и некоторых других факторов. После

завершения этого периода происходит интенсивное вытеснение свободного углерода (обезуглероживание) из материала конструкции, приводящее к деградации (довольно часто существенной) его механических характеристик. Период времени, в течение которого происходит обезуглероживание материала конструкции, называется периодом активных химических превращений  $t_{кр}$ . В результате многочисленных экспериментов установлено, что деградация механических свойств материалов происходит только в течение этого периода и только до определённого предельного состояния, которое всегда является конечным и не зависит от давления водорода, температуры и вида напряженного состояния [6].

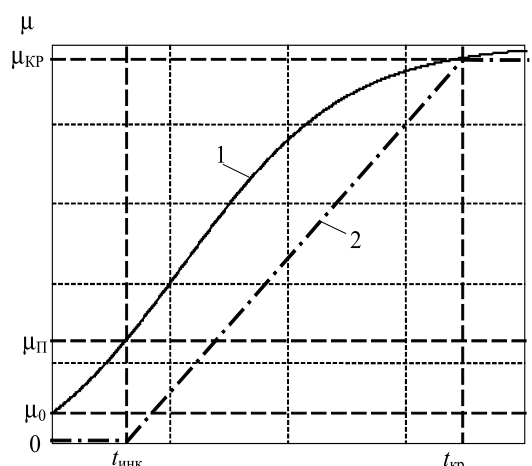


Рис. 1. Зависимость параметра химического воздействия водорода от времени

Для описания процесса воздействия высокотемпературного водорода на свойства материала применяется дифференциальное уравнение, позволяющее определить степень поражения материала водородной коррозией, для количественного описания которой вводится скалярный параметр  $\mu$ , изменяющийся от начального значения  $\mu_0 > 0$  до конечного  $\mu_{кр} < 1$ :

$$\frac{d\mu}{dt} = k \cdot \mu(1 - \mu), \quad (1)$$

где  $k(p, T, \omega_c)$  – функция, которая позволяет определить зависимость параметра  $\mu$  от температуры  $T$ , давления  $p$  и степени поврежденности  $\omega_c$  материала.

Более подробно данная модель, а также способы ее конкретизации описаны в публикации авторов [2], а также в монографии [6].

В результате решения дифференциального уравнения (1) получается логистическая функция Ферхюльста, график которой приведен на рис. 1 под номером 1. Значения  $t_{инк}$ ,  $t_{кр}$  и их связь с параметром  $\mu$  показаны на графике.

Функция Ферхюльста для решения поставленной задачи выглядит следующим образом:

$$\mu(t) = \frac{1}{1 + g_0 e^{-kt}}, \quad (2)$$

$$g_0 = (1 - \mu_0) / \mu_0, \quad (3)$$

$$k(p, T, \omega) = \frac{p^u}{m \cdot (1 - \omega_c)^\zeta} \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \cdot \ln \frac{g_0}{g_{\Pi}}, \quad (4)$$

$$g_{\Pi} = (1 - \mu_{\Pi}) / \mu_{\Pi}, \quad (5)$$

где  $m, u, B, \zeta, \mu_0, \mu_{\Pi}$  – некоторые константы, которые могут быть получены в результате натуральных экспериментов. Один из вариантов методики проведения таких экспериментов изложен в работе [6].

Кроме этого, значительное влияние на скорость процесса поражения материала водородной коррозией оказывает вид напряженного состояния, для учета влияния которого используется следующая зависимость коэффициента  $m$  от  $\sigma$ :

$$m = m_0 \exp(G \cdot \sigma_3^g); \sigma_3 = \begin{cases} \sigma_i, & \text{при } \sigma_{\text{ср}} > 0 \\ 0, & \text{при } \sigma_{\text{ср}} \leq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Здесь  $g, G, m_0$  – эмпирические константы;  $\sigma_3$  – эквивалентное напряжение,  $\sigma_{\text{ср}}$  – среднее напряжение,  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

#### Упрощенная модель химического взаимодействия

Данная модель основана на ранее рассмотренной обобщенной модели и предполагает, что «при  $t < t_{\text{инк}}$  изменений механических свойств материалов еще не происходит, а при  $t > t_{\text{кр}}$  уже не происходит» [6]. Такое упрощение позволяет отказаться от использования функции Ферхюльста и заменить ее тремя отрезками прямых линий (график 2 на рис. 1). В результате параметр  $\mu$  будет изменяться от 0 до 1 и описываться следующей параметрической функцией:

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_{\text{инк}}; \\ (t - t_{\text{инк}}) / (t_{\text{кр}} - t_{\text{инк}}), & \text{при } t_{\text{кр}} < t < t_{\text{инк}}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_{\text{кр}}. \end{cases} \quad (7)$$

Для вычисления данной функции требуется определить значения инкубационного периода и периода активных химических превращений. Для их определения используются следующие соотношения [6]:

$$t_{\text{инк}} = m \cdot p^{-u} \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (8)$$

$$t_{\text{кр}} = \lambda \cdot t_{\text{инк}}, \quad (9)$$

где  $p$  – значение парциального давления водорода, МПа;  $T$  – значение температуры;

$m, u, B$  – константы материала, определяемые в результате натуральных экспериментов;

$\lambda$  – параметр, с помощью которого определяется, во сколько раз продолжительность инкубационного периода меньше периода изменений механических свойств материалов.

В некоторых случаях (например, если длительность периода активных химических превращений значительно меньше полного времени нагружения конструкции), можно заменить обобщенную или упрощенную модели химического взаимодействия ступенчатой функцией, которая будет эквивалентна мгновенному переходу свойств материала из исходного состояния в обезуглероженое. В ранее опубликованных работах авторов (например, [1, 2]) было показано, что такое упрощение практически не влияет на конечный результат оценки времени до разрушения конструкции.

Учет влияния вида напряженного состояния на скорость коррозии осуществляется аналогично обобщенной модели.

Давление водорода распределяется по толщине неравномерно, и вычисляется следующим образом [6]: в случае плоской пластины:

$$P_z = \left( \sqrt{P_B} \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) + \sqrt{P_H} \cdot \frac{z}{h} \right)^2, \quad (10)$$

в случае оболочки со сложной формой меридиана:

$$P_\rho = \left( \sqrt{P_B} + \left( \sqrt{P_H} - \sqrt{P_B} \right) \cdot \frac{\ln(\rho/r_B)}{\ln(r_H/r_B)} \right)^2, \quad (11)$$

где  $\rho$  – сферическая координата;  $z$  – плоская координата;  $h$  – толщина пластины или оболочки;  $r_H$  – значение внешнего радиуса оболочки;  $r_B$  – значение внутреннего радиуса оболочки;  $P_H$  – наружное давление;  $P_B$  – внутреннее давление.

Более подробное описание рассмотренных, а также других моделей воздействия водородосодержащей среды на материалы конструкции приведены в работе [6]. В данной публикации упомянуты только те модели, которые были использованы авторами в составе разработанного ими программного комплекса [1, 2]. В этих публикациях также описан и алгоритм учета влияния водорода на прочностные свойства конструкции.

## Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера рассмотрим результаты расчета напряженно-деформированного состояния равномерно нагретой двух- и трехслойной кольцевой пластины с круглым отверстием, находящейся под давлением высокотемпературного водорода. Геометрические размеры пластины следующие:  $R = 110$  мм,  $r = 65$  мм,  $\delta = 10$  мм (рис. 2). В трехслойной пластине центральный слой выполнен из стали марки 20, а верхний и нижний – из материала 12X18H9T, в двухслойной – материал 12X18H9T располагается сверху.

Давление водорода осуществляется со стороны верхнего слоя пластины и является постоянным во времени, а внутренний и наружный кольцевые контуры закреплены шарнирно – неподвижно. Константы, определяющие свойства материала в соотношениях (2) и (3), были взяты из [6], которые для материала сталь 20 и рассматриваемых условий нагружения равны:  $u = 1,73$ ;  $B = 13500$ ;  $\lambda = 5$ . Используя результаты работы [6], допускается предположить, что при данных условиях нагружения воздействие высокотемпературного водорода практически не оказывает влияние на механические свойства сплава 12X18H9T. Расчеты проводились с использованием упрощенной модели химического взаимодействия и без учета влияния вида напряженного состояния на процесс развития водородной коррозии, поскольку для этого требуются дополнительные исследования [1].

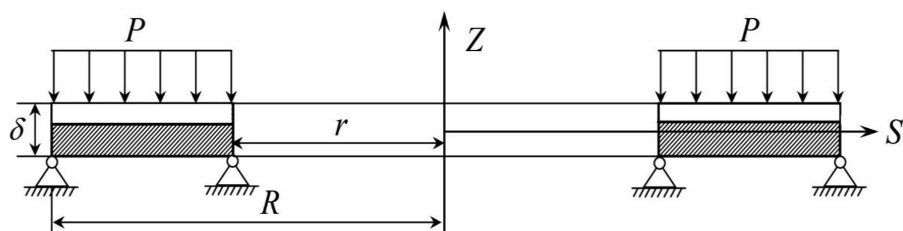


Рис. 2. Осевое сечение пластины

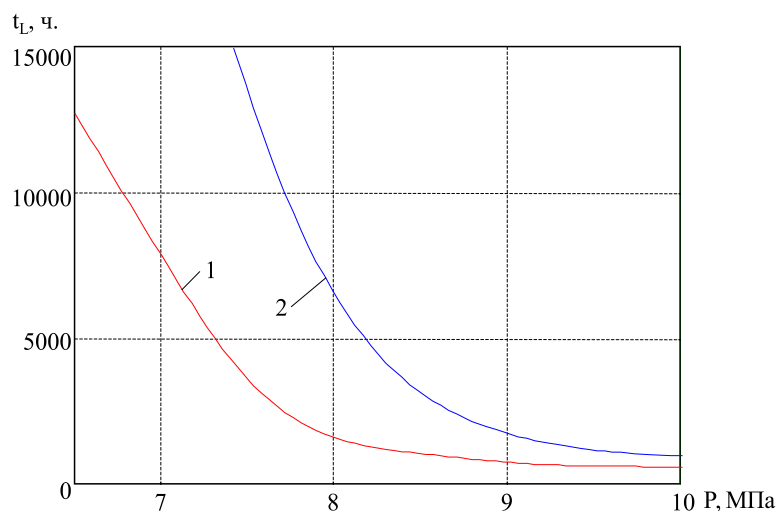


Рис. 3. Зависимость времени разрушения пластин от времени

В ранее опубликованных работах [1, 2] авторами было исследовано напряженно-деформированное состояние одно- и двухслойных пластин с учетом ползучести и высокотемпературной водородной коррозии. В данной публикации проведем аналогичное исследование трехслойной пластины, имеющей такие же размеры, и сравним его результаты с ранее полученными для двухслойной пластины.

В ходе исследований требовалось определить влияние защитного слоя 12Х18Н9Т определенной толщины на время до разрушения пластины при различных значениях давлений водорода. На основе полученных результатов расчетов требовалось построить графики распределения деформаций, напряжений, зон повреждаемости и пластичности в отдельные моменты времени в начале процесса нагружения, перед разрушением и сразу после него. Некоторые наиболее важные результаты показаны на рис. 3–6.

На рис. 3 приведены кривые, отражающие зависимость времени до разрушения от давления водорода, кривая 1 – двухслойная пластина, кривая 2 – трехслойная.

На рис. 4 изображено осевое сечение пластины в разрезе, на котором показаны четыре уровня поврежденности материала (для этого была использована заливка области с соответствующей степенью поврежденности серым цветом определенной яркости), зафиксированные в определенные моменты времени (в начале процесса нагружения, в середине, перед разрушением и после него). В левой половине рисунка приведены результаты, полученные для двухслойной пластины (эти результаты были приведены авторами в предыдущих работах, в частности [1]), на правой части – результаты, полученные для трехслойной пластины. Указанные моменты времени для каждой из пластин подбирались таким образом, чтобы характер распределения зон повреждаемости для них был примерно одинаковым. При этом трехслойная пластина оказывается в аналогичном состоянии через более длительное время, чем двухслойная, что говорит о том, что введение третьего слоя позволяет увеличить время до разрушения пластины. Также следует отметить, что области, в которых зафиксирована поврежденность материала, всегда располагаются в слое с малоуглеродистой сталью.

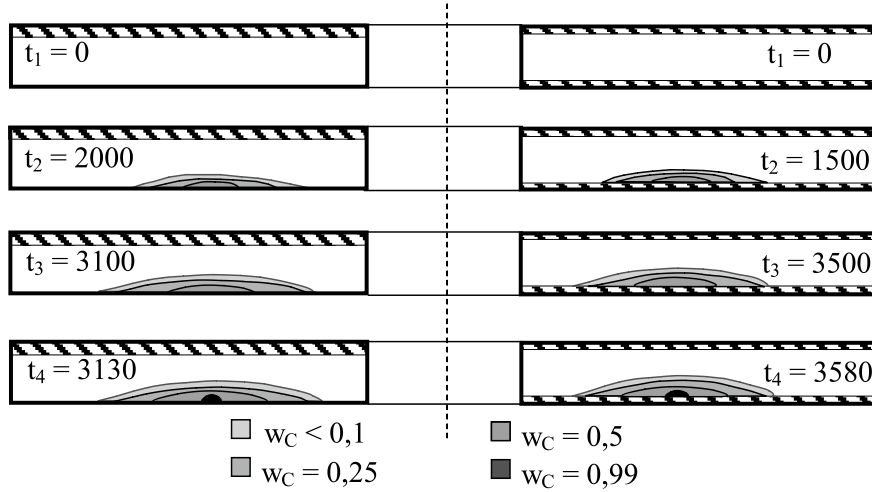


Рис. 4. Разрезы осевого сечения пластин в различные моменты времени

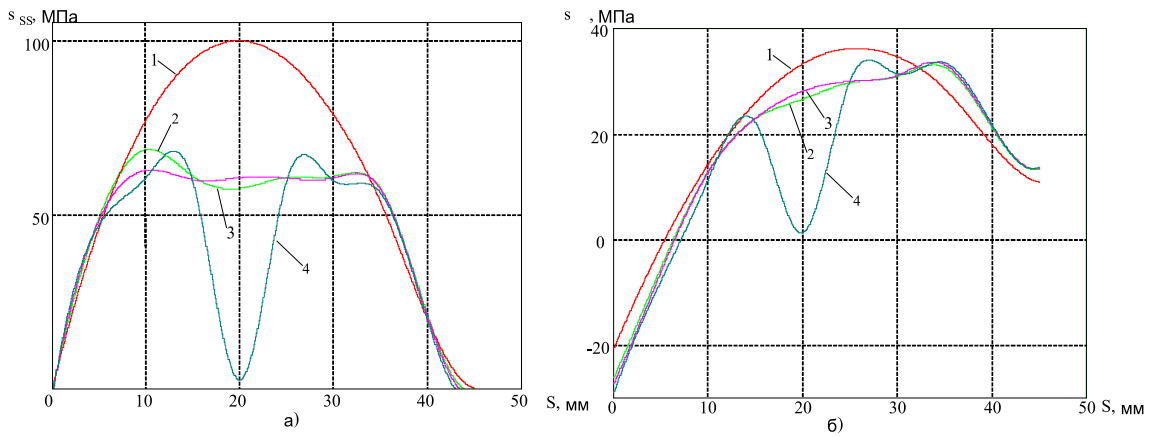


Рис. 5. Меридиональные и окружные напряжения для двухслойной пластины

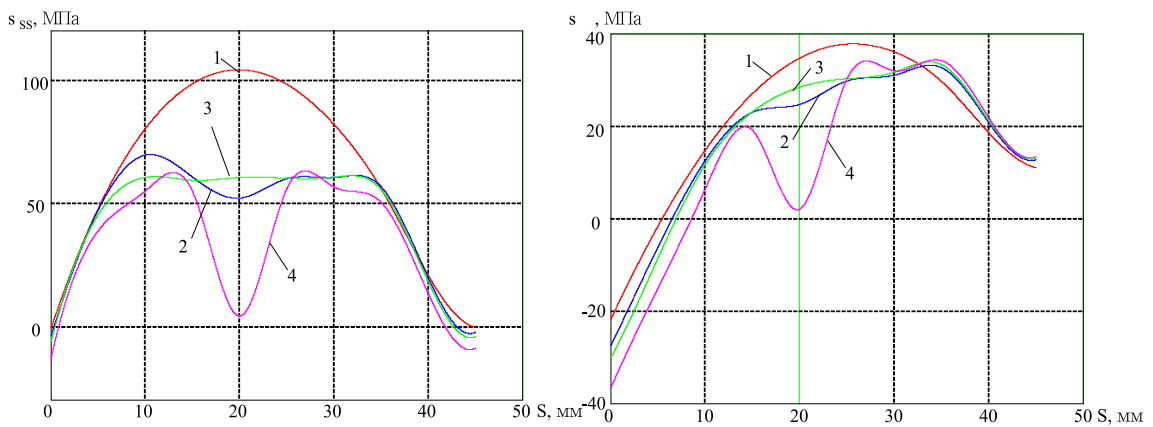


Рис. 6. Меридиональные и окружные напряжения для трехслойной пластины

На рис. 5 изображены меридиональные (а) и окружные (б) напряжения, действующие на нижней поверхности двухслойной пластины, которые получены для тех же самых моментов времени, что и на рис. 4, а на рис. 6 – аналогичные графики для трехслойной пластины.

### Выводы

Полученные результаты в целом позволяют сделать вывод о том, что трехслойная пластина при одинаковых внешних условиях более долговечна, чем двухслойная, толщина защитного слоя в которой равна сумме толщин защитных слоев в трехслойной пластине.

### Список литературы

1. Белов А.В., Поливанов А.А. Исследование влияния вида напряженного состояния на длительную прочность плоских пластин в условиях температурной ползучести и высокотемпературной водородной коррозии // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 7–3. С. 501–506.
2. Белов А.В., Поливанов А.А., Неумоина Н.Г. Воздействие водорода высоких параметров на длительную прочность многослойных составных оболочек в условиях температурной ползучести // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 7–2. С. 279–284.
3. Коротченко Е.А., Перегуд М.М., Новиков В.В. Влияние водорода на ползучесть оболочек из сплавов Э110 и Э635 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. 2015. № 2 (81). С. 50–64.
4. Моисеенко М.О., Попов О.Н., Русакова О.О., Трепутнева Т.А. К расчету подкрепленных пластин и оболочек с учетом ползучести // В сборнике: *Наука и образование*

в жизни современного общества сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 18 ч., 2013. С. 54–55.

5. Локощенко А.М., Соколов А.В. Влияние агрессивной среды на ползучесть и разрушение цилиндрической оболочки под действием равномерного внешнего давления // В книге: *Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: сборник материалов III Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова*. 2014. С. 59–60.

6. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии, Саратов, 2003. 176 с.

7. Волчков Ю.М. Двухслойная модель оболочки Работнова и критическое время выпучивания оболочек при ползучести // *Прикладная механика и техническая физика*. 2010. Т. 51. № 4 (302). С. 198–206.

8. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них // *Интернет-журнал Науковедение*. 2012. № 4 (13) [Электронный ресурс]. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf> (дата обращения: 20.11.2018).

9. Бубнов С.А., Овчинников И.И., Бубнов А.А. Исследование разрушения и кинетики обезуглероживания толстостенной трубы в условиях водородной коррозии // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки*. 2012. № 2 (27). С. 178–182.

10. Овчинников И.Г., Бубнов С.А. Применение программного комплекса ANSYS к расчету толстостенного трубопровода, подвергающегося высокотемпературной локальной водородной коррозии // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2011. Т. 11. № 3–2. С. 100–102.

11. Локощенко А.М., Соколов А.В. Ползучесть и длительное разрушение цилиндрической оболочки под внешним давлением в присутствии агрессивной среды // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2014. № 1. С. 65–76.