

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-4.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/58TVN417.pdf>

Статья опубликована 25.09.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Лахдари А.А., Седдак Айсса, Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Моделирование водородного охрупчивания трубопровода как тонкостенной цилиндрической оболочки из нелинейно упругого материала // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/58TVN417.pdf> (доступ свободный).
Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 539.3:539.4

Лахдари Асия Амина

Университет наук и технологий города Оран, Алжир, Оран
Магистрант
E-mail: kad_dz2000@yahoo.fr

Седдак Айсса

Университет наук и технологий города Оран, Алжир, Оран
Кандидат технических наук, профессор
E-mail: sed_dz@yahoo.fr

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов¹
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

Национально исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия, Балаково
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Моделирование водородного охрупчивания трубопровода как тонкостенной цилиндрической оболочки из нелинейно упругого материала

Аннотация. Отмечается два направления исследования проблемы водородного охрупчивания: первое связано с дальнейшим изучением фундаментальных основ и раскрытием микромеханизмов и взаимосвязи процессов водородного охрупчивания и старения металлов; второе направление связано с разработкой моделей и методов прогнозирования кинетики изменения напряженно-деформированного состояния и оценки долговечности конструкций, подвергающихся водородному охрупчиванию. Проводится анализ современного состояния исследований проблемы водородного охрупчивания металлических материалов по первому направлению. Указывается, что механизмы водородного охрупчивания и деградации свойств изучены недостаточно, особенно по отношению к процессам водородного охрупчивания и

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

деградации механических свойств сталей для магистральных газопроводов. Подчеркивается важность задачи прогнозирования поведения нагруженных металлических конструкций под влиянием водородного охрупчивания. Далее рассматривается модель трубопровода в виде цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением и подвергающейся водородному охрупчиванию. Материал оболочки считается нелинейно упругим, свойства его зависят от концентрации водорода в точке оболочки. Получены уравнения деформирования нелинейной оболочки без учета влияния водорода и с учетом влияния водорода. Для решения уравнений применяется методика последовательных приближений, и выделения главной части в уравнении деформирования. Приводятся эпюры изгибающих моментов, поперечных сил и напряжений по длине оболочки, а также эпюры концентрации водорода по толщине оболочки в разные моменты времени.

Ключевые слова: водородное охрупчивание; газопровод; цилиндрическая оболочка; физическая нелинейность; влияние водорода; моделирование

Введение

Проблема водородного охрупчивания и деградации механических свойств металлических материалов довольно интенсивно изучается на протяжении нескольких десятков лет в связи с большой ролью, которую эти процессы оказывают на прочность и ресурс магистральных газопроводов. При этом можно отметить два направления исследования проблемы водородного охрупчивания: первое связано с дальнейшим изучением фундаментальных основ и раскрытием микромеханизмов и взаимосвязи процессов водородного охрупчивания и старения металлов; второе направление связано с разработкой моделей и методов прогнозирования кинетики изменения напряженно-деформированного состояния и оценки долговечности конструкций, подвергающихся водородному охрупчиванию.

Состояние проблемы

Достаточно подробный анализ современного состояния исследований проблемы водородного охрупчивания металлических материалов по первому направлению содержится в статье [1], где отмечается, что Министерством энергетики США в свое время были сформулированы и рекомендованы основные направления фундаментальных исследований процессов переноса водорода в металле и процессов деградации механических свойств, приводящих к разрушению металлов [2]. При этом анализ работ [3-7] показывает, что механизмы водородного охрупчивания и деградации свойств изучены недостаточно, особенно по отношению к процессам водородного охрупчивания и деградации механических свойств сталей для магистральных газопроводов [8-10]. Причем в [10] говорится: «анализ аварийных разрушений магистральных газопроводов показывает, что наряду с действием многих факторов (коррозия, пульсация температуры и давления газа), одним из весомых является наводороживание труб».

И хотя публикаций по проблеме водородного охрупчивания много, но до сих пор опасность непредсказуемого разрушения металлов под влиянием водорода существует, и причинами этого могут быть три обстоятельства, отмеченные Б. А. Колачевым более 30 лет тому назад [3]. Это, во-первых, многообразие форм проявления водородного охрупчивания, затрудняющее прогнозирование разрушения. Малая предсказуемость разрушения под влиянием диффузионно-подвижного водорода затруднена также высокой диффузионной подвижностью водорода и сильным влиянием на эту подвижность различных физических, в том числе и силовых полей. И, наконец, на точность предсказания большое влияние оказывает

неопределенность величины критической концентрации водорода в зонах разрушения. Также следует отметить высокую чувствительность механических характеристик металлов к влиянию диффузионно-подвижного водорода. В связи со сказанным задача прогнозирования поведения нагруженных металлических конструкций под влиянием водородного охрупчивания является весьма важной, но далекой до окончательного решения.

Добавим, что проблемы замедленного разрушения металлоконструкций под действием водорода рассматривались В. В. Леповым с сотрудниками [11-14]. Изучению влияния водорода на структуру и прочность материалов посвящены исследования В. А. Полянского [15-19]. Анализ изменения структуры и разрушения материалов, содержащих водород, выполнен в работе Ю. А. Яковлева [20]. Экспериментальное и аналитическое системное исследование синергетических (кинетических) закономерностей развития повреждаемости и разрушения структуры стали в условиях активации металла диффузионным движением водорода; разработка теории и физических моделей локального влияния водорода различной активности на повреждаемость стали рассмотрена в исследованиях Шашковой Л. В. [21, 22, 23].

По второму направлению, связанному с построением моделей и разработкой методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния и долговечности конструкций, подвергающихся водородному охрупчиванию, публикаций значительно меньше. В работе [24] была предложена одна из первых феноменологических моделей для расчета прочности и долговечности элементов конструкций, наводороженных под воздействием агрессивной среды, которая учитывала влияние присутствующего в металле водорода на его прочность и пластичность, а также влияние схемы напряженного состояния на изменение механических свойств наводороженных материалов. В последующих работах И. Г. Овчинникова и его учеников [25-29] эта модель получила дальнейшее развитие и применение к расчету гибких круглых пластинок, а также толстостенных труб в условиях наводороживания.

В работах Астафьева В. И. и Ширяевой Л. К. [30, 31, 32] для описания процесса коррозионного растрескивания в условиях наводороживания был применен подход Качанова-Работнова и предложена модель, основанная на скалярном варианте поврежденности и учитывающая влияние уровня поврежденности на предельное сопротивление материала в условиях коррозионного растрескивания.

Трещев А. А. с учениками [33-39] развил исследования научной школы Овчинникова И. Г. в направлении построения более корректных моделей деформирования материалов, учитывающих тот факт, что водородосодержащая среда, проникая в элементы конструкций, выполненные из материалов, изначально не чувствительных к виду напряженного состояния, приводит к значительному изменению механических свойств в растянутых зонах, практически не оказывая влияния на сжатые зоны. Эти модели затем применены к расчету круглых и прямоугольных пластинок, дисков, насыщаемых водородом.

В работах И. И. Овчинникова [41, 42, 43] рассмотрено поведение длинного полого цилиндра в водородсодержащей среде, диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния. Похожая задача применительно к анализу напряженного состояния плоских элементов конструкций в условиях диффузии водорода исследована в работе [44].

Постановка задачи

При расчете трубопроводов могут использоваться различные расчетные схемы: в виде гибкой нити, в виде стержневого элемента, работающего на изгиб, в виде оболочки вращения, работающей на изгиб, кручение, и в частном случае, в виде цилиндрической оболочки.

Далее в качестве расчетной модели трубопровода будем рассматривать тонкостенную цилиндрическую оболочку из нелинейно-упругого материала, подвергающуюся в процессе эксплуатации совместному воздействию нагрузки и агрессивной водородсодержащей среды. Изменение концентрации водородсодержащей среды приводит к изменению диаграммы деформирования материала оболочки, т. е.

$$\sigma_u = \Phi(\varepsilon_u, C) \quad (1)$$

где: σ_u – интенсивность напряжений, ε_u – интенсивность деформаций, C – концентрация водорода в точке.

Соотношения, связывающие напряжения и полные деформации в оболочке с учетом диффузионных воздействий записываются в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= (1/\psi) \cdot (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= (1/\psi) \cdot (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь: σ_x, σ_y – компоненты тензора напряжений, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – компоненты тензора деформаций, ν – коэффициент поперечной деформации, $\psi = \sigma_u/\varepsilon_u$.

Разрешая эти соотношения относительно напряжений, получим

$$\begin{aligned} \sigma_x &= [\psi/(1 - \nu^2)] \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \\ \sigma_y &= [\psi/(1 - \nu^2)] \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x) \end{aligned} \quad (3)$$

Интенсивность деформаций ε_u выражается через компоненты тензора деформаций так:

$$\varepsilon_u = \mu_1 \cdot [(\varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_y)^2 + \mu \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y]^{1/2} = \mu_1 \cdot \{(\varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_y)^2 + \mu \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y\}^{1/2},$$

где

$$\mu_1 = \frac{(1-\nu+\nu^2)^{1/2}}{(1-\nu^2)}, \mu_2 = \frac{(4\nu-\nu^2-1)}{(1-\nu+\nu^2)} \quad (4)$$

Так как прогибы оболочки, находящейся в условиях осесимметричной деформации, составляют до 1/4 ее толщины, то целесообразно использовать следующие геометрические соотношения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{du}{dx}, \varepsilon_y^0 = \frac{W}{R}, \aleph_x = \frac{d^2W}{dx^2}, \aleph_y = 0, \\ \varepsilon_x &= \varepsilon_x^0 + z \cdot \aleph_x, \varepsilon_y = \varepsilon_y^0 \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0$ – продольная и окружная деформации срединной поверхности оболочки радиуса R ; \aleph_x, \aleph_y – изменения кривизны; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – деформации слоя на расстоянии z от срединной поверхности; u, w – продольное перемещение и прогиб.

Рассматривая равновесие оболочки, можно записать следующие уравнения равновесия:

$$T_x - \frac{P}{2\pi R} = 0, \frac{dQ_x}{dx} - \frac{T_y}{R} + q = 0, \frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0 \quad (6)$$

Исключая из второго и третьего уравнений усилие Q_x , получим:

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} - \frac{T_y}{R} + q = 0 \quad (7)$$

В этих уравнениях: q – интенсивность внешней нагрузки, Q_x – перерезывающая сила, T_x , T_y – продольное и окружное усилия, M_x – изгибающий момент, определяемые по формулам:

$$T_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz, \quad T_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y dz, \quad M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x \cdot z dz \quad (8)$$
$$\sigma_x = \sigma_x(\varepsilon_x, \varepsilon_y, C), \quad \sigma_y = \sigma_y(\varepsilon_x, \varepsilon_y, C)$$

При известной зависимости вида (1) полученные соотношения позволяют оценить расчетным путем напряженно – деформированное состояние трубопровода как цилиндрической оболочки, подвергающейся совместному действию нагрузки и водородсодержащей среды.

Методика расчетного анализа

Задача расчета оболочки решается в несколько этапов методом последовательных приближений.

Этап первый: расчет физически линейной оболочки без учета влияния водорода

На первом этапе решается задача осесимметричного нагружения оболочки при отсутствии воздействия водорода и физической нелинейности задачи (т. е. при $\sigma_u = E \varepsilon_u$).

Разрешающее уравнение в этом случае принимает вид:

$$D \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kw(x) = q(x), \quad (9)$$

где $q = const$ – внутреннее давление в трубопроводе.

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)}, \quad k = \frac{E\delta}{R^2},$$

где: E – модуль упругости, δ – толщина, D – цилиндрическая жесткость, R – радиус оболочки.

Решение (9) имеет вид:

$$w(x) = C_1 e^{-\beta x} \cos \beta x + C_2 e^{-\beta x} \sin \beta x + C_3 e^{\beta x} \cos \beta x + C_4 e^{\beta x} \sin \beta x + \frac{q}{K}, \quad (10)$$

где $\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4D}}$, C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования.

Произвольные постоянные интегрирования определяются из граничных условий, которые могут быть или чисто геометрическими (жесткое закрепление), или смешанными (шарнирное опирание), или чисто статическими (свободный край).

Жесткое закрепление:

$$w(0) = 0, \varphi(0) = 0, w(l) = 0, \varphi(l) = 0 \quad (11)$$

Шарнирное опирание:

$$w(0) = 0, \frac{d^2w(0)}{dx^2} = 0, w(l) = 0, \frac{d^2w(l)}{dx^2} = 0$$

Свободный край:

$$\frac{d^2w(0)}{dx^2} = 0, \frac{d^2w(l)}{dx^2} = 0, \frac{d^3w(0)}{dx^3} = 0, \frac{d^3w(l)}{dx^3} = 0$$

Из (11) с учетом (10) определяем C_1, C_2, C_3, C_4 и соответствующие напряжения: кольцевые

$$\sigma_{\text{кольц}} = \frac{Ew(x)}{R}$$

изгибные (на крайнем волокне):

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{6M(x)}{\delta^2},$$

где $M(x) = -D \frac{d^2w(x)}{dx^2}$

и полные: $\sigma_{\text{полн}} = \sigma_{\text{кольц}} + \nu \cdot \sigma_{\text{изг}}$.

Этап второй: расчет физически нелинейной оболочки без учета влияния водорода

На этом этапе решается физически нелинейная задача без учета влияния водорода, т. е. функция ψ принимается в виде $\psi = A\varepsilon^{m-1} - B\varepsilon^{n-1}$, где коэффициенты A, B, m, n определяются по экспериментальной диаграмме деформирования, которая аппроксимируется функцией $\sigma = A\varepsilon^m - B\varepsilon^n$. Далее рассматривается частный случай $\sigma = A\varepsilon - B\varepsilon^3$, подтверждаемый имеющимися экспериментальными данными.

Разрешающее уравнение в этом случае имеет вид:

$$\frac{d^2M_x}{dx^2} - \frac{T_y}{R} + q = 0$$

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x \cdot z dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \psi / (1 - \nu^2) [\varepsilon_x + \varepsilon_y \nu] z dz = \frac{1}{(1 - \nu^2)} \cdot \frac{h^3}{12} \cdot \frac{d^2w}{dx^2} \cdot \left\{ A - \mu_1 B \nu^2 \frac{w^2}{R^2} - \mu_1 B \frac{w^2}{R^2} + \right. \\ \left. + \mu_1 \mu_2 B \nu \frac{w^2}{R^2} - \mu_1 B \left(\frac{d^2w}{dx^2} \right)^2 \frac{h^2}{20} \right\}, \quad (12)$$

Численное исследование показало, что в выражении для M_x все величины, стоящие в фигурных скобках, кроме A , являются величинами второго порядка малости, в связи с чем ими можно пренебречь, т. е. записать:

$$M_x \approx \frac{1}{(1 - \nu^2)} \cdot \frac{h^3}{12} A = \frac{Ah^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{d^2w(x)}{dx^2}$$

Аналогично находим T_y .

$$T_y = \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} \sigma_y = \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} \frac{\Psi}{1 - \nu^2 [\varepsilon_y + \varepsilon_x \nu]} dz =$$

$$= \frac{1}{(1 - \nu^2)} \cdot \left\{ A - \mu_1 B \nu^2 \frac{w^2}{R^2} - \mu_1 B \frac{w^2}{R^2} + \mu_1 \mu_2 B \nu \frac{w^2}{R^2} (1 - \nu^2) \frac{w}{R} K - \mu_1 B \cdot (1 - \nu^2) \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 \frac{h^3}{12} \right.$$

$$\left. + 2 \mu_1 B \nu^2 \frac{w}{R} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right) \frac{h^3}{12} - \mu_1 \mu_2 B \nu \frac{w}{R} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 \frac{h^3}{12} \right\}$$

Численное исследование показало, что в выражении для T_y значимой частью является:

$$T_y = \frac{Aw}{R} \delta$$

Тогда, подставляя в исходное уравнение, получаем:

$$-\frac{Ah^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - \frac{A\delta}{R^2} w(x) + q = 0. \quad (13)$$

Величины σ_x и σ_y вычисляются по формулам:

$$\sigma_x = -\frac{z \frac{d^2 w}{dx^2}}{1 - \nu^2} \left[A - B \mu_1 \left\{ \frac{\nu^2 w^2}{R^2} + 2 \frac{w}{R} z \frac{d^2 w}{dx^2} + z^2 \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + \frac{w^2}{R^2} + \mu_2 \frac{w}{R} \left(-\nu \frac{w}{R} - z \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \right\} \right]$$

$$\sigma_x = \frac{(1 - \nu^2) \frac{w}{R} - \nu z \frac{d^2 w}{dx^2}}{1 - \nu^2} \cdot \left[A - B \mu_1 \left\{ \frac{\nu^2 w^2}{R^2} + 2 \nu \frac{w}{R} z \frac{d^2 w}{dx^2} + z^2 \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 \right\} \right]$$

На рисунках 1, 2, 3 приведены результаты расчета физически нелинейной тонкостенной оболочки в виде эпюр изгибающего момента, угла поворота и поперечной силы по длине оболочки. Расчеты выполнялись при следующих параметрах: давление $2.5 \cdot 10^6$ Па, радиус оболочки 0.6 м, расчетная длина 4 м, толщина стенки 0.012 м.

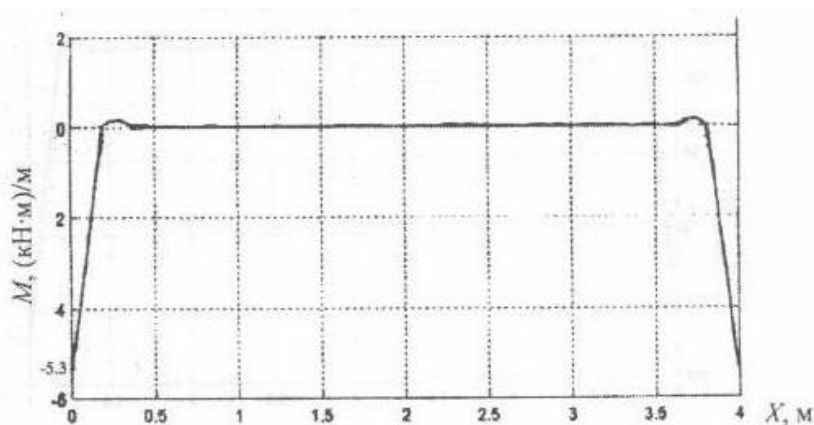


Рисунок 1. Эпюры изгибающих моментов по длине оболочки (составлено авторами)

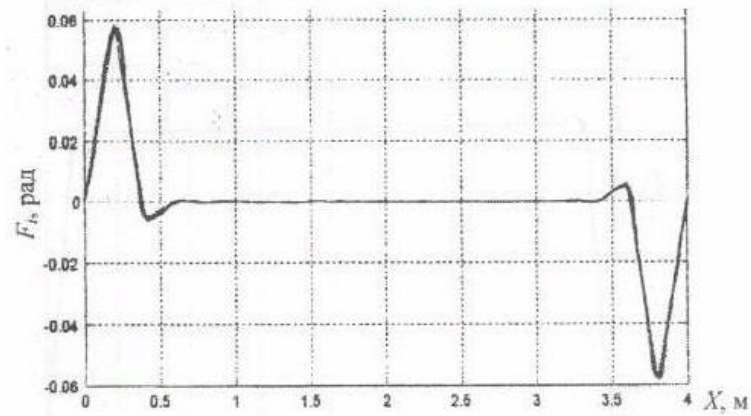


Рисунок 2. Эюра углов поворота по длине оболочки (составлено авторами)

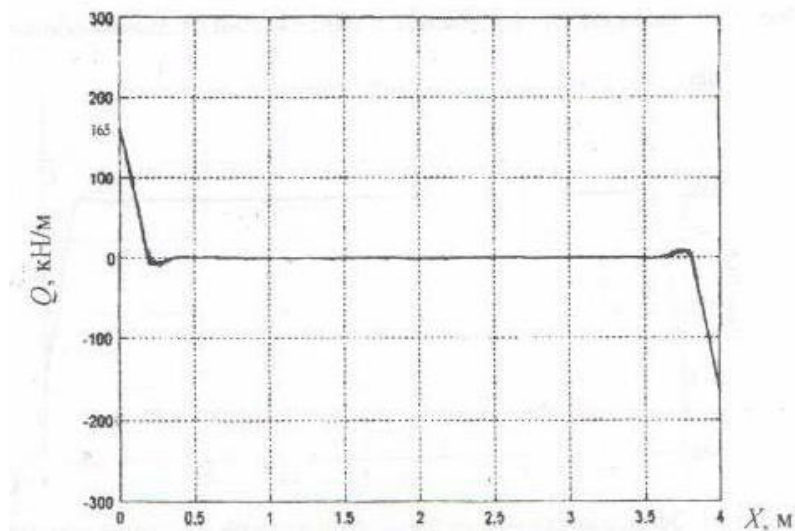


Рисунок 3. Эюра поперечной силы длине оболочки (составлено авторами)

Этап третий: расчет с учетом влияния водорода

При воздействии водорода с течением времени изменяются значения коэффициентов A и B в зависимости $\sigma = A\varepsilon - B\varepsilon^3$, которые в этом случае будут функциями концентрации водорода $A = A(C)$, $B = B(C)$.

Для функций A и B выражения, полученные по экспериментальным данным, запишутся в виде:

$$A(C) = 2300 \cdot 10^8 - 700 \cdot 10^8 \cdot C,$$

$$B(C) = 6900 \cdot 10^8 - 2000 \cdot 10^8 \cdot C, \quad (14),$$

где $C = (-B_1 - (B_1^2 - 4 \cdot B_2 \cdot (B_0 - h))^{1/2}) / (2 \cdot B_2)$,

$$B_0 = (-5.581652 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1.737025 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5.67803 \cdot 10^{-3}), \text{ м}$$

$$B_1 = (2.156825 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 4.069355 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1.071676 \cdot 10^{-3}), \text{ м}$$

$$B_2 = (-1.660752 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 2.403985 \cdot 10^{-3} \cdot t + 9.276547 \cdot 10^{-4}), \text{ м}$$

Выведем разрешающее уравнение для определения напряженно-деформированного состояния цилиндрической тонкостенной оболочки с учетом воздействия водорода.

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} - \frac{T_y}{R} + q = 0$$

Выражение для M_x с учетом отбрасывания малозначащих членов имеет вид:

$$M_x \approx -\frac{1}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} A(C) \cdot z^2 dz$$

Аналогично для T_y :

$$T_y = \frac{w}{R} \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} A(C) \cdot z^2 dz,$$

т. е.: $T_y = \bar{K} w(x)$

Окончательно получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\bar{D} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + \bar{K} w(x) = q$$

И его решение:

$$w(x) = C_1 e^{-\beta x} \cos \beta x + C_2 e^{-\beta x} \sin \beta x + C_3 e^{\beta x} \cos \beta x + C_4 e^{\beta x} \sin \beta x + \frac{q}{K},$$

Нахождение произвольных постоянных интегрирования производится из граничных условий.

С использованием метода последовательных возмущений параметров получено уравнение, описывающее осесимметричную деформацию тонкостенной цилиндрической оболочки, которое имеет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(G_1 \frac{d^2 W}{dx^2} \right) - \frac{1}{R} \frac{d^2}{dx^2} (G_2 W) - \frac{1}{R} G_3 \frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{G_4}{R} W = \frac{d^2 m_c}{dx^2} + \frac{P_c}{R} + q$$

где $G_1, G_2, G_3, G_4, m_c, P_c$ – переменные коэффициенты, учитывающие влияние накопленного уровня деформации и концентрации водородсодержащей среды; W – прогиб, R – радиус срединной поверхности оболочки, q – интенсивность нагрузки, x – координата.

Данное уравнение с учетом малости $d^2 W/dx^2, d^2 m_c/dx^2, P_c/R, d^2(G_2 W)/dx^2$ примет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[\Phi_1 w_{i-1}(x) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right] + \Phi_2 w_{i-1}(x) w_i(x) = q \quad (15)$$

Это дифференциальное уравнение четвертого порядка с переменными коэффициентами решается методом последовательных приближений. С помощью полученного решения определяется напряженно-деформированное состояние оболочки с учетом влияния водорода и физической нелинейности.

Результаты расчета

С использованием приведенной методики был выполнен расчет тонкостенной цилиндрической оболочки трубопровода с учетом влияния водорода. Результаты расчета в виде эпюр изгибающего момента M , угла поворота φ , изгибающих напряжений $\sigma_{изг}$, по длине оболочки для момента времени 7,8 лет приведены на рисунках 4, 5, 6.

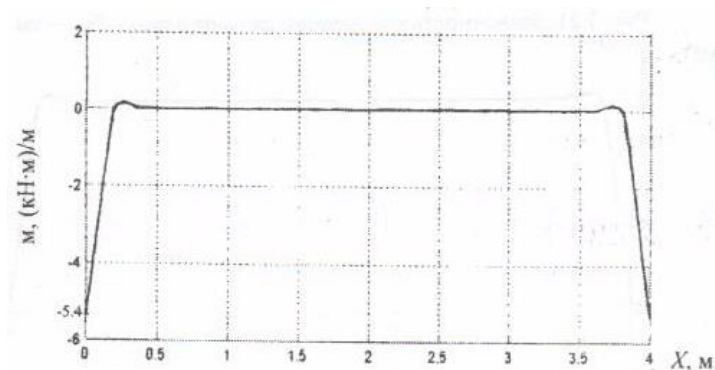


Рисунок 4. Эпюра изгибающих моментов по длине оболочки (составлено авторами)

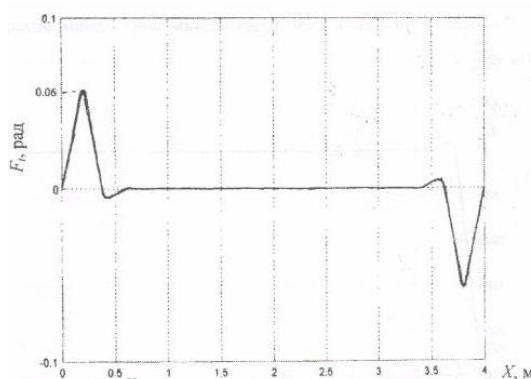


Рисунок 5. Эпюра углов поворота по длине оболочки (составлено авторами)

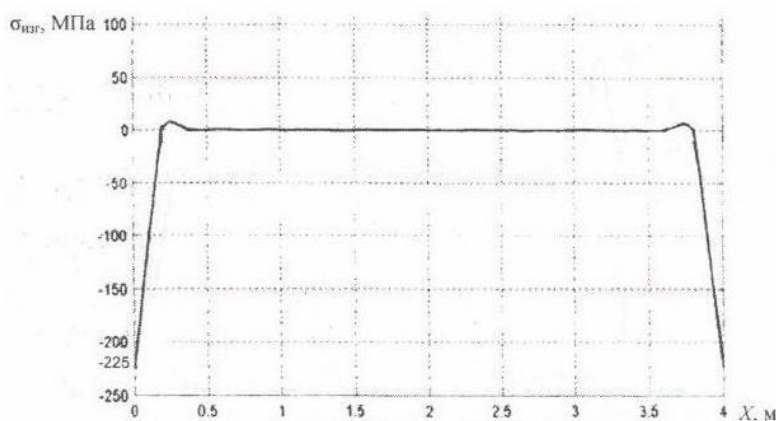


Рисунок 6. Эпюра максимальных напряжений изгиба по длине оболочки (составлено авторами)

На рисунке 7 приведены эпюры концентрации водорода по толщине оболочки в различные моменты времени. На рисунке 8 приведены эпюры интенсивности напряжений σ и мгновенной прочности S по толщине оболочки в момент времени $t = 7,8$ лет, когда выполняется условие разрушения, то есть когда интенсивность напряжений в какой – либо точке оболочки оказывается равной величине мгновенной прочности.

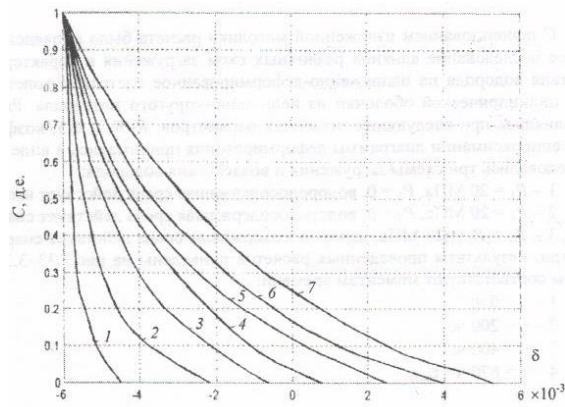


Рисунок 7. Эпюра концентрации водорода по толщине оболочки в разные моменты времени: 1 – 0,5 лет, 2 – 1,7 лет, 3 – 2,9 лет, 4 – 3,9 лет, 5 – 5,25 лет, 6 – 6,55 лет, 7 – 7,8 лет (составлено авторами)

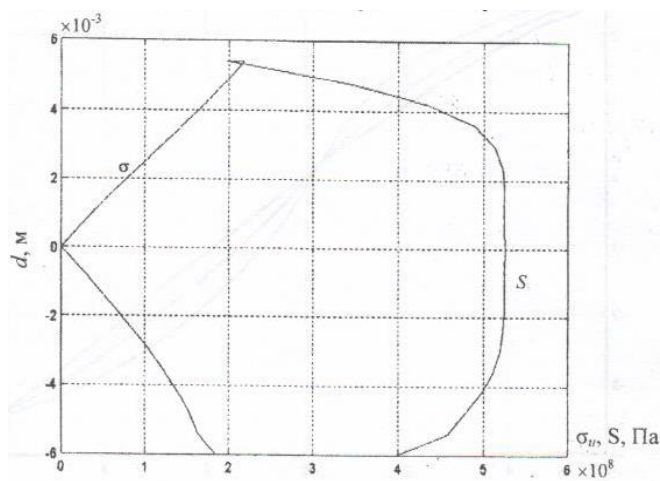


Рисунок 8. Эпюры интенсивности напряжений и мгновенной прочности в момент времени 7,8 лет (составлено авторами)

Достоверность полученных результатов подтверждается применением широко опробованных методов расчета цилиндрических оболочек в условиях осесимметричного нагружения, проверкой невязки, получаемой в результате сравнения левой и правой частей исходного дифференциального уравнения при подстановке в него приближенно найденной функции прогиба. Невязки в первом приближении составляют 10-12 %, а во втором – 2-3 %. В качестве численного примера, иллюстрирующего разработанную выше методику, проведено исследование напряженно-деформированного состояния участка тонкостенного трубопровода, подвергающегося коррозионному растрескиванию. Целью решения задачи было определение долговечности конструкции. Расчетной долговечностью является момент времени, при котором приведенные напряжения в какой – либо точке конструкции становятся равными или превышают параметр мгновенной прочности s , т. е. при $\sigma_{и} \geq s$ наступает разрушение, где $\sigma_{и} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y)^{1/2}$.

Выводы

1. Анализ публикаций по проблеме водородного охрупчивания показывает, что все работы делятся на два направления: первое связано с изучением фундаментальных основ и раскрытием микромеханизмов и взаимосвязи процессов водородного охрупчивания и старения металлов; второе направление связано с разработкой моделей и методов прогнозирования

кинетики изменения напряженно-деформированного состояния и оценки долговечности конструкций, подвергающихся водородному охрупчиванию. Причем работ второго направления значительно меньше. Причин этого несколько и одна из основных – отсутствие надежных экспериментальных данных по зависимости механических характеристик материалов, используемых при расчете конструкций от концентрации водорода.

2. Рассмотрена модель деформирования трубопровода в виде осесимметричной цилиндрической оболочки, подвергающейся внутреннему давлению и водородному охрупчиванию. Получены уравнения деформирования оболочки с учетом нелинейности материала и зависимости свойств материала от концентрации водорода. Влияние водорода учитывается через зависимость коэффициентов функции, аппроксимирующей диаграмму деформирования от концентрации водорода. Для решения уравнений деформирования оболочки используется методика последовательных приближений, согласно которой коэффициенты уравнений находятся по данным предыдущего этапа расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нечаев Ю. С. Актуальные проблемы старения, водородного охрупчивания и стресс – коррозионного поражения сталей и эффективные пути их решения // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2007, № 11(55)б р. 108-117.
2. Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage and Use «Basis research Needs for the Hydrogen Economy», May 13-15, 2003, Second Printing, February 2004, Office of Science U.S. Department of Energy.
3. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М. Наука. 1985. 216 с.
4. Ткачев В. И., Холодный В. Н., Левина И. Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов. НАН Украины, Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко. 1999.
5. Ткачев В. Н. Проблемы водородной деградации металлов // *Физико-химическая механика материалов*. 2000. т.36. №4, с. 7-14.
6. Ильин А. А., Колачев Б. А., Носов В. К., Мамонов А. М. Водородная технология титановых сплавов. М. Изд-во МИСиС. 2002.
7. Ильин А. А., Гольцова М. В. Водородная обработка материалов: Исторический аспект и теоретические основы (обзор современного состояния) // Тр. V Междунар. конф. «Водородная экономика и водородная обработка материалов». Донецк. Украина. 2007. т.2. с. 470-474.
8. Чувильдеев В. Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов // Труды научно-практического семинара «Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов». Н. Новгород. 2006, с. 18-67.
9. Есиев Т. С. О влиянии фактора времени в развитии повреждаемости магистральных газопроводов // Труды научно-практического семинара «Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов». Н. Новгород. 2006, с. 94-109.
10. Кузюков А. Н., Борисенко В. А., Крикун В. П., Левченко В. А., Архипов А. Г. Водородное разрушение сталей в условиях транспортировки природного газа //

- Тр. V Междунар. конф. «Водородная экономика и водородная обработка материалов». Донецк. Украина. 2007. т.2. с. 734-739.
11. Михайлов В. Е., Лепов В. В., Алымов В. Т., Ларионов В. П. Замедленное разрушение металлоконструкций под действием водорода. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. – 224 с.
 12. Архангельская Е. А., Лепов В. В., Ларионов В. П. Метод оценки ресурса при водородном охрупчивании на основе модели накопления поврежденности и связанной диффузии // Труды междунар. конф. «Физико-технические проблемы Севера», 10-11 июля 2000 г., Якутск, 4.1. – Там же. – Часть II. – С. 55-61.
 13. Архангельская Е. А., Лепов В. В., Алымов В. Т., Ларионов В. П. Численное моделирование разрушения повреждаемой среды под действием водорода. // Вычислительные технологии, 2002. – Т.7. – 4. – С. 156-161.
 14. Лепов В. В. Структурные модели процессов накопления повреждений и трещиностойкость конструкционных материалов. Автореф. дисс. д.т.н. Объединенный Институт физико-технических проблем Севера СО РАН Якутск, 2006. 50 с.
 15. Мерсон Д. Л., Полянский А. М., Полянский В. А., Черняева Е. В. Связь механических характеристик стали 35Г2 с содержанием водорода и параметрами акустической эмиссии // Заводская Лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – №2, т.74. с. 57-61.
 16. Belyaev A. K., Indetcev D. A., Polyanskiy V. A., Sukhanov A. A. Theoretical Model for the Hydrogen-Material Interaction as a Basis for Prediction of the Material Mechanical Properties // Advances in materials science editors: D. Kusnezov, O. N. Shubin. – Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico, USA, 2009. – р. III-21 – III-25. – ISBN 978-1-61584-923-9.
 17. Полянский В. А. Влияние водорода с различными энергиями связи на структуру и прочность материалов. Автореф. дисс. д.т.н. Институт проблем машиностроения РАН. СПб. 2010. 32 с.
 18. Беляев А. К., Полянский А. М., Полянский В. А., Яковлев Ю. А. Параметрическая неустойчивость при циклическом нагружении как причина разрушения материалов, содержащих водород // Изв. РАН. МТТ. 2012. № 5. С. 53-57.
 19. Belyaev A. K., Polyanskiy V. A., Yakovlev Yu. A. Stresses in pipeline affected by hydrogen. Acta Mechanica, vol. 224, No. 3-4, pp. 176-186, 2012.
 20. Яковлев Ю. А. Изменение структуры и разрушение материалов, содержащих водород. Автореф. дисс. к.ф.м.н. Институт проблем машиностроения РАН. СПб. 2013. 19 с.
 21. Шашкова Л. В. О методическом подходе к изучению кинетики водородного охрупчивания сталей / Л.В. Шашкова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – Ч. 1. – № 5 (5). – С. 30-36.
 22. Шашкова Л. В. Фрактально-синергетические аспекты микроповреждаемости, разрушения и оптимизации структуры стали в условиях водородной хрупкости и сероводородного коррозионного растрескивания. Монография. Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ. 2013. – 305 с.

23. Шашкова Л. В. Фрактально-синергетические аспекты локальной микроповреждаемости и разрушения диффузионно-активированной водородом стали. Автореф. дисс. д.ф.-м.н. М. 2014.
24. Овчинников И. Г., Рассада А. Б. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородосодержащей средой и ее приложения // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. 1989. с. 12-16.
25. Кириллова Л. А., Овчинников И. Г. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию / Саратов. политехи, ин-т. Саратов, 1989. – 15 с. Рукопись деп. в ВИНТИ 7 февраля 1990, № 698 – В90.
26. Кириллова Л. А. Напряженно-деформированное состояние гибкой круглой пластины в водородосодержащей среде с учетом наведенной неоднородности. Автореф. дисс. к.т.н., Саратов. 1990. 15 с.
27. Рассада А. Б. Напряженно-деформированное состояние и долговечность элементов конструкций в условиях низкотемпературного наводороживания. Автореф. дисс. к.т.н., Саратов. 1991. 19 с.
28. Овчинников И. Г., Мавзовин В. С. Моделирование кинетики коррозионного растрескивания конструкций, подвергающихся наводороживанию // Сб.тр. "Водородная обработка материалов" 2-й международной конференции "ВОМ-98", г. Донецк, 2-4 июня 1998 г. – С. 185.
29. Мавзовин В. С. Модель коррозионного растрескивания материала и ее применение к расчету оболочечных конструкций. Автореф. дисс. к.т.н., Саратов. 1999. 18 с.
30. Астафьев В. И., Ширяева Л. К. Накопление поврежденности в металлах в условиях коррозионного растрескивания под напряжением. – Изв. АН РАН. МТТ, 1997. – С. 60-68.
31. Ширяева Л. К. Моделирование процесса накопления поврежденности в металлах в условиях коррозионного растрескивания под напряжением. Автореф. дисс. к.т.н., Самара. 1997. 17 с.
32. Астафьев В. И., Ширяева Л. К. Накопление поврежденности и коррозионное растрескивание металлов под напряжением. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 1998. – 124 с.
33. Сергеева С. Б. Влияние водородосодержащей среды на напряженно-деформированное состояние элементов конструкций, выполненных из титановых сплавов. Автореф. дисс. к.т.н., Тула. 2002. 20 с.
34. Прохорова А. В. Влияние воздействия агрессивной среды на напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. Автореф. дисс. к.т.н., Тула. 2003. 20 с.
35. Полтавец П. А. Упруго-пластическое деформирование пластин, выполненных из материалов, чувствительных к наводороживанию. Автореф. дисс. к.т.н., Тула. 2006. 20 с.
36. Божанов П. В., Полтавец П. А., Трещев А. А. Изгиб пластин, выполненных из материалов, чувствительных к наводороживанию, за пределами упругости //

- Известия высших учебных заведений. Строительство: науч.-теорет. журн. – 2008. – № 3. – С. 9-17.
37. Корнеев А. В., Трещев А. А. Учет влияния водосодержащей среды на напряженно-деформированное состояние материалов на основе титановых сплавов // Известия вузов. Строительство. – 2009. – №3. – С. 23-29.
 38. Корнеев А. В., Трещёв А. А. Модель изгиба прямоугольной пластины, деформирующейся в условиях воздействия водородосодержащей среды // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Проблемы специального машиностроения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 555-562.
 39. Корнеев А. В. Влияние воздействия активных сред на деформирование элементов конструкций. Автореф. дисс. к.т.н., Тула. 2012. 17 с.
 40. Овчинников, И. И. Деформирование и разрушение материалов в водородосодержащей среде, диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния // Интернет-журнал "Наукоедение" №1(14), 2013. 8 с.
 41. Овчинников, И. И. Модели деформирования и замедленного разрушения материалов в водородосодержащей среде // Вестник СГТУ, 2013. №2(70). Вып. 1. С. 178-183.
 42. Овчинников, И. И. Моделирование поведения длинного полого цилиндра в водородосодержащей среде, диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния // Вестник СГТУ, 2013. №2(70). Вып. 1. С. 183-191.
 43. Нефедова О. А. Анализ напряженного состояния плоских элементов конструкций в условиях диффузии водорода. Автореф. дисс. к.т.н. Екатеринбург, 2013.

Lakhdari Assia Amina

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF (USTO-MB), Algerie, Oran
E-mail: kad_dz2000@yahoo.fr

Seddak Aissa

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF (USTO-MB), Algerie, Oran
E-mail: sed_dz@yahoo.fr

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
E-mail: bridgeart@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

National research nuclear university Moscow engineering physics institute
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia, Balakovo
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm
E-mail: bridgesar@mail.ru

Modeling of hydrogen embrittlement of a pipeline as a thin-walled cylindrical shell of a nonlinearly elastic material

Abstract. There are two directions for studying the problem of hydrogen embrittlement: the first is connected with further study of the fundamental foundations and the discovery of micromechanisms and the interrelationship between hydrogen embrittlement and metal aging. The second direction is related to the development of models and methods for predicting the kinetics of the stress-strain state and the evaluation of the durability of structures subjected to hydrogen embrittlement. An analysis of the current state of research on the problem of hydrogen embrittlement of metallic materials in the first direction is carried out. It is pointed out that the mechanisms of hydrogen embrittlement and degradation of properties have not been studied sufficiently, especially with respect to the processes of hydrogen embrittlement and degradation of the mechanical properties of steels for main gas pipelines. The importance of the task of predicting the behavior of loaded metal structures under the influence of hydrogen embrittlement is emphasized. Next, a model of a pipeline in the form of a cylindrical shell loaded with internal pressure and undergoing hydrogen embrittlement is considered. The shell material is considered to be nonlinearly elastic, its properties depend on the hydrogen concentration at the shell point. Equations of deformation of a nonlinear shell without taking into account the influence of hydrogen and taking into account the influence of hydrogen are obtained. To solve the equations, the method of successive approximations is used, and the separation of the principal part in the deformation equation is used. The diagram of bending moments, transverse forces and stresses along the length of the shell, as well as a diagram of the concentration of hydrogen over the shell thickness at different instants of time are given.

Keywords: hydrogen embrittlement; gas pipeline; cylindrical shell; physical nonlinearity; hydrogen effect; modeling