

Овчинников Илья Игоревич
Ovchinnikov Ilya Igorevich
доцент кафедры «Транспортное строительство»
Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.
associate professor
"Transport construction" Saratov state technical university of a name of Gagarin Yu.A.
Доцент
Associate Professor
Кандидат технических наук
E-Mail: BridgeArt@mail.ru

05.23.17 Строительная механика

**Деформирование и разрушение материалов в водородосодержащей среде,
диффузионные характеристики которой зависят
от напряженного состояния**

Deformation and destruction of materials in the hydrogenous environment which
diffusive characteristics depend on a tension

Аннотация: В статье рассмотрено построение модели деформирования и замедленного разрушения материалов, подвергающихся низкотемпературному наводороживанию, учитывающей появление наведенной анизотропии и неоднородности механических свойств. Учитывается влияние схемы напряженного состояния как на механические, так и на диффузионные характеристики материалов.

The Abstract: In article creation of model of deformation and the slowed-down destruction of the materials which are exposed to a low-temperature hydrogenation, the induced anisotropy considering emergence and heterogeneity of mechanical properties is considered. Influence of the scheme of a tension both on mechanical, and on diffusive characteristics of materials is considered.

Ключевые слова: Водород, неоднородность, деградация, длительная прочность, ползучесть, долговечность, водородная коррозия.

Keywords: Hydrogen, heterogeneity, degradation, long-term strength, creep, durability, hydrogen attack.

Данная работа выполнена в рамках работы над грантом РФФИ № 12-01-31130 Мол_а «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями»

Введение

Водородосодержащая среда является фактором, оказывающим деструктирующее воздействие на материалы и конструкции. Причем водород может действовать на конструкции как при высоких температурах и давлениях, так и при нормальных температурах, которые условно называют низкими.

Водород при высоких температурах и давлениях в процессе взаимодействия с материалом конструкций может вызвать так называемую водородную коррозию, при которой происходит обезуглероживание части сечения, приводящее к снижению и кратковременных (предел прочности, модуль упругости, диаграмма деформирования, коэффициент поперечной деформации) и длительных (кривые ползучести, длительной прочности, предел пластичности, предельная деформация) характеристик. В результате в конструкциях изменяется напряжённо-деформированное состояние, снижается их долговечность. Обзор экспериментальных данных по влиянию водорода высоких температур приведен в статье [1]. К настоящему времени разработан ряд моделей деформирования и разрушения конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии, обзор и анализ которых содержится в публикациях [2-4].

В отличие от высокотемпературного водорода, водород при низких температурах оказывает избирательное воздействие на материал конструкций так, что механические свойства не изменяются в сжатых зонах, но изменяются в растянутых, причем величина изменения зависит и от концентрации водорода, и от схемы напряженного состояния в рассматриваемой точке. При одной и той же схеме напряженного состояния большая концентрация водорода вызывает более сильное изменение механических свойств, а при одной и той же концентрации водорода более жесткая схема напряженного состояния вызывает значительное изменение механических свойств.

Обзор и анализ экспериментальных данных по влиянию низкотемпературного наводороживания на механические характеристики материалов, вызывающего коррозионное растрескивание, приведен в работах [5-6].

Анализ показывает, что возможны следующие случаи взаимодействия водорода с металлами:

- во время электрохимических процессов при невысоких температурах, когда атомы водорода адсорбируются на поверхности конструкций и поглощаются металлом (по такому механизму происходит наводороживания при травлении, обезжиривании, нанесении гальванических покрытий);

- во время коррозии, когда происходит химическое освобождение водорода, проникающего затем в металл;

- при непосредственном контакте водорода или водородсодержащих сред с металлом, когда водород проникает в металл под собственным давлением (известны многочисленные аварии на нефтепромыслах, связанных с добычей нефти с большим содержанием водорода, которые приводили к огромным материальным затратам, а иногда и человеческим жертвам).

Такое отрицательное воздействие водорода на механические характеристики металлов приводит к необходимости учета этого воздействия при проектировании и расчете конструкций; в результате будет обеспечена безопасная работа конструкций, будут найдены более эффективные решения для рассматриваемых условий, будет предотвращаться загрязнение окружающей среды.

К настоящему времени разработан ряд моделей для расчета конструкций, подвергающихся наводороживанию.

Б.Ф. Юрайдо [10] предложена методика расчета цилиндрического сосуда с учетом влияния водорода, вида напряженного состояния и температуры на пластичность металла.

В работе [7] построена модель водородного воздействия, учитывающая влияние водорода на растянутую зону конструкции с зависимостью механических свойств от концентрации водорода. В статье [8] предложена модель взаимодействия конструкций с

водородсодержащей средой с учетом влияния не только знака, но и схемы напряженного состояния на кинетику изменения свойств конструкции при взаимодействии с водородом. Трещевым А.А. [9] предложена Теория пластичности материалов, подвергающихся водородному охрупчиванию, приводящему к появлению разносопротивляемости материалов.

Во всех указанных работах предприняты попытки учесть влияние концентрации водорода и схемы напряженного состояния на изменение свойств материалов, но не учтено влияние напряженного состояния на проникание водорода в объем конструкции.

1. Построение модели деформирования и разрушения материалов, подвергающихся наводороживанию

При построении моделей следует учитывать следующие эффекты взаимодействия конструкций с водородом:

- водород проникает в конструкцию по механизму активированной диффузии, причем имеет место диффузия водорода в зоны с преобладанием компонентов растяжения и возможен отсос водорода из зон с преобладанием компонентов сжатия, то есть схема напряженного состояния влияет на кинетику наводороживания;

- проникший в металл водород приводит к снижению его прочности и пластичности в зависимости от концентрации водорода, причем изменение механических свойств зависит от концентрации водорода и не зависит от характера наводороживающей операции;

- вид и уровень напряженного состояния влияют на взаимодействие металла с водородом так, что при преобладании компонентов сжатия металл и после интенсивного наводороживания сохраняет свои свойства, а при преобладании компонентов растяжения прочностные и пластические свойства снижаются, причем с ужесточением схемы напряженного состояния изменения свойств проявляется значительно.

Для построения моделей деформирования и разрушения конструкций, подвергающихся наводороживанию, используется подход, основанный на рассмотрении системы моделей [11]: модели проникания водорода, модели деформирования материала, модели наступления предельного состояния, модели конструктивного элемента.

1.1. Модель проникания водорода в материал конструкции

Кинетика проникания водорода в конструкцию описывается уравнением диффузии вида:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad} C) \quad (1)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями [12]. Здесь D – коэффициент диффузии, являющийся функцией локальных параметров – концентрации C и температуры T , t – время.

Для учета влияния напряженно-деформированного состояния на водородопроницаемость используются различные подходы.

В работе [13] процесс диффузии водорода в поле упругих напряжений предложено описывать уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \left(\frac{DV_H}{RT} \right) \nabla C \nabla \sigma_0 - \left(\frac{DV_H}{RT} \right) C \nabla^2 \sigma_0, \quad (2)$$

где V_H – парциальный молярный объем водорода, $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ – среднее напряжение, R – газовая постоянная. Равновесная концентрация водорода C_δ в полу упругих напряжений σ_0 определяется выражением:

$$C_\delta = C_0 \exp\left(\frac{\sigma_0 V_H}{RT}\right), \quad (3)$$

где C_0 – равновесная концентрация водорода при отсутствии поля напряжений.

В (2) последние два члена учитывают направленную диффузию водорода в зоны с преобладанием компонент растяжения ($\sigma_0 > 0$) и отсос водорода из зон с преобладанием компонент сжатия ($\sigma_0 < 0$). К (3) следует присоединить соответствующие начальное и граничные условия.

Другой подход к учету влияния напряженного состояния на проникание водорода заключается в предположении, что коэффициент диффузии водорода D и предельное водородопоглощение C_* являются функциями специального безразмерного параметра:

$$S = \frac{3\sigma_0}{\sigma_U}, \quad (4)$$

характеризующего схему напряженного состояния, σ_U - интенсивность напряжений.

Значения параметра S для некоторых схем напряженного состояния приведены в табл.

1.

Таблица 1

| Схема напряженного состояния | Двухосное сжатие | Одноосное сжатие | Сдвиг | Одноосное растяжение | Двухосное растяжение |
|------------------------------|------------------|------------------|-------|----------------------|----------------------|
| S | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 |

Выражения для D и C_* принимаются в виде:

$$D = D_0(1 + \alpha S^\beta), \quad (5)$$

$$C_* = C_*^0(1 + \gamma S^\delta), \quad (6)$$

где D_0 и C_*^0 – значения D и C_* в ненапряженном состоянии, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты.

В этом случае уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial \left[\frac{C}{C_*(S)} \right]}{\partial t} = \text{div}(D(S) \text{grad} \left[\frac{C}{C_*(S)} \right]) \quad (7)$$

1.2. Модель деформирования материала с учетом влияния наводороживания

Для построения модели применим деформационную теорию А.А. Ильюшина, основные гипотезы которой скорректированы для учета влияния водорода:

Гипотеза 1: Шаровой тензор деформаций пропорционален шаровому тензору напряжений, а коэффициент пропорциональности является функцией параметра S и концентрации водорода C :

$$\sigma_0 = K(S, C)3\varepsilon_0, \quad (8)$$

где ε_0 – средняя деформация, $K(S, C)$ – объемный модуль упругости.

$$K(S, C) = \begin{cases} K_0, S \leq S_0 \\ K_1(S, C), S > S_0 \end{cases}, \quad (9)$$

$S \leq S_0$ – значение параметра S , соответствующее схеме напряженного состояния с преобладанием компонентов сжатия, при которой начинается деградация свойств металла под влиянием водорода.

Гипотеза 2: В каждой точке тела девиатор напряжений прямо пропорционален девиатору деформаций, в скалярной форме записывается так:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\varepsilon_x - \varepsilon_0); & \tau_{xy} &= \frac{\sigma_u}{3\varepsilon_u} \gamma_{xy}, \\ \sigma_y - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\varepsilon_y - \varepsilon_0); & \tau_{yz} &= \frac{\sigma_u}{3\varepsilon_u} \gamma_{yz}, \\ \sigma_z - \sigma_0 &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} (\varepsilon_z - \varepsilon_0); & \tau_{zx} &= \frac{\sigma_u}{3\varepsilon_u} \gamma_{zx}. \end{aligned} \quad (10)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – компоненты тензора напряжений, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – компоненты тензора деформаций.

Гипотеза 3. Принимается, что интенсивность напряжений σ_u является функцией интенсивности деформаций ε_u , параметра схемы напряженного состояния S и концентрации водорода C :

$$\sigma_u = \varphi(\varepsilon_u, S, C) \quad (13)$$

причем эта функция имеет вид:

$$\varphi(\varepsilon_u, S, C) = \begin{cases} \varphi_0(\varepsilon_u); & S \leq S_0 \\ \varphi_1(\varepsilon_u, S, C), & S > S_0 \end{cases}, \quad (14)$$

Очевидно для определения функций $\varphi_0(\varepsilon_u)$ и $\varphi_1(\varepsilon_u, S, C)$ нужны экспериментальные кривые деформирования металла при разных схемах напряженного состояния S и концентрации водорода C в образцах.

В частном случае можно принять:

$$\varphi_1(\varepsilon_u, S, C) = \varphi_0(\varepsilon_u) \cdot \gamma(S, C), \quad (15)$$

где $\varphi_0(\varepsilon_u)$ – функция, аппроксимирующая кривую деформирования материала при $S \leq S_0$, а функция влияния схемы напряженного состояния и концентрации водорода $\gamma(S, C)$ задается в виде:

$$\gamma(S, C) = \begin{cases} 1 & \text{при } S \leq S_0 \\ \exp[-kC^a(S - S_0)^b], & \text{при } S > S_0 \end{cases} \quad (16)$$

Здесь k, a, b – некоторые константы.

Вид функции $\gamma(S, C)$ в форме (16) был предложен в работе [8] на основе анализа экспериментальных данных по влиянию схемы напряженного состояния и концентрации водорода на механические свойства материалов.

1.3. Модель наступления предельного состояния

Большое внимание задаче построения моделей предельного состояния конструкций в условиях наводороживания уделено А.А. Трещевым [9]. Мы при построении модели предельного состояния будем учитывать тот экспериментально наблюдаемый факт, что

материал, находящийся в пластичном состоянии до наводороживания под влиянием водорода охрупчивается. Для учета этого эффекта введем параметр охрупчивания:

$$\xi(S, C) = \sigma_B(S, C) / \sigma_B^0, \quad (17)$$

представляющий собой отношение предела прочности материала после водородного воздействия $\sigma_B(S, C)$ к исходному пределу прочности σ_B^0 ненаводороженного материала.

При отсутствии водородного воздействия $\sigma_B(S, C) = \sigma_B^0$ и параметр охрупчивания $\xi=1$. При действии водорода на напряженный материал происходит уменьшение $\sigma_B(S, C)$ и параметр ξ уменьшается.

По аналогии с (15) можно принять:

$$\sigma_B(S, C) = \sigma_B^0 \psi(S, C), \quad (18)$$

где $\psi(S, C)$ – функция влияния вида (16).

Условие прочности материала, подвергающегося наводороживанию. Примем в форме:

$$\sigma_U \xi + (1 - \xi) \sigma_1 \leq \sigma_B(S, C), \quad (19)$$

Видно, что при $\xi=1$ условие (19) превращается в условие прочности пластичного материала $\sigma_U \leq \sigma_B^0$, а при водородном охрупчивании по мере уменьшения параметра ξ включается второе слагаемое в условии (19), отражая процесс водородного охрупчивания. Принимая во внимание (17) выражение (19) можно преобразовать к виду:

$$\sigma_U + \left(\frac{1}{\xi} - 1\right) \sigma_1 \leq \sigma_B^0, \quad (20)$$

Если, наконец, учесть (18) и (16), то окончательно условие прочности запишется в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_U &\leq \sigma_B^0 \text{ при } S \leq S_0 \\ \sigma_U + \{\exp[kC^\alpha(S - S_0)^b] - 1\} \sigma_1 &\leq \sigma_B^0 \text{ при } S > S_0 \end{aligned} \quad (21)$$

1.4. Модель замедленного разрушения металлов в среде водорода

Под замедленным разрушением конструкций в условиях водородного воздействия будем понимать процесс накопления дисперсных повреждений, кинетика которого определяется схемой напряженного состояния и концентрацией водорода.

При моделировании замедленного разрушения в водороде будем полагать справедливым следующие гипотезы:

а) влияние водорода на механические свойства металлов одинаковы как при кратковременном, так и при длительном нагружении;

б) в случае преобладания компонентов сжатия ($S \leq S_0$) металл сохраняет свои длительные свойства независимо от концентрации водорода;

в) в случае преобладания компонентов растяжения ($S > S_0$) длительные механические свойства под влиянием водорода снижаются, причем степень снижения возрастает с увеличением жесткости схемы напряженного состояния S и концентрации водорода C .

Для описания кинетики замедленного разрушения можно использовать либо подход Л.М. Качанова, основанный на использовании параметра сплошности ψ , либо подход Ю.Н. Работнова, основанный на использовании параметра поврежденности Π , либо подход

А.Р.Ржаницына, основанный на использовании понятия мгновенной прочности материала R [14].

Так как в процессе взаимодействия металла конструкций с водородом происходит изменение механических свойств, приводящее к изменению напряженно-деформированного состояния конструкции, то для описания замедленного разрушения логично использовать модель накопления повреждений В.В. Москвитина [15], которая пригодна для случаев как стационарного, так и нестационарного напряженного состояния.

Модель В.В. Москвитина применительно к случаю замедленного разрушения металла в водороде имеет вид:

$$\Pi = \int_0^t (t - T)^m \eta[\sigma_3(\tau), S(\tau), C(\tau)] d\tau, \quad (22)$$

Функция $\eta[\sigma_3, S, C]$ в этом уравнении может быть принята в виде:

$$\eta[\sigma_3, S, C] = \frac{m(S,C)+1}{t_p^{m(S,C)+1}(\sigma_3)}, \quad (23)$$

причем зависимость времени до разрушения t_p от эквивалентного напряжения (кривая длительной прочности) аппроксимируется следующей функцией:

$$t_p(\sigma_3) = \frac{A(S,C)}{\sigma_3^{b(S,C)}} \quad (24)$$

Подставляя (23) с учетом (24) в (22) запишем:

$$\Pi = \int_0^t \frac{[m(S,C)+1] \sigma_3^{b(S,C)[m(S,C)+1]}}{[A(S,C)+1]^{[m(S,C)+1]}} (t - T)^{m(S,C)} d\tau, \quad (25)$$

Как видно, влияние водородного воздействия учитывается через зависимость коэффициентов A, b, m от параметра схемы напряженного состояния S и концентрации водорода C.

В случае преобладания компонентов сжатия ($S \leq S_0$) уравнение (25) упрощается и приводится к виду:

$$\Pi = \frac{m_0+1}{A_0^{m_0+1}} \int_0^t \sigma_3^{b_0(m_0+1)} (t - T)^{m_0} d\tau, \quad (26)$$

где коэффициенты A_0, b_0, m_0 соответствуют металлу в ненаводороженном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Влияние водородсодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них // Интернет-журнал «Науковедение», 2012, №4. <http://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf>. –М. С. 1-28.
2. Бубнов А.А., Бубнов С.А., Овчинников И.И. Моделирование напряженного состояния и разрушения толстостенных трубопроводов в условиях водородной коррозии и неоднородного теплового поля. М. Горячая линия – Телеком. 2011. 135 с.(монография).
3. Бубнов С.А., Овчинников И.И., Бубнов А.А. Исследование разрушения и кинетики обезуглероживания толстостенной трубы в условиях водородной коррозии// Вестн. Сам. Гос. Техн. Ун-та. 2012. №1 (26). С. 1-9.
4. Овчинников И.И. Напряженно - деформированное состояние и долговечность толстостенного трубопровода в условиях воздействия неоднородного теплового поля и водородной коррозии//Строительная механика и расчет сооружений. 2012. №4. с. 16-20.
5. Кабанин В.В., Мавзовин В.С., Овчинников И.И., Мавзовина С.Н. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций. Саратов. Изд-во СГУ. 2006. 124 с.
6. Овчинников И.И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание // Интернет-журнал «Науковедение», 2012, №4. <http://naukovedenie.ru/PDF/38tvn412.pdf>. –М. С. 1-30.
7. Кириллова Л.А., Овчинников И.Г. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию. Саратов. Политехн. Ин-т. Саратов, 1989. Рукопись деп. В ВИНТИ 7.02.90. №698-В90.
8. Овчинников И.Г., Рассада А.Б. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородсодержащей средой и ее приложения // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. Саратов. Политех. ин-т. Саратов, 1989. С.12-16.
9. Полтавец П.А., Трещев А.А. К теории пластичности материалов, подверженных водородному охрупчиванию // Известия ВУЗов. Строительство. 2006. №1 (565). С. 18-23.
10. Юрайдо Б.Ф. К расчету статической несущей способности цилиндрического элемента сосуда, находящегося под внутренним давлением водорода // Исследования по механике деформируемых сред. Иркутск. Изд-во ИПИ. 1982. С.136-139.
11. Овчинников И.И., Мигунов В.Н. Применение теории структурных параметров к моделированию взаимодействия железобетонных элементов конструкций транспортных сооружений с агрессивными средами// Дороги и мосты. М. Росдорнии. 2012. Вып.27.
12. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. М.: Энергия. 1978. 479 с.
13. Akhurst K.N., baker T.I. The threshold stress intensity for hydrogen-induced crack growth. J.Met.Trans, 1981. A12. P.1059-1070.
14. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры с использованием теории длительной прочности А.Р. Ржаницына // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009, №2, с.19-24.
15. Москвитин В.В. Соппротивление вязкоупругих материалов (применительно) к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе. М. Наука. 1972. 328 с.

Рецензент: Петров Владилен Васильевич, заведующий кафедрой «Теория сооружений и строительных конструкций» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А., академик РААСН, д-р. техн. наук, профессор