

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ РАСЧЕТЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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

Камышинский технологический институт (филиал) «Волгоградского государственного технического университета», Камышин, Волгоградская обл., Россия (403874 г. Камышин Волгоградской обл., ул. Ленина, 6а) e-mail: popov@kti.ru

Проведен анализ трех распространенных феноменологических моделей воздействия водорода высоких параметров на тонкостенные многослойные стальные оболочки и пластины, работающие в условиях силовых и тепловых нагрузок и агрессивной водородосодержащей среды, что является типичным для энергетического оборудования. Определены области использования этих моделей, показано, что в определенных случаях возможно упрощение модели, позволяющее использовать меньший объем контролируемых данных о текущем состоянии материала конструкции, при этом упрощая трудоемкость контроля и прогнозирования долговечности конструкции. На основании построенных моделей разработана методика и программный комплекс, позволяющие исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно-деформированного состояния однослойных и многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, а также оценивать их несущую способность и долговечность.

Ключевые слова: многослойные стальные пластины, высокотемпературная водородная коррозия, высокотемпературная ползучесть.

ON THE USE OF DIFFERENT MODELS ACCOUNTING FOR THE EFFECTS OF HYDROGEN-ENVIRONMENT IN CALCULATING CARRYING CAPACITY OF STEEL SHELL STRUCTURES

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

Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University (403876, Kamyshin, Volgograd reg., Russia, Lenin str. 5a) e-mail: popov@kti.ru

The analysis of three common phenomenological models of the impact of high parameters hydrogen on thin walled multi-layer steel shells and plates working under power heat loads and in the corrosive hydrogen-containing medium, which is typical of the power equipment has been carried out. The ranges of these models have been defined, it is shown that in certain cases it is possible to simplify the model, which allows a smaller amount of monitoring data about the current state of the construction material, while simplifying the complexity of control and prediction of the structure durability. Based on the technique models and a software package, allowing to investigate of the history of changing axisymmetric elastic stress - strain state of single-layer and multilayer revolution shells taking into account the failure rate of materials at high temperature creep and hydrogen corrosion, as well as to assess their load-bearing capacity and durability are developed.

Key words: multilayer steel plates, high temperature corrosion, high temperature creep.

В течение достаточно длительного периода времени авторами проводились исследования поведения различных оболочечных конструкций, испытывающих воздействие силовых и тепловых нагрузок, а также высокотемпературной водородной коррозии [2, 6, 7]. При этом коррозионное воздействие водорода на стали в настоящее время изучено достаточно хорошо, и на эту тему имеется множество публикаций [1, 4, 5]. В этих работах показано, что влияние водорода существенным образом сказывается на изменении вида диаграммы деформирования углеродистых сталей, при этом снижаются прочностные и пластические свойства сталей, и происходит их охрупчивание. Особенно сильно ухудшаются длительные

прочностные характеристики сталей.

Целью настоящей работы является обобщение существующих подходов к учету влияния высокотемпературной водородной коррозии и практическая реализация этих подходов в составе разработанной авторами методики решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности стальных оболочек вращения с учетом необратимых деформаций и повреждаемости материалов [2, 6, 7].

Обобщенная модель химического взаимодействия

Предполагается, что влияние водорода, контактирующего с материалом конструкций, проявляется по истечении определенного времени, называемого инкубационным периодом $t_{инк}$. После завершения инкубационного периода начинается интенсивное обезуглероживание материала конструкции, сопровождающееся ухудшением его механических свойств. При этом механические свойства материалов могут существенно изменяться. Этот период называется периодом активных химических превращений $t_{кр}$. По завершении указанного периода дальнейших изменений механических свойств сталей под воздействием водорода не происходит.

Влияние водорода на свойства материала в данной модели представляется в виде дифференциального уравнения для параметра химического взаимодействия водорода с материалом конструкции μ , изменяющегося от μ_0 до $\mu_{кр}$, принадлежащего интервалу (0; 1) и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии [5]:

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

с условиями:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad \mu &= \mu_0(p, T, \omega_c); \\ t = t_{инк}, \quad \mu &= \mu_{п}(p, T, \omega_c); \\ t = t_{кр}, \quad \mu &= \mu_{кр}(p, T, \omega_c). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $k(p, T, \omega_c)$ – коэффициент, учитывающий влияние давления p , температуры T и степени поврежденности ω_c на кинетику химических превращений, приводящих к деградации физико-механических свойств материала.

Решение уравнения (1) имеет вид [5] (кривая 1 на рис. 1):

$$\mu(t) = \frac{1}{1 + g_0 e^{-kt}}, \quad (3)$$

$$g_0 = (1 - \mu_0) / \mu_0; \quad (4)$$

$$k(p, T, \omega) = \frac{p^u}{m \cdot (1 - \omega_c)^5} \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \cdot \ln \frac{g_0}{g_{п}}; \quad (5)$$

$$g_{II} = (1 - \mu_{II}) / \mu_{II}, \quad (6)$$

где m , u , B , ζ – константы, экспериментально определяемые для различных марок стали. Значения μ_0 , μ_{II} и μ_{KP} определяются по методике, изложенной в работах [3, 5], и связаны с анализом кинетики выделения метана при взаимодействии водорода с углеродом, содержащемся в материале стенки.

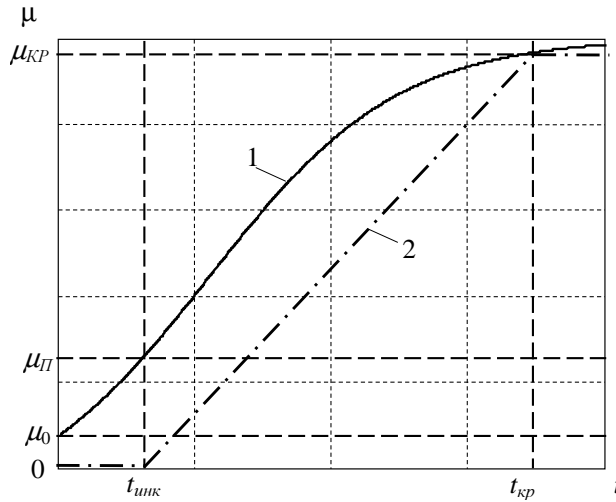


Рис. 1.

При этом учете влияния уровня напряжений на длительность инкубационного периода и скорость высокотемпературной коррозии вводится зависимость коэффициента m от σ в виде:

$$m = m_0 \exp(G \cdot \sigma_{\mathcal{E}}^g); \quad \sigma_{\mathcal{E}} = \begin{cases} \sigma_i, & \text{при } \sigma_{cp} > 0 \\ 0, & \text{при } \sigma_{cp} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Здесь: m_0 , G , g – константы материала; $\sigma_{\mathcal{E}}$ – эквивалентное напряжение, σ_i – интенсивность нормальных напряжений, σ_{cp} – среднее напряжение.

Распределение давления по толщине оболочки вычисляется [5]:

для плоской стенки:

$$P_z = \left(\sqrt{P_B} \cdot \left(1 - \frac{z}{h} \right) + \sqrt{P_H} \cdot \frac{z}{h} \right)^2, \quad (8)$$

для оболочки:

$$P_{\rho} = \left(\sqrt{P_B} + \left(\sqrt{P_H} - \sqrt{P_B} \right) \cdot \frac{\ln(\rho/r_B)}{\ln(r_H/r_B)} \right)^2, \quad (9)$$

где: z – плоская координата; ρ – сферическая координата; h – толщина оболочки; r_B – внутренний радиус оболочки; r_H – наружный радиус оболочки; P_B – внутреннее давление; P_H – наружное давление.

Упрощенная модель химического взаимодействия

Так как $t < t_{инк}$ изменений механических свойств материалов еще не происходит, а при $t > t_{кр}$ уже не происходит [5], то логистическую кривую Ферхюльста можно аппроксимировать трехзвенной линией (на рис. 1 линия 2).

В этом случае влияние водорода на свойства материала будет описываться в виде кусочно-линейного закона для параметра химического взаимодействия водорода μ , изменяющегося от 0 до 1 и характеризующего степень поражения материала вследствие водородной коррозии:

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_{инк}; \\ (t - t_{инк}) / (t_{кр} - t_{инк}), & \text{при } t_{кр} < t < t_{инк}; \\ 1, & \text{при } t \geq t_{кр}; \end{cases} \quad (10)$$

Длительность инкубационного периода, как показано в работе [4], определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_{инк} = m p^{-u} \exp(B/T), \quad (11)$$

где p – парциальное давление водорода, МПа; T – температура; m , u , B – некоторые константы, экспериментально определяемые для различных марок стали.

Длительность периода активных химических превращений определяем следующим образом [3, 5]:

$$t_{кр} = \lambda t_{инк}, \quad (12)$$

где: λ – параметр, являющийся мерой скорости химического взаимодействия водорода с конструкцией, показывающий, во сколько раз время до завершения периода изменений механических свойств материала отличается от продолжительности инкубационного периода, т.е. $\lambda = t_{кр} / t_{инк}$. Для стали 20 этот параметр принимает значения в пределах от 5 до 10 [3, 5].

В том случае, если известно, что процесс обезуглероживания конструкции значительно короче времени до начала разрушения, можно использовать еще более простые модели воздействия водородосодержащей среды. В частности, замену логистической кривой, описывающей плавное изменение механических характеристик, на ступенчатое их изменение от начального до конечного состояния, по прошествии либо инкубационного периода, либо периода активных химических превращений.

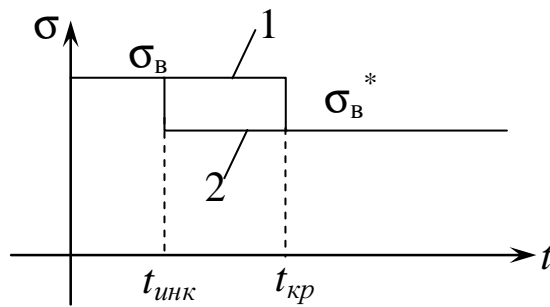


Рис. 2.

На рис. 2 схематически показан примерный характер изменения временного сопротивления стали 20 вследствие воздействия водорода. Здесь σ_B и σ_B^* – соответственно значения временного сопротивления материала в исходном и обезуглероженном состоянии. Другие механические характеристики материала (E , σ_T , δ , ψ) изменяются в процессе обезуглероживания аналогичным образом [3, 5].

При использовании варианта 1 считается, что механические характеристики ступенчато изменяются по истечении периода времени, соответствующего $t_{кр}$, а в варианте 2 это изменение происходит сразу же после завершения инкубационного периода, то есть при $t_{кр} = t_{инк}$. При этом вариант 1 дает завышенную оценку времени обезуглероживания, а вариант 2 – заниженную. Кроме того, в варианте 2 не требуется нахождения параметра λ .

Учет влияния напряжений на скорость коррозии и распределение давлений осуществляется так же, как и в обобщенной модели.

Модель оценки кинетики движения фронта обезуглероживания

Предполагается, что воздействие водорода на материал начинается с поверхности оболочки, непосредственно контактирующей с водородосодержащей средой, и проявляется в обезуглероживании материала. По мере проникновения водорода в материал этот процесс распространяются в глубь конструкции с образованием области обезуглероженного материала. Поверхность, разграничивающую области материалов в исходном и обезуглероженном состоянии, будем называть фронтом обезуглероживания.

Кинетика перемещения фронта обезуглероживания будет определяться следующими выражениями [5]:

для пластины:

$$\frac{z}{h} = 1 - \left[\frac{k \cdot \lambda \cdot \exp(Q/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot P''} \right]^{\frac{1}{2-n}}, \quad (13)$$

для оболочки:

$$z = r_{\text{в}} \left[\left(1 + \frac{h}{r_{\text{в}}} \right)^f - 1 \right], \quad f = 1 - \left[\frac{k \cdot \lambda \cdot \exp(Q/T)}{t_{\text{фронта}} \cdot P^u} \right]^{\frac{1}{2 \cdot u}}, \quad (14)$$

где z – глубина обезуглероживания, отсчитываемая от поверхности контакта оболочки с водородом; $t_{\text{фронта}}$ – время, для которого определяется глубина обезуглероживания.

Эта модель построена на основе упрощенной модели химического взаимодействия, целью ее разработки была возможность использования при аналитических расчетах, однако она может использоваться только для некоторых несложных моделей пластин и оболочек и неспособна учитывать нестационарный характер изменения тепловых, силовых нагрузок и давления водорода, а также влияние уровня напряжений на скорость движения фронта обезуглероживания.

В действительности моделей воздействия водородосодержащей среды значительно больше, наиболее распространенные из них подробно рассмотрены в работах [3, 5]. Здесь же приведены только те модели, которые могут использоваться в составе разработанного авторами программного комплекса по расчету напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций [2, 6, 7].

Технически учет влияния водорода на прочностные свойства конструкции реализован следующим образом. Для каждого из материалов конструкции введены механические характеристики двух его состояний – исходного и обезуглероженного.

Процесс нагружения оболочки будем разбивать на ряд малых по времени этапов Δt , в течение которых эти параметры можно принять постоянными, причем длительность этапов также может изменяться в зависимости от скорости изменения давления и температуры. Оболочку разбиваем на малые элементы, напряженно-деформированное состояние, а также степени поврежденности и обезуглероживания которых можно принять однородными. На каждом этапе нагружения и для каждого элемента оболочки будет вычисляться приращение $\Delta \mu(\Delta t)$ по формулам (3) – (6), если используется обобщенная модель химического взаимодействия и (10) если упрощенная. Если процесс обезуглероживания отсутствует (инкубационный период не завершен), то для расчета параметров напряженно-деформированного состояния берутся исходные механические характеристики материала. Если в материале уже происходит процесс обезуглероживания, но он еще полностью не завершен, то значения механических характеристик материала на этой стадии расчета вычисляются путем линейной интерполяции в зависимости от текущего значения $\mu(t)$ между исходным и обезуглероженным состояниями. Если процесс обезуглероживания завершен, то для расчета берутся характеристики обезуглероженного материала.

В случае использования упрощенной модели химического взаимодействия со

ступенчатым переходом к обезуглероженному состоянию для каждого элемента оболочки по формуле (12) вычисляется значение $t_{кр}$, при наступлении которого и осуществляется переход к обезуглероженному состоянию.

С использованием этого подхода авторами разработана методика, позволяющая исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно-деформированного состояния однослойных и многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, а также оценивать их несущую способность и долговечность. Использование этой методики позволит решать целый ряд важных технических задач, таких как расчет на прочность, оценка несущей способности, долговечности и остаточного ресурса, а также задачи проектирования оптимальных конструкций, применяемых в энергетическом и химическом машиностроении.

Список литературы

1. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с.
2. Белов А. В. Осесимметричное упругопластическое напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Киев, 1989. – 18 с.
3. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
4. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.
5. Овчинников И. Г., Хвалько Т. А. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии. – Саратов, 2003. – 176 с.
6. Поливанов А. А. Осесимметричное упругопластическое деформирование многослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 19 с.
7. Bagmutov V., Belov A., Polivanov A. Damage Calculation Features of Multi-layered Shells of Rotation at Thermo – Viscous – Elasto – Plastic Strain // МЕХАНИКА. – 2004. – No 3(47). – P. 19 - 23.

Рецензенты:

Богданов Евгений Павлович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и технологии» ФГОУ ВПО Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия, г. Волгоград.

Овчинников Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор, ФГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.», г. Саратов.

