

УДК 539.2

РАСЧЕТ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ

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

Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Камышин

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

На основе системного подхода разработана методика решения комплексной задачи по оценке прочности и долговечности многослойных стальных оболочек вращения и пластин с учетом необратимых деформаций, повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии.

1. Введение

В настоящее время в химической промышленности и энергетике широко применяются элементы стальных конструкций, выполненные в виде однослойных и многослойных оболочек вращения. Такие конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию силовых и тепловых нагрузок, а также различных агрессивных сред, вызывающих коррозию материала. При этом достаточно распространенным видом коррозии является высокотемпературная водородная коррозия сталей. Воздействие водорода на стальные конструкции может приводить к обезуглероживанию материалов, из которых они изготовлены, что проявляется в существенном снижении их жесткости, мгновенной и длительной прочности и пластичности. Этот процесс идет тем интенсивнее, чем выше температура, давление водорода и уровень действующих напряжений. Подобная деградация механических свойств материалов вследствие водородной коррозии существенно ослабляет конструкцию и может привести к возникновению в зонах концентрации напряжений пластических деформаций и развитию деформаций ползучести и в конечном итоге к нарушению несущей способности конструкции в целом. Поэтому, для достоверной оценки работоспособности конструкций, находящихся в условиях термосилового нагружения и воздействия водородосодержащей среды необходимо иметь возможность

численного моделирования изменения их напряженно-деформированного состояния с одновременным учетом всех действующих факторов.

Наиболее продуктивным подходом к решению таких задач с точки зрения эффективности и достоверности получаемых результатов является подход, заключающийся в поэтапном их решении. При этом на первом этапе задача решается в достаточно простой постановке (с учетом отдельных факторов воздействия) и после анализа полученных результатов осуществляется переход к ее решению в более сложной постановке. В итоге выполняется расчет с учетом всех действующих факторов и особенностей поведения материала. В ходе поэтапного решения задачи на основе анализа получаемых результатов могут выбираться модели и гипотезы, наиболее адекватно описывающие закономерности поведения материала применительно к рассматриваемым условиям нагружения.

2. Методика расчета оболочек вращения

Для определения несущей способности и долговечности конструкций в виде тонких однослойных и многослойных оболочек вращения будем использовать методику расчета, разработанную авторами и изложенную в работах [1, 2, 3]. Данная методика позволяет исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно – деформированного состояния однослойных и много-

слойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и оценивать их несущую способность и долговечность.

При этом решение поставленной задачи возможно в следующих постановках:

- Термоупругая постановка задачи.
- Термоупругопластическая постановка задачи.
- Термовязкоупругопластическая постановка задачи без учета повреждаемости материалов при ползучести.
- Термовязкоупругопластическая постановка задачи с учетом повреждаемости материалов при ползучести.
- Термовязкоупругопластическая постановка задачи с учетом повреждаемости материалов при ползучести и с исследованием стадии распространения разрушения.

Кроме того, каждая из приведенных постановок задачи предполагает возмож-

ность учета высокотемпературной водородной коррозии.

3. Учет высокотемпературной водородной коррозии

Учет влияния высокотемпературной водородной коррозии на механические свойства материалов осуществляется с использованием одной из трех моделей воздействия на оболочку водородосодержащей среды [5]:

3.1. Упрощенная модель химического взаимодействия

Предполагается, что влияние водорода, контактирующего с материалом конструкций, проявляется по истечении определенного времени, называемого инкубационным периодом, длительность которого определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_{инк} = m p^{-u} \exp(B/T), \quad (1)$$

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

После завершения инкубационного периода начинается интенсивное обезуглероживание материала конструкции, со-

провождающееся ухудшением его механических свойств. При этом механические свойства материалов могут существенно изменяться. Этот период называется периодом активных химических превращений, длительность которого можно определить следующим образом [4,5]:

$$t_{кр} = \lambda t_{инк}, \quad (2)$$

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. $\lambda = t_{кр}/t_{инк}$.

$$m = m_0 \exp(G \cdot \sigma_{\text{э}}^g); \quad \sigma_{\text{э}} = \begin{cases} \sigma_i, & \text{при } \sigma_{cp} > 0 \\ 0, & \text{при } \sigma_{cp} \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

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

Для стали 20 этот параметр принимает значения в пределах от 5 до 10 [4,5].

Для учета влияния уровня напряжений на длительность инкубационного периода и скорость высокотемпературной коррозии вводится зависимость коэффициента m от σ в виде [5]:

Распределение давления по толщине оболочки вычисляется: для плоской стенки:

$$P_z = \left(\sqrt{P_B} \cdot \left(1 - \frac{z}{h} \right) + \sqrt{P_H} \cdot \frac{z}{h} \right)^2, \quad (4)$$

для оболочки:

$$P_\rho = \left(\sqrt{P_B} + \left(\sqrt{P_H} - \sqrt{P_B} \right) \cdot \frac{\ln(\rho/r_B)}{\ln(r_H/r_B)} \right)^2, \quad (5)$$

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.

3.2. Обобщенная модель химического взаимодействия

Влияние водорода на свойства материала представляется в виде дифференци-

$$\frac{d\mu}{dt} = k \cdot \mu(1 - \mu) \quad (6)$$

с условиями:

$$t = 0, \mu = \mu_0(p, T); t = t_{инк}, \mu = \mu_{II}(p, T); t = t_{кр}, \mu = \mu_{кр}(p, T).$$

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

Распределение давления по толщине оболочки и учет влияния уровня напряжений на скорость высокотемпературной коррозии вычисляются также, как и в модели 3.1.

3.3. Модель оценки кинетики движения фронта обезуглероживания

Предполагается, что воздействие водорода на материал начинается с поверх-

ального 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]:

ности оболочки, непосредственно контактирующей с водородосодержащей средой, и проявляется в обезуглероживании материала. По мере проникновения водорода в материал этот процесс распространяется 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:

$$\frac{z}{h} = 1 - \left[\frac{k \cdot \lambda \cdot \exp(Q/T)}{t_{фронта} \cdot P^u} \right]^{\frac{1}{2-u}}, \quad (8)$$

для оболочки:

$$z = r_B \left[\left(1 + \frac{h}{r_B} \right)^f - 1 \right], \quad f = 1 - \left[\frac{k \cdot \lambda \cdot \exp(Q/T)}{t_{фронта} \cdot P^u} \right]^{\frac{1}{2-u}}, \quad (9)$$

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

Более подробно модели воздействия на оболочку водородосодержащей среды описаны в работах [7, 8, 9].

Пример расчета

В качестве примера рассмотрим напряженно – деформированное состояние кольцевой пластины, находящейся под воздействием давления водорода. Пластина изготовлена из материала сталь 20 и имеет следующие геометрические разме-

ры: $R = 110$ мм, $r = 65$ мм, $\delta = 10$ мм (рис. 1). Давление водорода осуществляется на верхнюю поверхность пластины, при этом внешний и внутренний кольцевые контуры имеют шарнирно – неподвижное опирание.

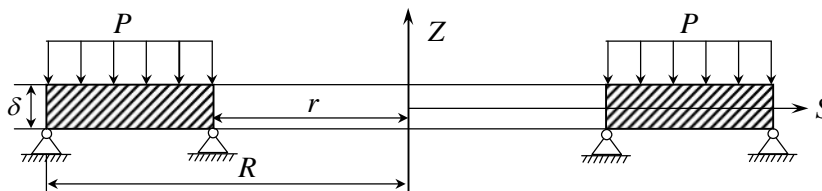


Рис. 1.

В работах [7, 8, 9] было исследовано напряженно – деформированное состояние пластины, равномерно нагретой до температуры 500°C и находящейся под давлением $P = 5$ МПа. Константы материала в соотношениях (1) – (9) были взяты из работы [5]. Расчеты проводились с использованием модели химического взаимодействия 3.3.

В настоящей работе проведем расчеты этой же конструкции при таких же условиях нагружения с использованием моделей 3.1 и 3.2, и сравним полученные результаты.

Расчеты пластины без учета водородной коррозии показали, что макси-

мальные значения интенсивности напряжений не превышают пределов текучести, ползучести и длительной прочности материала, то есть при этом в ее материале не возникает пластических деформаций и не происходит накопление деформаций ползучести и повреждаемости. Если не учитывать влияние высокотемпературной водородной коррозии, рассматриваемая пластина имеет практически неограниченный ресурс. В результате расчета пластины с использованием моделей учета влияния водородной коррозии 3.1. – 3.3. были получены следующие результаты (таблица 1):

Таблица 1.

Вид модели	Значения параметров модели				Учет влияния σ на скорость процесса обезуглероживания	Время до разрушения t_L^* , ч.
	μ_0	$\mu_{П}$	$\mu_{КР}$	λ		
3.1.	-	-	-	1 ($t_{кр}=t_{инк}$)	нет	3920,0
	-	-	-	5	нет	4826,0
	-	-	-	5	да	4479,0
3.2.	0,15	0,218	0,218	-	нет	3225,4
	0,15	0,218	0,915	-	нет	5215,0
	0,15	0,218	0,915	-	да	4953,0
3.3.	-	-	-	5	нет	4510,0

Как видно из таблицы 1, использование в расчетах различных моделей высокотемпературной водородной коррозии дает различные значения времени до разрушения оболочки. Так, в рассмотренных задачах это отличие превышает 60%.

В точках нижней поверхности пластины возникают преимущественно растягивающие меридиональные и окружные напряжения. Наиболее напряженными точками нижней поверхности пластины является точки, отстоящие от края отверстия на расстоянии 20 мм (то есть точки с

координатой $S = 85$ мм). При этом на верхней поверхности пластины, подверженной действию водорода, имеют место преимущественно сжимающие напряжения. По мере обезуглероживания материала пластины происходит снижение его прочностных свойств. Это приводит к перераспределению напряжений в тех зонах пластины, в которых материал обезуглерожен и возникают необратимые деформации. При этом в точках нижней поверхности пластины напряжения возрастают до значений, превышающих предел ползучести, что вызывает развитие деформаций ползучести и накопление повреждений в материале. В результате к моменту времени $t = t_L^*$ в наиболее напряженных точках ($S = 85$ мм, $Z = -0,5$ мм) происходит разрушение материала вследствие ползучести и этот момент времени принят за время разрушения конструкции.

Заключение

Разработанная методика позволяет исследовать историю изменения осесимметричного упругопластического напряженно – деформированного состояния однослойных и многослойных стальных оболочек вращения с учетом повреждаемости материалов при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии, а также оценивать их несущую способность и долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. 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.
2. Поливанов А.А. Осесимметричное упругопластическое деформирование мно-

гослойных оболочек вращения с учетом повреждаемости материала при ползучести: Автореферат дисс. канд. техн. наук. – Волгоград, 2004. – 19 с.

3. V. Bagmutov, A. Belov, A. Polivanov Damage Calculation Features of Multilayered Shells of Rotation at Thermo – Viscous – Elasto – Plastic Strain // МЕХАНИКА, 2004, No 3(47) – p. 19 – 23.

4. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. М.: Металлургия, 1985. 192 с.

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

6. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. - М.: Наука, 1966. - 752 с.

7. Белов А. В. Поливанов А. А. Попов А. Г. Оценка работоспособности многослойных пластин и оболочек с учетом повреждаемости материалов вследствие ползучести и высокотемпературной водородной коррозии // Современные проблемы науки и образования, 2007, №4 - С. 80-85.

8. Белов А. В. Поливанов А. А. Попов А. Г. Analysis of stress and strain state of plates and shells with due consideration of materials damageability thanks to time-dependent deformation and high-temperature hydrogen corrosion // European journal of natural history, 2007 No 4 - 148-150.

9. Белов А. В. Поливанов А. А. Попов А. Г. Длительная прочность вращающейся конической оболочки переменной жесткости с учетом повреждаемости материала при ползучести и высокотемпературной водородной коррозии // Современные проблемы науки и образования. Академия естествознания, 2008, №1 - С. 48-53.

CALCULATION OF PLATES AND SHELLS WITH TAKING INTO ACCOUNT DAMAGEABILITY OF MATERIAL TO CREEPING AND TEMPERATURE HYDROGEN – TYPE CORROSION

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

Kamyshin technological institute (branch) of Volgograd state technical university, Kamyshin

On the of the system approach a procedure of the solution to the complex problem designed and durability of multilayer steel shells and plates in view of irreversible deformation, damageability of materials owing to creep and high – temperature hydrogen – type corrosion was developed.