

проходящая по осям дебалансных валов вибровозбудителя, образует острый угол с рабочей поверхностью нижней щеки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсберг, Л.А. Вибрационные дробилки. Основы расчёта, проектирования и технологического применения / Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин.-СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.-306 с.

2. Потураев, В.Н. Вибрационные транспортирующие машины / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, А.Г. Червоненко. М.: Машиностроение, 1964.-270 с.

УДК 624.074.4:681.3:539.4

РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ИХ НАВОДОРАЖИВАНИЯ

Г.В. Филатов

доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина, e-mail: filatovgv@mail.ru

Аннотация. Исследуется поведение тонкостенной цилиндрической оболочки в условиях наводороживания. Формулируются уравнения коррозионного процесса и разрушения стенки оболочки в результате водородного охрупчивания. Приводится номограмма, позволяющая определять время существования оболочки до разрушения в зависимости от начальной толщины стенки оболочки и показателя охрупчивания.

Ключевые слова: наводороживание, водородное охрупчивание, долговечность конструкций.

CALCULATION OF STRUCTURES DURABILITY ON IT HYDROGENATION CONDITION

G.V. Filatov

Ph.D., Professor, Department of Materials Science, State Higher Educational Institution "Ukrainian State University of Chemical Technology", Dnepr, Ukraine, e-mail: filatovgv@mail.ru

Abstract. Is researched the behavior of thin-walled cylindrical shell under hydrogenation. Are formulated the equation of the corrosion process and walls destruction of shell as a result of hydrogen embrittlement. Is presented a nomogram that allows to determine the time before the destruction of the shell, depending on the initial wall thickness of shell and the index of material embrittlement.

Keywords: Hydrogenation, Hydrogen Embrittlement, Durability of Structures.

Введение. Одной из основных причин разрушения большинства несущих конструкций в горнодобывающей промышленности, аппаратов в химическом и нефтехимическом производстве является коррозионное растрескивание, вызываемое повышенным содержанием водорода в окружающей среде и охрупчиванием металла. Наличие водорода в кристаллической решетке металла существенно снижает трещиностойкость высокопрочных сталей, титановых сплавов. Развитие трещин в металле понижает его физико-механические свойства, что приводит к снижению несущей способности и долговечности конструкций. Учет этого явления в расчетах элементов конструкций возможен путем представления аналитических зависимостей физико-механических свойств металла от параметров агрессивной среды [1-3].

Цель работы. Постановка задачи принимается следующей: для заданного срока службы конструкции требуется определить соответствующие параметры конструкции, обеспечивающие ей безопасную работу. При этом лицо, принимающее решение, решает, какой из параметров конструкции является определяющим в данной постановке и подлежит определению в первую очередь, исходя из кинетики коррозионного процесса.

Материалы и результаты исследований.

Математическое моделирование процесса коррозионного разрушения

Рассмотрим расчет на долговечность безмоментной цилиндрической оболочки кругового радиуса R , нагруженной с внутренней стороны давлением q и испытывающей влияние агрессивной среды (рис.1).

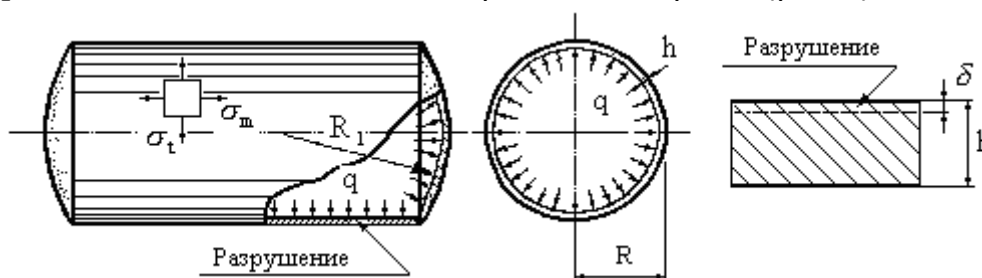


Рис. 1. – Расчетная схема оболочки

Воздействие агрессивной среды на оболочку опишем уравнением [3]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \beta \varepsilon_i \sigma_i + \alpha . \quad (1)$$

Здесь: α – коэффициент, учитывающий влияние коррозионной среды, δ – текущее значение глубины коррозионного поражения, t – время протекания коррозии, ε_i – интенсивность деформаций; σ_i – интенсивность напряжений;

ε_i – интенсивность деформаций

В процессе эксплуатации оболочка подвергается водородному охрупчиванию. Принимая в качестве предельного напряжения предел текучести σ_y и считая, что оболочка разрушится, если в какой-либо его точке напряжение достигнет предельной величины, условие разрушения запишем в виде [4]:

$$\sigma_i = \sigma_T (1 - \sigma_0 / S)^m \quad (2)$$

где: σ_T – предел текучести материала оболочки, σ_0 – среднее нормальное напряжения, S – напряжение всестороннего отрыва, m – параметр водородного охрупчивания металла.

Величины окружных и меридиональных напряжений в произвольной точке стенки оболочки найдем из уравнения Лапласа:

$$\sigma_t = \frac{qR}{h}; \sigma_m = \frac{qR}{2h}, \quad (3)$$

где: σ_m , σ_t – соответственно, меридиональное и окружное напряжения; ρ_m , ρ_t – радиусы кривизны в меридиональном и окружном направлениях; h – толщина стенки оболочки.

Интенсивность напряжений в произвольной точке оболочки определим, воспользовавшись энергетической теорией прочности:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_t - \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 + \sigma_m^2]} = \frac{\sqrt{3}qR}{2h}. \quad (4)$$

Будем считать, что несущая способность оболочки исчерпывается, если в стенке оболочки начинают интенсивно развиваться пластические деформации. Интенсивность деформаций при пластическом деформировании найдем через квадратичный инвариант девиатора деформаций $I_2(D_\varepsilon)$ [5]:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{I_2(D_\varepsilon)} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (5)$$

Здесь: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – составляющие девиатора деформаций. Для случая безмоментной оболочки они принимают вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu \sigma_m] = \frac{qR}{2Eh} (2 - \mu); \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_m - \mu \sigma_t] = \frac{qR}{2Eh} (1 - 2\mu); \quad (7)$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{3\mu qR}{2Eh} \quad (8)$$

Здесь: E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки. Подставляя выражение (6) в формулу (5), получаем:

$$\varepsilon_i = \frac{2\sigma_i}{E} (1 + \mu). \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\beta(1+\mu)q^2R^2}{2Eh^2} + \alpha \quad (10)$$

Толщина неразрушенного слоя стенки оболочки $h = h_0 - \delta$, где h_0 – начальная толщина стенки оболочки, δ – толщина разрушенного слоя.

Дифференцируя по времени, получим:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{d\delta}{dt} = -\frac{(a + \alpha b^2)}{b^2}, \text{ где: } a = \beta(1 + \mu) \frac{q^2 R^2}{2E}. \quad (11)$$

Интеграл уравнения (11) имеет вид [3]:

$$\frac{h}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{a}{\alpha}} \operatorname{arctgh} \sqrt{\frac{\alpha}{a}} = -t + C.$$

Произвольную постоянную C определим из граничного условия: при $t = 0$; $h = h_0$. Окончательно решение уравнения (11) запишем в виде:

$$t = \frac{h_0 - h}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{a}{\alpha}} \left(\operatorname{arctgh} \sqrt{\frac{\alpha}{a}} - \operatorname{arctgh} \sqrt{\frac{\alpha}{a}} \right) \quad (12)$$

Время выхода оболочки из строя найдем, если в уравнение (12) вместо h_0 подставим толщину стенки оболочки h_p в момент разрушения.

Для определения величины h_p воспользуемся условием разрушения (2) при условии, что:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_t + \sigma_m}{3} . \quad (13)$$

Подставляя (13) в (2), получим:

$$\frac{\sqrt{3}qR}{2h_p} = \sigma_T \left(1 - \frac{qR}{2h_p s} \right)^m . \quad (14)$$

Уравнение (14) удобно представить в виде:

$$\frac{qR}{2h_p s} + \left(\frac{\sqrt{3}qR}{2h_p \sigma_T} \right)^{\frac{1}{m}} = 1 . \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что, если стенка оболочки не разрушилась, т.е. если $h > h_p$, то выражение слева от знака равенства меньше единицы. Это выражение является безразмерным и может быть принято за меру поврежденности [3], так как включает в себя параметры, характеризующие нагрузку (q), геометрию оболочки (R, h) и материал, из которого изготовлена оболочка (σ_T, E, s):

$$v(t_p) = \frac{qR}{2h_p s} + \left(\frac{\sqrt{3}qR}{2h_p \sigma_T} \right)^{\frac{1}{m}}$$

В момент разрушения при $h = h_p$ имеем $v(t_p) = 1$.

Определим толщину стенки оболочки h_p в момент разрушения. Для этого уравнение разрушения (15) перепишем в виде:

$$f(x) = \frac{qR}{2h_p s} + \left(\frac{\sqrt{3}qR}{2h_p \sigma_T} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 . \quad (16)$$

Величину h_p определим из условия, что $f(x)=0$. Для решения уравнения (16) относительно h_p воспользуемся методом Ньютона. Введем обозначения:

$$c = \frac{qR}{2s}; b = \frac{\sqrt{3}qR}{2\sigma_T}; x = h_p; \quad (17)$$

Тогда:

$$f(x) = \frac{c}{x} + \left(\frac{b}{x}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (18)$$

$$f'(x) = -\frac{c}{x^2} - \frac{b}{mx^{\frac{m+1}{m}}}; \quad (19)$$

$$f''(x) = \frac{2c}{x^3} + \frac{b^{\frac{1}{m}}(m+1)}{m^2 x^{\frac{m+2}{m}}}. \quad (20)$$

Условие сходимости решения заключается в выполнении неравенства:

$$f(x) \times f''(x) > 0. \quad (21)$$

Корень уравнения (16) найдем из уравнения Ньютона:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{f'(x)}, (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (22)$$

Исследование влияния водородного охрупчивания проводилось на примере расчета безмоментной цилиндрической оболочки при следующих данных: $q = 2 \text{ МН/м}^2$; $R = 1 \text{ м}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\beta = 0,17 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Н} \cdot \text{год}$; $\mu = 0,3$; $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$; $\sigma_T = 220 \text{ МПа}$; $s = 350 \text{ МПа}$.

Рассматривались два случая:

- Есть водородное охрупчивание ($m = 1,227$).

Решая уравнение (15) относительно предельной толщины стенки оболочки с помощью процедуры (18)-(22), получаем: $h_p = 1,127 \text{ см}$. Время до разрушения находим из уравнения (9) подстановкой вместо текущего значения толщины стенки оболочки h предельного значения $h_p = 1,127 \text{ см}$. В результате получаем $t_p = 3,977 \text{ года}$.

- Водородное охрупчивание отсутствует ($m = 0$).

Предельное значение толщины стенки оболочки h_p найдем, воспользовавшись уравнением (14), из которого находим при $m = 0$ величину

$h_p = 0,787$ см. Время до разрушения для этого случая составляет $t_p = 14,77$ года, т.е. в 3,7 раза больше по сравнению с первым случаем.

Расчет времени до разрушения проводился также для разных начальных толщин стенки оболочки $h_0 = \{8,0; 9,0; 10,0; 10,5; 11,0; 11,5; 12,0; 12,5; 13,0; 13,5; 14,0; 14,5; 15,0; 15,5; 16,0\}$ мм при следующих значениях параметра охрупчивания $m = \{0,0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0\}$.

Результаты расчета: время до разрушения t_p и соответствующее значения толщины стенки оболочки t_p приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Время до разрушения и соответствующие толщины стенки оболочки

№	m	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
	h_p (мм)	7,870	8,690	9,430	10,10	10,73	11,32	11,89	12,43	12,95
	h_0 (мм)	Время до разрушения t_p (годы)								
1	8,00	0,404								
2	9,00	3,542	0,977							
3	10,0	6,718	4,154	1,810						
4	10,5	8,318	5,750	3,410	1,280					
5	11,0	9,923	7,360	5,020	2,890	0,870				
6	11,5	11,53	8,970	6,630	4,500	2,480	0,580			
7	12,0	13,15	10,59	8,250	6,110	4,090	2,200	0,360		
8	12,5		12,21	9,870	7,730	5,710	3,820	1,980	0,220	
9	13,0			11,48	9,360	7,340	5,440	3,600	1,850	0,160
10	13,5				10,98	8,960	7,070	5,230	3,480	1,790
11	14,0					10,59	8,700	6,850	5,110	3,420
12	14,5						10,33	8,490	6,740	5,050
13	15,0							10,12	8,370	6,680
14	15,5								10,00	8,320
15	16,0									9,960

На рис. 2 приведена номограмма, устанавливающая зависимость между временем разрушения и толщиной стенки оболочки для различных величин показателя охрупчивания.

Выводы

Номограмма позволяет:

1. Определить время существования оболочки до разрушения в зависимости от начальной толщины стенки h_0 при заданном параметре охрупчивания m .

2. Определить начальную толщину стенки оболочки h_0 при заданном параметре охрупчивания m и заданном времени работы до разрушения t_p .

Пересечение графика $h_0 = f(m)$ с осью h_0 дает значение толщины стенки оболочки в момент разрушения при времени $t_p = 0$. Это значение

$h = h_p(t=0)$ соответствует нижней границе изменения величины h_0 . Назначаемая толщина стенки оболочки h_0 должна быть больше $h_p(t=0)$. Если h_0 станет равным $h_p(t=0)$, разрушение теоретически произойдет мгновенно. Таким образом, номограмма позволяет установить мгновенные значения разрушающей толщины стенки оболочки $h_p(t=0)$.

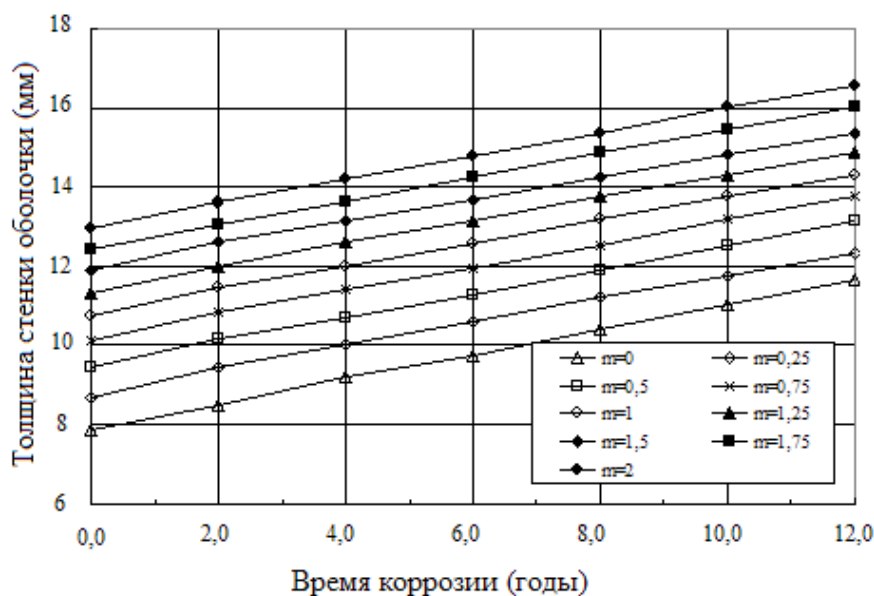


Рис. 2. – Номограмма

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленцов Д.Г. Оптимизация долговечности и стоимости цилиндрических оболочек, подвергающихся механическому и химическому разрушению/ Д.Г. Зеленцов, Ю.М. Почтман // ФХММ. – 1987. – № 4. – С.70 – 73.
2. Овчинников И. Г. Расчет и рациональное проектирование конструкции, подвергающихся коррозионному износу (Обзор) / И.Г.Овчинников, Ю.М. Почтман //ФХММ. — 1991. — № 2. — С. 7—19.
3. Петров В.В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой./ В.В.Петров, И.Г.Овчинников, Ю.М.Шихов - Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1987. - 288 с.
4. Новожилов В.В. Перспективы построения критерия прочности при сложном нагружении / В.В.Новожилов, О.Г.Рыбакина // Известия АН СССР. Механика твердого тела, М.: Наука. – 1966. – №5.– С.101 – 111.
5. Качанов Л.М. Основы механики разрушения, / Л.М. Качанов - М., «Наука», 1974, 312 с.