чивого развития нанотехнологий//Наноиндустрия. 2013.-№5.

5. ГОСТ Р 8.763-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм».

6. Тодуа П.А. Метрология и стандартизация в нанотехнологиях // Фотоника. 2010. №1.

7. ГОСТ 21006-75. Микроскопы электронные. Термины, определения и буквенные обозначения

8. ГОСТ 8.593-2009 ГСИ. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика поверки

9. ГОСТ Р 8.628-2007 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления (с Изменением № 1)

10. Гоголинский К., Усеинов А., Кузнецов А., Решетов В., Голубев С. Метрологическое обеспечение измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне // Наноиндустрия. 2012. №1.

11. Тодуа П. Нанометрология и стандартизация в нанотехнологиях // Наноиндустрия. 2010. №5.

12. Рачков М.Ю. Измерения физических величин в нанометровом диапазоне // Машиностроение и инженерное образование, 2013, №2.

13. Трапашко Г.А. Калибровка установок измерений размеров элементов микроэлектронных структур //Наука и техника. – 2012. №4.

14. Штыков С. Н. Наноаналитика: проблемы концепции и метрологии // Вестник ННГУ. 2013. №5-1.

УДК 539.3:620.193:669

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА НДС ПОЛОГОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Кузнецова В.О.
Научный руководитель Трещев А.А.
Тульский государственный университет

В статье рассматривается создание математической модели, которая описывает влияние агрессивных водородных сред на напряжённо-деформированное состояние тонкой пологой оболочки, вычерченной по

сфере, выполненной из титанового сплава. Нагрузка задана равномерно распределенной по поверхности оболочки. Используется нелинейная модель, выполненная в пространствах напряжений с нормировкой. Закрепление оболочки жёсткое. Разработан ход решения задач данного типа.

Сплавы титана, изначально не обладая восприимчивостью к виду напряженного состояния, в процессе влияния агрессивной водородной среды получают свойства разносопротивляемости, изменяющиеся во времени, что приводит к повышению хрупкости материала и раннему обрушению конструкций.

Выбранный алгоритм решения вопроса о влиянии агрессивной водородной среды на НДС пологой оболочки, очерченной по сфере, можно представить в виде численного метода, основанного на замещении производных разностными схемами.

В качестве решения вышеописанной задачи принимаем двухшаговый алгоритм последовательных возмущений критериев [5], который способен линеаризовать заданные уравнения и имеет достаточную точность.

Рассмотрим тонкие пологие оболочки, очерченные по сфере, отношение стрелы подъема которых в центре оболочки f к наименьшему радиусу a в плане составит:

$$\frac{f}{a} \le \frac{1}{5}$$

а соотношение толщины оболочки h к меньшему радиусу изгиба (кривизны):

$$\frac{h}{R_{\min}} \le \frac{1}{20} \quad . \qquad 1)$$

Рассматривается упругий баланс оболочки толщиной h под воздействием поперечной осесимметричной нагрузки, равномерно распределенной по оболочке q и агрессивной водородной среды с концентрацией λ. Оболочка жестко закреплена по контуру.

Запишем кинетический потенциал деформаций в виде:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta Cos3\varphi)\tau^2 +$$
$$+ [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta Cos3\varphi)\tau^2]^n$$

где $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – физические зависимости потенциала линейной и нелинейной частей, которые зависят от степени водородного насыщения. Функциональные характеристики сплава определяются путем полиномиальной интерполяции данных констант при заданном уровне концентрации водородосодержащей среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05%) и для титанового сплава ВТ1-0 запишутся в виде:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k} \cdot \lambda + e_{2k} \cdot \lambda^2; V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k} \cdot (p_{2k})^{\lambda};$$

$$A_e(\lambda) = V_{e1}(\lambda); B_e(\lambda) = V_{e3}(\lambda); C_e(\lambda) = V_{e2}(\lambda); \quad (3)$$

$$D_e(\lambda) = V_{e4}(\lambda); E_e(\lambda) = V_{e5}(\lambda);$$

$$A_p(\lambda) = V_{p1}(\lambda); B_p(\lambda) = V_{p3}(\lambda); C_p(\lambda) = V_{p2}(\lambda);$$

$$D_p(\lambda) = V_{p4}(\lambda); E_p(\lambda) = V_{p5}(\lambda);$$

здесь e_{ik}, p_{ik} – коэффициенты полиномов i=0..3; k=1..3.

Главные изгибы (кривизны) оболочки обозначим $k_1 = k_2 = k = 1/R$. Затем рассмотрим такие оболочки, в которых возможно пренебрежение разницей между длиной дуги средней поверхности и соответствующей проекцией на плоскость [1].

Для этого запишем соотношения в следующем виде:

а) составляющие деформации в средней поверхности:

$$\varepsilon_r = u_{,r} - kw + 0{,}5(w_{,r})^2; \ \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} - kw, \quad (4)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ – деформации, направленные по радиусу и относительные деформации по окружности в средних поверхностях;

u, w – перемещения и прогибы, направленные по радиусу;

k – главный изгиб (кривизна); r – радиальная координата.

б) составляющие кривизн:

$$\chi_r = -w_{rr};\ \ \chi_\varphi = -\frac{w,_r}{r}\ , \tag{5}$$

в) соотношения составляющих тензора деформаций через характеристики деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ и кривизны χ_r, χ_φ средней поверхности:

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r;\ \ e_\varphi = \varepsilon_\varphi + z\chi_\varphi\ , \tag{6}$$

где z –координата по толщине оболочки, которая отсчитывается от средней поверхности оболочки, и направлена к центру изгиба оболочки.

Выражая зависимости (4) – (5) из (6), получаем соотношения для составляющих тензора деформаций через прогибы и перемещения:

$$e_r = u,_r - kw + 0{,}5(w_{,r})^2 - zw_{,rr};\ \ e_\varphi = \frac{u}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}\ . \tag{7}$$

Взаимосвязь деформаций с напряжениями выразим в виде:

$$\begin{Bmatrix} e_r \\ e_\theta \end{Bmatrix} = [A]\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix}\ . \tag{8}$$

Обратим выражения (8), тем самым получим корреляцию напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = [B]\begin{Bmatrix} e_r \\ e_\theta \end{Bmatrix} \tag{9}$$

где $[B] = [A]^{-1}$.

В этих соотношениях A_{11}, $A_{12}..A_{44}$ – составляющие симметричной матрицы [A] – зависимости потенциала W_1.

Внутренние усилия и моменты получим с помощью напряжений:

$$\begin{gathered} N_r = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz;\ \ N_\varphi = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi dz; \\ M_r = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz;\ \ M_\varphi = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi z dz; \end{gathered} . \tag{10}$$

Уравнения статико-геометрической природы не меняются при использовании тех или иных определяющих соотношений [2], тогда, внутренние усилия и моменты заданной оболочки при условии $zk << 1$ вычисляются с помощью уравнений равновесия:

$$\begin{gathered} M_r,_{rr} - M_\varphi,_r /r + 2M_r,_r /r + k\left(N_r + N_\varphi\right) + N_r w,_{rr} = -q; \\ N_r,_r + \left(N_r - N_\varphi\right)/r - k\left[M_r,_r + \left(M_r - M_\varphi\right)/r\right] = 0. \end{gathered}$$

Чтобы линеаризовать полученные ранее уравнения, используем двухшаговый алгоритм последовательных возмущений характеристик [6], согласно которому соотношения приращений деформаций и изгибных характеристик средней поверхности записываются в виде:

$$\begin{gathered} \delta e_r = \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_r}\delta\sigma_\mathrm{r} + \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_\varphi}\delta\sigma_\varphi + \frac{\partial e_r}{\partial \lambda}\delta\lambda; \\ \delta e_\varphi = \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_\varphi}\delta\sigma_\varphi + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_r}\delta\sigma_r + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \lambda}\delta\lambda; \end{gathered} \tag{12}$$

$$\delta\varepsilon_r = \delta u,_r - k\delta w + w,_r\, \delta w,_r\,;\quad \delta\varepsilon_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w$$

$$\delta\chi_r = -\,\delta w,_{rr}\,;\ \ \delta\chi_\varphi = -\frac{\delta w,_r}{r}\,; \tag{13}$$

Выражения для приращений деформаций в точке через приращения деформаций средней поверхности $\delta\varepsilon_r$ и $\delta\varepsilon_\varphi$ и изгибных характеристик средней поверхности $\delta\chi_r$ и $\delta\chi_\varphi$ представим следующим образом:

$$\delta e_r = \delta\varepsilon_r + z\delta\chi_r; \quad \delta e_\varphi = \delta\varepsilon_\varphi + z\delta\chi_\varphi, \qquad (14)$$

С помощью уравнений (12)–(14) получены выражения, отражающие связь приращений деформаций и перемещений:

$$\delta e_r = \delta u,_r - k\delta w + w,_r \delta w,_r - z\delta w,_{rr}; \; \delta e_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w - z\frac{\delta w,_r}{r} \quad (15)$$

Соотношения для приращений внутренних усилий и моментов от напряжений записываются в виде:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_r dz; \; \delta N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_\varphi dz; \\ \delta M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_r z dz; \; \delta M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_\varphi z dz; \end{aligned} \qquad (16)$$

здесь δN_r, δN_φ – приращения усилий в средней поверхности оболочки, δM_r, δM_φ – приращения моментов.

В приращениях уравнения баланса оболочки, отбрасывая члены второго порядка малости и выше, запишем в виде:

$$\begin{gathered} \delta M_r,_{rr} - \delta M_\varphi,_r / r + 2\delta M_r,_r / r + \\ + k(\delta N_r + \delta N_\varphi) + \delta N_r w,_{rr} + N_r \delta w,_{rr} = -\delta q \\ \delta N_{r,r} + (\delta N_r - \delta N_\varphi)/r - k[\delta M_r,_r + (\delta M_r - \delta M_\varphi)/r] = 0 \end{gathered} \qquad (17)$$

Записанную ранее систему разрешающих дифференциальных уравнений в приращениях (17) требуется дополнить краевыми условиями. Для осесимметричной задачи в центре оболочки поворот нормальной плоскости к средней поверхности, перемещения вдоль радиуса и их приращения равны нулю
($w,_r = 0,\; u = 0,\; \delta w,_r = 0,\; \delta u = 0,$).

Библиографический список

1. *Астафьев В.И., Ширяева Л.К. Накопление повреждённости и коррозионное растрескивание металлов под напряжением / В.И. Астафьев, Л.К. Ширяева. – Самара: Изд-во Самарский университет, 1998. – 123 с.*
2. *Овчинников, И.И., Овчинников И.Г., ЧэньТао, Успанов А.М. Анализ экспериментальных данных по кинетике проникания сульфатосодержащих сред в железобетонные конструкции и влиянию их на механические характеристики компонентов железобетона. Часть 1. Эксперименты по изучению кинетики проникания // Интернет-журнал «Науковедение». Том 8, № 1 (2016). – 14 с.*
3. *Овчинников, И.Г. Модифицированная модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению // Строительная механика и расчёт сооружений, 2014. №1. – С. 29 – 35.*
4. *Овчинников, И.Г. Анализ экспериментальных данных по влиянию водорода при нормальных температурах на механические свойства металлов и сплавов и построению модели взаимодействия конструктивных элементов с водородом. Ч.1. Проблема воздействия водорода на металлы и пути ее решения. Закономерности проникания водорода в конструктивные элементы / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассада. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1989. – 28 с.*
5. *Петров, В.В. Теория наведенной неоднородности и ее приложения к проблеме устойчивости пластин и оболочек / В.В. Петров, В.К. Иноземцев, Н.Ф. Синева. – Саратов: Сарат. госуд. технич. ун - т, 1996 – 311с.*