В гл. 8 изложена методика оценки показателей надежности систем КИПиА с учетом функций контроля и регистрации основных технологических параметров, сигнализации об их отклонении за допустимые пределы, защиты и регулирования важнейших параметров технологического процесса.

В гл. 9 изложены методические вопросы расчета показателей систем безопасности с учетом длительности выполнения заданных функций для различных условий и регламента проведения технического обслуживания при работе реактора на мощности.

В приложениях РТМ приведены краткие данные о надежности оборудования АЭС, методика оценки надежности трубопроводов, пояснения к построению «дерева отказов» и некоторые другие справочные материалы.

Для облегчения расчетов по методике РТМ созданы специальные программы для ЭВМ БЭСМ-6. Полные наборы КГСБ и КГЭ для нескольких типичных структурных схем АЭС определяются по программе ФОРОНС. Программа РАСТР-1 реализует методику РТМ для задания условий неработоспособности через КГЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барлоу Р., Прошан Ф.** Математическая теория надежности. Пер. с англ. Под ред. Б. В. Гнеденко. М., «Сов. радио», 1969.
2. **Vesely W.** «Nucl. Engng Design», 1970, v. 13, N 2, p. 337.

Поступила в Редакцию 28.05.7

УДК 621.039.54:539.4

Оценка несущей способности циркониевых оболочек твэлов

СОЛЯНЫЙ В. И., ЯМНИКОВ В. С.

В энергетических реакторах с водяным теплоносителем, как правило, используются стержневые твэлы с оболочками из сплавов на основе циркония. Для проектирования таких твэлов, анализа эксплуатационной надежности, особенно при переходных режимах, и изучения последствий при возможных аварийных ситуациях необходимо знать предельные прочностные характеристики оболочек при сложнонапряженном состоянии в широком интервале температуры.

Анизотропность оболочек из сплавов на основе циркония вызвана, с одной стороны, деформационной анизотропией, возникшей в процессе изготовления, и, с другой — исходной анизотропией монокристалла α-циркония. Обычное экспериментальное определение предельных напряжений и деформаций анизотропных оболочек при сложнонапряженном состоянии, осуществляемое путем испытаний на разрушение внутренним давлением и осевым нагружением, требует сложного аппаратурного оснащения и весьма трудоемко. Однако необходимые характеристики могут быть получены посредством теоретического рассмотрения несущей способности цилиндрической анизотропной оболочки твэла на основе представлений о потере устойчивости пластического деформирования.

Поскольку экспериментальная проверка не подтвердила [1] возможности использования критерия Свифта, модифицированного для случая анизотропных материалов, был применен статический критерий [2], согласно которому потеря устойчивости пластического деформирования наступает при достижении максимума какой-либо внешней нагрузки и характеризуется равенством нулю бесконечно малых ее приращений.

Постановка задачи и ее решение. Рассмотрим процесс кратковременного деформирования весьма пластичной оболочки при простом нагружении и предположим, что справедлива теория пластической анизотропии Хилла [3], т. е. материал оболочки обладает пластической ортогональной анизотропией (ортотропией) и изотропным упрочнением. Следует отметить, что в трубах, идущих на изготовление твэлов, текстура такова, что нормаль к плоскости базиса лежит в плоскости поперечного сечения. Анизотропию таких оболочек можно охарактеризовать коэффициентами R_θ и R_z, определяемыми как отношение поперечных деформаций при одноосном растяжении стандартных образцов вдоль осей θ и Z соответственно, т. е.

$$R_\theta = \varepsilon_z/\varepsilon_r;\ \ R_z = \varepsilon_\theta/_r. \tag{1}$$

Основные соотношения теории пластичности ортотропного металла для плоского напряженного состояния, когда главные оси тензора напряжений и тензора приращений деформаций совпадают, представим в следующем виде:

а) связь между напряжениями и деформациями

$$\varepsilon_\theta = \frac{\bar{\varepsilon}}{A\bar{\sigma}}[(H+G)-Hm]\,\sigma_\theta; \tag{2а}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\bar{\varepsilon}}{A\bar{\sigma}}[(H+F)\,m+H]\,\sigma_\theta; \tag{2б}$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\bar{\varepsilon}}{A\bar{\sigma}}[G+Fm]\,\sigma_\theta, \tag{2в}$$

где $m = \sigma_z/\sigma_\theta = \text{const}\ (0 \leqslant m < \infty)$; H, G, F — параметры анизотропии; $A = \frac{2}{3}(H+G+F)$;

$\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ — интенсивность напряжений и деформаций, однозначно связанных между собой независимо от напряженно-деформированного состояния уравнением $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$;

б) условие несжимаемости

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_z + \varepsilon_r = 0. \quad (3)$$

Из определения коэффициентов R и соотношений (2) получим

$$R_\theta = H/G; \; R_z = H/F. \quad (4)$$

Выражение для интенсивности напряжений имеет вид

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right) - 2m + \left(1+\frac{1}{R_z}\right) m^2\right]}{\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right)}}\,\sigma_\theta. \quad (5)$$

Из соотношений (2а) и (5) получаем уравнение для интенсивности деформаций:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right)\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right) - 2m + \left(1+\frac{1}{R_z}\right) m^2\right]}\,\frac{\varepsilon_\theta}{1+\frac{1}{R_\theta} - m}. \quad (6)$$

На основании соотношения (2) обозначим

$$m_\varepsilon = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_\theta} = \frac{\left(1+\frac{1}{R_z}\right) m - 1}{1+\frac{1}{R_\theta} - m}. \quad (7)$$

Связь между нагрузками на элемент цилиндрической оболочки и действующими напряжениями описывается соотношениями

$$Q = \pi D t \sigma_z; \; P = 2t\sigma_\theta/D, \quad (8)$$

где Q — осевая сила; P — внутреннее давление; D, t — текущие значения диаметра и толщины оболочки соответственно.

По статическому критерию потеря устойчивости пластического деформирования происходит

$$\text{при } \delta Q = 0 \quad (9)$$

или

$$\text{при } \delta P = 0. \quad (10)$$

Из уравнений (9), (10) и соотношений (3), (7), (8), полагая приращения деформаций по осям θ, z, r равными $\delta\varepsilon_\theta = \delta D/D$, $\delta\varepsilon_z = \delta L/L$, $\delta\varepsilon_r = \sigma t/t$, находим

$$\text{либо } \delta\sigma_z/\delta\varepsilon_z = \sigma_z, \quad (11)$$

$$\text{либо } \delta\sigma_\theta/\delta\varepsilon_\theta = (2+m_\varepsilon)\,\sigma_\theta. \quad (12)$$

Тогда с учетом (5) и (6) получим

$$\text{либо } \frac{\delta\bar{\sigma}}{\delta\bar{\varepsilon}} = \left\{\frac{\left(1+\frac{1}{R_z}\right) m - 1}{\sqrt{\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right) \times \left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right) - 2m + \left(1+\frac{1}{R_z}\right) m^2\right]}}\right\}\bar{\sigma}, \quad (13)$$

$$\text{либо } \frac{\delta\bar{\sigma}}{\delta\bar{\varepsilon}} = \left\{\frac{1+\frac{1}{R_\theta} - m}{\sqrt{\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right) \times \left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right) - 2m + \left(1+\frac{1}{R_z}\right) m^2\right]}} \times (2+m_\varepsilon)\right\}\bar{\sigma}. \quad (14)$$

Из этих соотношений, зная зависимость $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$ и коэффициенты анизотропии, определенные посредством одноосных испытаний, можно получить предельные значения напряжений и деформаций, приводящие к потере устойчивости пластического деформирования.

Используем наиболее распространенную для рассматриваемых сплавов аппроксимацию зависимости $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$ степенной функцией

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon})^n, \quad (15)$$

где K — коэффициент пропорциональности и n — показатель упрочнения.

Согласно формулам (13) и (14) получим для разрушения по z:

$$\sigma_{z\text{пр}} = Kn^n\left[\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right)\right]^{(n+1)/2} \times \frac{m\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right) - 2m + \left(1+\frac{1}{R_z}\right) m^2\right]^{(n-1)/2}}{\left[\left(1+\frac{1}{R_z}\right) m - 1\right]^n}; \quad (16)$$

$$\varepsilon_{z\text{пр}} = n; \quad (17)$$

для разрушения по θ:

$$\sigma_{\theta\text{пр}} = Kn^n\left[\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right)\right]^{(n+1)/2} \times \frac{\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right) - 2m + \left(1+\frac{1}{R_z}\right) m^2\right]^{(n-1)/2}}{\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta} - m\right)(2+m_\varepsilon)\right]^n}, \quad (18)$$

$$\varepsilon_{\theta\text{пр}} = n/(2+m_\varepsilon). \quad (19)$$

Вид разрушения будет определяться тем, какая из двух деформаций (ε_z или ε_θ) раньше достигнет своего предельного значения в соответствии с формулами (17) и (19).

Тогда в случае

$$0 \leqslant m < 1 + 1/R_\theta \quad (20)$$

разрушение происходит вследствие потери устойчивости пластического деформирования в окружном направлении, а в случае

$$1 + 1/R_\theta < m < \infty \quad (21)$$

— в осевом направлении.

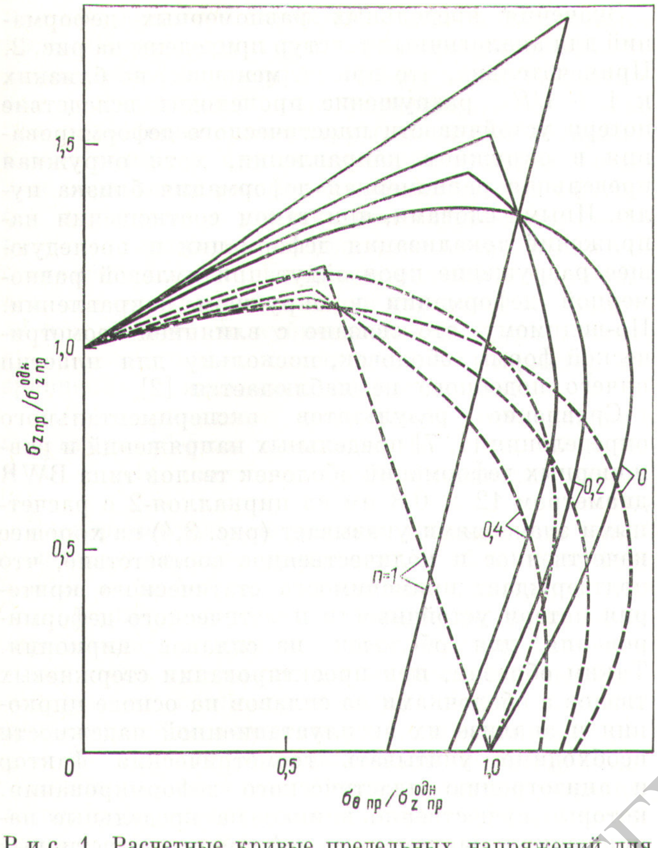

Рис. 1. Расчетные кривые предельных напряжений для оболочек с радиальной текстурой при $R_\theta = R_z = 2$ (——) и окружной текстурой при $R_\theta = 1$, $R_z = 0{,}5$ (— — —); —·— — изотропный случай

Вводя предельное напряжение при одноосном растяжении по z, равное

$$\sigma_{z\text{пр}}^{\text{одн}} = Kn^n \frac{\left[\frac{2}{3}\left(1+\frac{1}{R_z}+\frac{1}{R_\theta}\right)\right]^{(n+1)/2}}{\left(1+\frac{1}{R_z}\right)^{(n+1)/2}}, \qquad (22)$$

из формул (16) и (18) получаем

$$\frac{\sigma_{z\text{пр}}}{\sigma_{z\text{пр}}^{\text{одн}}} = \left(1+\frac{1}{R_z}\right)^{(n+1)/2} \times \frac{m\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right)-2m+\left(1+\frac{1}{R_z}\right)m^2\right]^{(n-1)/2}}{\left[\left(1+\frac{1}{R_z}\right)m-1\right]^n}; \qquad (23)$$

$$\frac{\sigma_{\theta\text{пр}}}{\sigma_{z\text{пр}}^{\text{одн}}} = \left(1+\frac{1}{R_z}\right)^{(n+1)/2} \times \frac{\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right)-2m+\left(1+\frac{1}{R_z}\right)m^2\right]^{(n-1)/2}}{\left[\left(1+\frac{1}{R_\theta}\right)2-1+\left(\frac{1}{R_z}-1\right)m\right]^n}. \qquad (24)$$

Результаты расчета и их обсуждение. Полученные зависимости (17), (19), (23) и (24) позволяют построить в относительных координатах предель-

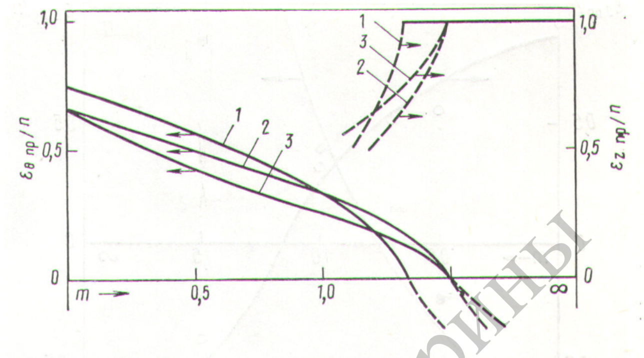

Рис. 2. Зависимость расчетных кривых для предельных равномерных деформаций от параметра нагружения m при $R_\theta = R_z = 2$ (*1*); $R_\theta = R_z = 1$ (*2*) — изотропный случай; $R_\theta = 1$, $R_z = 0{,}5$ (*3*)

ные кривые, характеризующие потерю устойчивости пластического деформирования анизотропных оболочек. Показатель n можно считать изменяющимся от 0 до 1, причем $n = 1$ для идеально упругого материала, а $n = 0$ для жесткопластического материала.

Коэффициенты R_θ, R_z необходимо рассматривать как функции тепловой и механической обработок в процессе изготовления [4, 5]. Для штатных оболочек с радиальной текстурой коэффициенты R_θ, R_z изменяются в пределах 2—5, а с окружной текстурой они составляют $R_z = 0{,}3 \div 0{,}7$ и $R_\theta = 1 \div 1{,}7$. Для изотропных оболочек $R_\theta = R_z = 1$. На рис. 1 представлены расчетные кривые предельных напряжений для этих текстур.

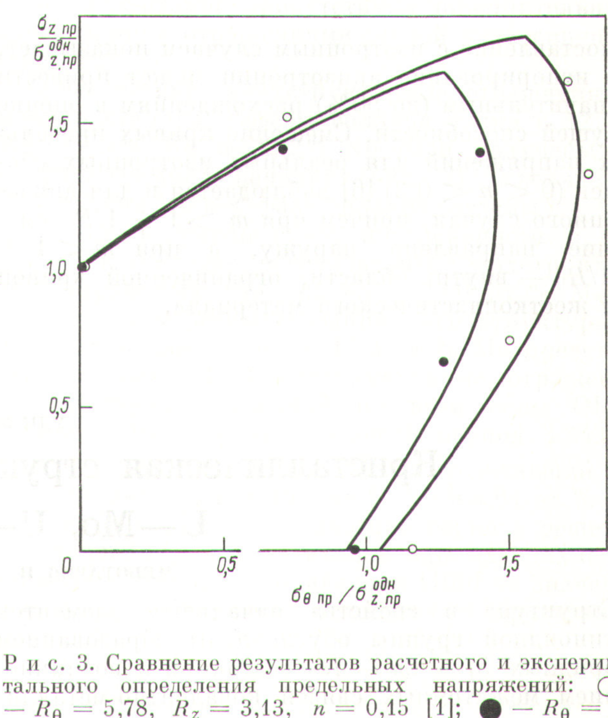

Рис. 3. Сравнение результатов расчетного и экспериментального определения предельных напряжений: ○ — $R_\theta = 5{,}78$, $R_z = 3{,}13$, $n = 0{,}15$ [1]; ● — $R_\theta = 3{,}7$, $R_z = 3{,}0$, $n = 1{,}15$ [7]

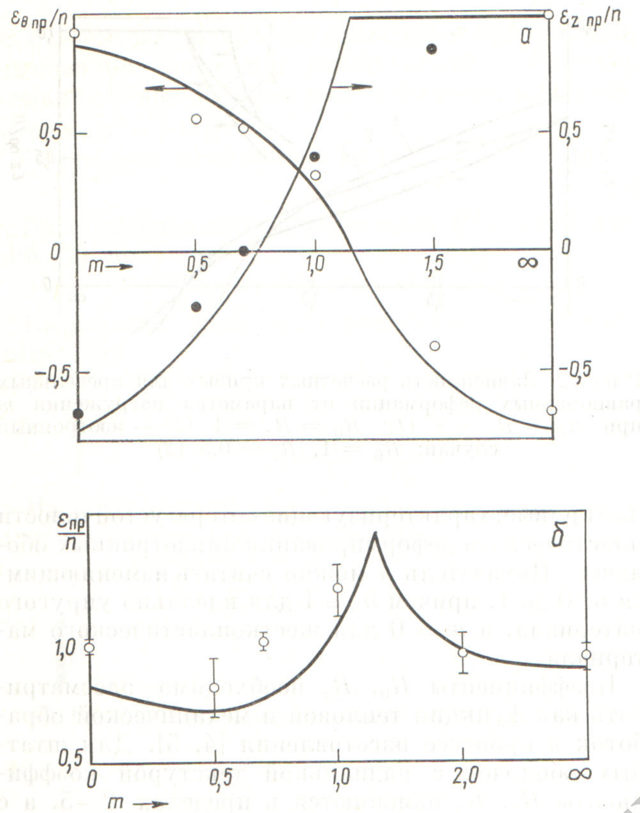

Рис. 4. Сравнение результатов расчетного и экспериментального определения при $R_\theta = 5{,}78$, $R_z = 3{,}13$ и $n = 0{,}15$ [1] предельных равномерных деформаций в направлениях θ и z (*а*) и интенсивности предельной равномерной деформации (*б*)

Сопоставление с изотропным случаем показывает, что игнорирование анизотропии может привести к значительным (до 50%) расхождениям в оценке несущей способности. Смещение кривых предельных напряжений для реальных изотропных оболочек ($0 < n < 0{,}3$) [6] наблюдается и для анизотропного случая, причем при $m > 1 + 1/R$ смещение направлено наружу, а при $m < 1 + 1/R_\theta$ — внутрь области, ограниченной кривой для жесткопластического материала.

Значения предельных равномерных деформаций для аналогичных текстур приведены на рис. 2. Примечательно, что при m, меньших, но близких к $1 + 1/R_\theta$, разрушение происходит вследствие потери устойчивости пластического деформирования в окружном направлении, хотя окружная предельная равномерная деформация близка нулю. Иными словами, при таком соотношении напряжений локализация деформации и последующее разрушение произойдут при нулевой равномерной деформации в окружном направлении. По-видимому, это связано с влиянием геометрической формы оболочек, поскольку для пластин ничего подобного не наблюдается [2].

Сравнение результатов экспериментального определения [1, 7] предельных напряжений и равномерных деформаций оболочек твэлов типа BWR диаметром 12 × 0,8 мм из циркаллоя-2 с расчетными значениями указывает (рис. 3,4) на хорошее качественное и количественное соответствие, что подтверждает применимость статического критерия потери устойчивости пластического деформирования для оболочек из сплавов циркония. Таким образом, при проектировании стержневых твэлов с оболочками из сплавов на основе циркония и анализе их эксплуатационной надежности необходимо учитывать геометрический фактор и анизотропию пластического деформирования, которые существенно влияют на предельные напряжения и равномерные деформации пластичных оболочек при кратковременном нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Miyamoto Y. e.a.** «J. Nucl. Mater.», 1976, v. 61, p. 53.
2. **Головлев В. Д.** «Машиноведение», 1966, № 2, с. 112.
3. **Хилл Р.** Математическая теория пластичности. М., Гостехтеориздат, 1956.
4. **Andersson T.** «J. Nucl. Mater.», 1976, v. 62, p. 95.
5. **Rittenhouse P.** Ibid., 1967, v. 24, p. 310.
6. **Максак В. И.** В кн.: Упругость и неупругость. Вып. 1. М., изд. МГУ, 1971, с. 159.
7. **Maki H. e.a.** In: Proc. Intern. Conf. «Nuclear Fuel Performance». London, 1973, p. 621.

Поступила в Редакцию 18.05.77

УДК 548.7:669.822

Кристаллическая структура γ^s-фазы в сплавах U—Mo, U—Re и U—Nb

ЧЕБОТАРЕВ Н. Т., УТКИНА О. Н.

Структура и свойства начальных элементов актиноидной группы обусловлены образованием гибридных $5f - 6d - 7s$ - состояний и возникновением межатомных связей ковалентно-металлического характера, что в низкотемпературных модификациях урана, нептуния и плутония проявляется в виде четырех коротких связей [1, 2]. При переходе от этих низкотемпературных модификаций к высокотемпературным происходит уменьшение перекрытия энергетических уровней, ослабле-