

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов,
О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов**

Нижний Новгород

Представлено описание численной методики расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий из аустенитных нержавеющей сталей при термомеханических воздействиях в условиях нейтронного облучения. Рассмотрены модели поведения таких материалов, алгоритмы реализации предложенных моделей и методики численного решения задач расчета конструкций на основе МКЭ. Представлены результаты численного исследования НДС конструкций при терморadiационных воздействиях.

1. Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям [1, 2], деформационные и прочностные характеристики нержавеющей сталей в значительной степени зависят от уровней действующих температур и нейтронного облучения, при этом влияние нейтронного облучения на данные характеристики существенно зависит от химического состава и исходных структур самих сталей. Однако для всех видов сталей можно выделить несколько основных эффектов, проявляющихся при нейтронном облучении [1]: зависимость упругих характеристик материала от уровня нейтронного облучения, зависимость коэффициента линейного температурного расширения от нейтронного облучения, радиационное распухание, проявляющееся в увеличении линейных размеров в процессе нейтронного облучения, влияние нейтронного облучения на процесс пластического деформирования, влияние нейтронного облучения на процесс термической ползучести и появление такого фактора, как радиационная ползучесть.

Как показывают экспериментальные исследования, упругие характеристики для нержавеющей сталей мало зависят от уровня радиационного облучения. Эти характеристики связаны с плотностью стали и понижаются с ее уменьшением при увеличении радиационного распухания.

В экспериментальных исследованиях отмечается также, что изменения коэффициента теплового расширения под облучением являются небольшими – по своей абсолютной величине они сравнимы с погрешностью эксперимента. К тому же, эти изменения направлены как в сторону их уменьшения, так и увеличения.

Нейтронное облучение также оказывает непосредственное влияние на размерные изменения сталей, обусловленные в основном двумя причинами: ползучестью нагруженного образца, возрастающей под действием нейтронного облучения, и радиационным распуханием, проявляющимся в изменении линейных размеров нагруженного образца в потоке нейтронов [1, 2].

Некоторые экспериментальные и построенные на их основе аналитические зависимости скорости радиационной ползучести от приложенных напряжений и потока нейтронного облучения для нержавеющей сталей рассмотрены в [2].

Нейтронное облучение, как правило, вызывает существенное увеличение предела текучести σ_t нержавеющей сталей, изменение предела прочности σ_b и уменьшение характеристик пластичности. Диаграммы, соответствующие растяжению облученных образцов из нержавеющей сталей, всегда лежат выше диаграмм образцов в исходном состоянии, а их площадь, характеризующая работу деформирования и разрушения, значительно меньше. Анализ кривых дает возможность убедиться, что сокращение работы деформирования и разрушения, несмотря на повышение пределов текучести и прочности, обусловлено значительным сокращением способности к пластическому деформированию и изменению степени деформационного упрочнения.

2. Рассмотрим закономерности изменения напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} в точке материала в процессе теплового и радиационного нагружений.

Пусть для некоторого момента времени \bar{t} в точке тела известно исходное состояние материала, характеризуемое следующими величинами: $\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\varepsilon}_{ij}, \bar{T}, \bar{N}, \bar{\varepsilon}_{ij}^p, \bar{\varepsilon}_{ij}^c, \bar{\varepsilon}_{ij}^r$, где $\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\varepsilon}_{ij}$ – значения тензора напряжений и деформаций в исходном состоянии; \bar{T}, \bar{N} – уровни температуры и нейтронного облучения; $\bar{\varepsilon}_{ij}^p, \bar{\varepsilon}_{ij}^c, \bar{\varepsilon}_{ij}^r$ – соответственно компоненты тензора пластических деформаций, термической и радиационной ползучести.

В соответствии с известными соотношениями упругости связь между напряжениями $\bar{\sigma}_{ij}$ и деформациями $\bar{\varepsilon}_{ij}$ для этого момента времени можно записать в виде:

$$\bar{\sigma}_{ij} = 2\bar{G}(\bar{\varepsilon}_{ij} - \bar{\varepsilon}_{ij}^*) + \delta_{ij}(\bar{K} - 2/3\bar{G})(\bar{\varepsilon}_{ij} - \bar{\varepsilon}_{ij}^*), \quad (1)$$

где $\bar{G} = G(\bar{T}, \bar{N})$, $\bar{K} = K(\bar{T}, \bar{N})$ – модули сдвиговой и объемной деформации материала в исходном состоянии;

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^* = \bar{\varepsilon}_{ij}^p + \bar{\varepsilon}_{ij}^c + \bar{\varepsilon}_{ij}^r + \delta_{ij}(\bar{\alpha} \cdot \bar{T} + \bar{\beta}); \quad (2)$$

$\bar{\alpha} = \alpha(\bar{T}, \bar{N})$, $\bar{\beta} = \beta(\bar{T}, \bar{N})$ – значения коэффициентов теплового расширения и радиационного набухания.

Для другого, близкого момента времени $\bar{t} + \Delta t$ (текущего состояния), характеризуемого уровнями температуры $\hat{T} = \bar{T} + \Delta T$ и нейтронного облучения $\hat{N} = \bar{N} + \Delta N$, по аналогии с (1) можно записать:

$$\hat{\sigma}_{ij} = 2\hat{G}(\hat{\varepsilon}_{ij} - \hat{\varepsilon}_{ij}^*) + \delta_{ij}(\hat{K} - 2/3\hat{G})(\hat{\varepsilon}_{ij} - \hat{\varepsilon}_{ij}^*). \quad (3)$$

В выражении (3) все величины, отмеченные значком $\hat{}$, относятся к текущему состоянию, то есть

$$\hat{G} = G(\hat{T}, \hat{N}), \quad \hat{K} = K(\hat{T}, \hat{N}) \text{ и т.д.}$$

На основе (1) и (3) можно получить зависимости для изменения напряжений $\Delta\sigma_{ij}$ на элементарном шаге изменения внешних воздействий при переходе от исходного к текущему состоянию:

$$\Delta\sigma_{ij} = \hat{\sigma}_{ij} - \bar{\sigma}_{ij} = 2\hat{G}(\Delta\varepsilon_{ij} - \Delta\varepsilon_{ij}^*) + \delta_{ij}(\hat{K} - 2/3\hat{G})(\Delta\varepsilon_{ij} - \Delta\varepsilon_{ij}^*), \quad (4)$$

где

$$\Delta e_{ij} = \hat{e}_{ij} - \bar{e}_{ij}, \quad (5)$$

$$\Delta e_{ij}^* = \Delta e_{ij}^p + \Delta e_{ij}^c + \Delta e_{ij}^r - \frac{\Delta G}{2\bar{G}} \bar{\sigma}'_{ij} + \delta_{ij} \left[\Delta(\alpha T) + \Delta\beta - \frac{\Delta K}{3\bar{K}} \bar{\sigma} \right];$$

$\bar{\sigma}'_{ij}, \bar{\sigma}$ – значения девиаторных и шаровой составляющих тензора напряжений в исходном состоянии;

$$\Delta(\alpha T) = \hat{\alpha T} - \bar{\alpha T},$$

$$\Delta\beta = \hat{\beta} - \bar{\beta}, \quad (6)$$

$$\Delta G = \frac{\hat{G} - \bar{G}}{\bar{G}}, \quad \Delta K = \frac{\hat{K} - \bar{K}}{\bar{K}},$$

$\Delta e_{ij}^p, \Delta e_{ij}^c$ и Δe_{ij}^r – изменение необратимых составляющих деформаций пластичности, термической и радиационной ползучести соответственно.

Для определения элементарных изменений пластических деформаций можно воспользоваться вариантом модели термопластичности с комбинированным упрочнением [3], в который введена зависимость материальных функций модели от уровня нейтронного облучения. В модели предполагается, что в процессе развития пластических деформаций поверхность текучести меняет свои размеры (изотропное упрочнение, описываемое изменениями радиуса поверхности текучести C_p) и смещается в пространстве девиаторов напряжений (кинематическое упрочнение, характеризуемое изменением тензора остаточных микронапряжений ρ_{ij}). Радиус поверхности текучести C_p представляется в виде функции, зависящей от температуры T , уровня облучения N и накопленной пластической деформации, характеризуемой параметром k_p (параметром Одквиста):

$$C_p = C_p(T, N, k_p),$$

$$k_p = \int \left(\frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Компоненты тензора ρ_{ij} являются функционалом процесса пластического деформирования. Изменение компонент связано с изменением температуры и пластических деформаций соотношением:

$$\Delta \rho_{ij} = g_1 \Delta e_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \Delta k_p + g_T \rho_{ij} \langle \Delta T \rangle, \quad (8)$$

где $g_1(T, N), g_2(T, N), g_T(T, N)$ – материальные функции, определяемые на основе проведения соответствующих экспериментов, $\langle \Delta T \rangle = \Delta T$ при $\Delta T > 0$, $\langle \Delta T \rangle = 0$ при $\Delta T < 0$. Изменения пластических деформаций определяются на основе ассоциированного закона течения:

$$\Delta e_{ij}^p = \lambda S_{ij}, \quad (9)$$

где λ – параметр, определяемый из условия прохождения текущей поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений в соответствии с алгоритмом, описанным в [3].

Таким образом, для реализации рассматриваемой модели необходимо иметь следующие материальные функции: $C_p(T, N, k_p)$, $g_1(T, N)$, $g_2(T, N)$, $g_T(T, N)$.

Скорость радиационной ползучести \dot{e}_{ij}^r зависит от уровня действующих напряжений σ'_{ij} (девиаторов напряжений), температуры T и может зависеть от накопленного флюенса нейтронов N . Это позволяет записать соотношения для приращений деформаций радиационной ползучести Δe_{ij}^r в следующем виде:

$$\Delta e_{ij}^r = \sigma'_{ij} \cdot B_1(T, N) \cdot \Delta N, \quad (10)$$

где $B_1(T, N)$ – материальная функция модели радиационной ползучести, которая может быть получена на основе проведения соответствующих экспериментов.

Для описания скорости термической ползучести \dot{e}_{ij}^c может быть использована простейшая модель упрочнения [4], применяемая для описания ползучести материалов при термосиловых нагружениях, дополненная учетом влияния на процесс ползучести накопленного флюенса:

$$\dot{e}_{ij}^c = \sigma'_{ij} \cdot B_0(T, N, k_c, \psi), \quad (11)$$

$$B_0(T, N, k_c, \psi) = L_0(\psi, T) H(k_c, T) F_0(T, N),$$

где $L_0(\psi, T)$ – функция, характеризующая начальную скорость термической ползучести материала, отнесенную к единичному напряжению при уровне напряжений, определяемых параметром ψ :

$$\psi = \frac{\sigma'_{ij} \cdot \sigma'_{ij} - (C_0(T, N))^2}{(C_0(T, N))^2}, \quad (12)$$

$C_0(T, N)$ – радиус начальной поверхности ползучести. При этом $C_0(T, N) = C_0(T) F_c(N)$, где $F_c(N)$ – функция, учитывающая влияние накопленного флюенса на начальный радиус поверхности ползучести; $H(k_c, T)$ – функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости; $F_0(T, N)$ – функция, учитывающая влияние накопленного флюенса на скорость термической ползучести при заданном уровне температур. В качестве параметра упрочнения k_c могут быть использованы:

- либо время ползучести $k_c = t$;
- либо длина траектории деформации ползучести $k_c = \int \dot{e}_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c dt$;
- либо энергия диссипации $k_c = \int \sigma'_{ij} \dot{e}_{ij}^c dt$.

Соотношения (4)–(12) позволяют определить изменения напряжений $\Delta \sigma_{ij}$ в точке материала на элементарном шаге изменения внешних воздействий (в точке тела эти воздействия характеризуются изменением величин ΔT , ΔN , Δe_{ij}) при заданных значениях параметров, характеризующих исходное состояние материала ($\bar{\sigma}_{ij}$, параметров пластического состояния), и заданных значениях перечисленных выше материальных функций.

3. Исследование поведения конструкций на основе рассмотренных выше физических соотношений приводит к сложным нелинейным системам разрешающих уравнений. Значительная часть величин, входящих в эти уравнения, является функциями, зависящими от предшествующей истории процесса деформирования, и может быть определена путем интегрирования для конкретных траекторий нагру-

жения. Поэтому решение таких нелинейных задач строится обычно на основе инкрементальной формулировки исходных уравнений и применения современных шаговых методов.

В настоящей методике для повышения эффективности применения шаговых методов используется комбинированная шаговая схема [4], в которой шаги каждого уровня несут различную функциональную нагрузку, при этом их размеры определяются из различных соображений.

На шагах верхнего уровня, которые в дальнейшем будем называть этапами нагружения, осуществляется внешняя линеаризация задачи. Реальная траектория нагружения представляется в виде кусочно-гладкой кривой в пространстве параметров нагружения и аппроксимируется совокупностью прямолинейных участков, величина которых определяется только условиями удовлетворительной аппроксимации реальных траекторий нагружения. Решение нелинейных задач на этапах осуществляется в форме метода начальных напряжений путем итерационного уточнения равновесного состояния для текущей деформированной конфигурации конструкции. Для вычисления изменений необратимых деформаций в пределах этапа последний разбивается на ряд шагов нижнего уровня. На внутренних шагах все вычисления строятся независимо для отдельных точек конструкции без коррекции уравнений равновесия.

Таким образом, в результате последовательного вычисления величин, входящих в уравнения пластичности и радиационной ползучести, на каждом шаге низшего уровня и суммирования их в пределах этапа нагружения могут быть определены все значения функций, необходимые для получения текущего приближения решения нелинейной задачи на этапах нагружения.

Будем считать известным закон изменения действующих на конструкцию внешних воздействий, иначе говоря, для каждого момента времени будем считать известными значения объемных сил F_i , полей нейтронного облучения N и температуры T , заданных в объеме деформируемой системы V , поверхностных сил P_i , заданных на частях ее поверхности Σ_1 , и перемещений u_i^G , заданных на частях ее поверхности Σ_2 .

Рассмотрим изменение НДС конструкции для двух достаточно близких моментов времени \bar{t} и \hat{t} , соответствующих двум ее смежным состояниям: исходному состоянию $t = \bar{t}$ и текущему $t = \hat{t}$. Пусть в исходном состоянии заданному уровню внешних воздействий $\bar{F}_i, \bar{P}_i, \bar{T}, \bar{N}, \bar{u}_i^G$ равновесной конфигурации системы соответствуют значения перемещений \bar{u}_i , напряжений $\bar{\sigma}_{ij}$, деформаций \bar{e}_{ij} , а также параметров, характеризующих историю необратимого деформирования материала, являющихся функциями координат точек системы. Для текущего состояния названные величины обозначим через $\hat{F}_i, \hat{P}_i, \hat{T}, \hat{N}, \hat{u}_i^G, \hat{u}_i, \hat{\sigma}_{ij}, \hat{e}_{ij}$. На основании результатов предыдущего раздела запишем соотношения, устанавливающие связь между изменением напряжений $\Delta\sigma_{ij}$ и деформаций Δe_{ij} на шаге нагружения в каждой точке конструкции в виде (4):

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) + \delta_{ij}(K - 2/3G)(\Delta e_{ii} - \Delta d_{ii}).$$

При фиксированных на текущей итерации значениях коэффициентов Δd_{ij} , определяемых изменениями необратимых деформаций, линеаризованная система разрешающих уравнений, описывающих равновесие системы на этапе нагружения, может быть получена из условия стационарности следующего функционала [3]:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_V \Delta \sigma_{ij} (\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) dV - \int_V \Delta F_i \Delta u_i dV - \int_{\Sigma_1} \Delta P_i \Delta u_i d\Sigma + \\ & + \int_V (\bar{\sigma}_{ij} \Delta e_{ij} - \bar{F}_i \Delta u_i) dV - \int_{\Sigma_1} \bar{P}_i \Delta u_i d\Sigma. \end{aligned} \quad (13)$$

В этом функционале Δu_i – изменения перемещений на этапе нагружения, удовлетворяющих заданным кинематическим граничным условиям; изменения деформаций Δe_{ij} связаны с изменениями перемещений Δu_i известными уравнениями Коши и с изменениями напряжений $\Delta \sigma_{ij}$ уравнениями (4).

Условию стационарности функционала (13) соответствует система разрешающих уравнений, описывающих поведение системы на шаге нагружения, которую можно представить в виде следующего операторного уравнения:

$$\Phi = H^0 \Delta U - \Delta R = 0, \quad (14)$$

где $H^0 = H(t)$ – линейный оператор, определяемый модулями упругости материала при температуре и уровне нейтронного облучения, характеризуемыми текущим значением параметра $t = \hat{t}$; ΔU – функция изменения перемещений точек конструкции для текущего шага нагружения; ΔR – функция нагрузки, включающая в себя постоянную на шаге составляющую ΔR^0 и переменную $\Delta R'$:

$$\Delta R = \Delta R^0 + \Delta R'. \quad (15)$$

Постоянная составляющая $\Delta R^0 = \Delta R^0(t)$ определяется совокупностью внешних воздействий на конструкцию в виде объемных и поверхностных сил, температур, нейтронного облучения, граничных смещений и их изменений на шаге нагружения. Переменная часть $\Delta R' = \Delta R'(U, t)$ включает в себя нелинейные члены, зависящие от решения задачи, и определяется текущими значениями дополнительных деформаций Δd_{ij} .

При решении задач на шаге нагружения оператор H и вектор R_0 формируются в начале шага и не меняются в процессе последовательных приближений. При этом решение задачи (14) представляется в виде:

$$U = U_0 + u, \quad (16)$$

где $U_0 = H^{-1} R^0$ соответствует решению задачи (15) в линейном приближении, u – нелинейная часть вектора решения, зависящая от вектора R' .

Таким образом, согласно принятой схеме линеаризации, решение нелинейной задачи (14) на шаге нагружения сводится к однократному нахождению вектора линейной части решения U^0 и последовательному уточнению нелинейного вектора u в процессе последовательных приближений из уравнения

$$u = H^{-1} \Delta R(U). \quad (17)$$

Численное решение линеаризованных задач осуществляется на основе МКЭ с использованием изопараметрических квадратичных КЭ с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений [5].

Перечисленные выше методические положения реализованы в виде набора программных средств расчета НДС конструктивных элементов при термосиловых и радиационных воздействиях в составе вычислительного комплекса УПАКС [6].

Для иллюстрации работоспособности предложенных моделей, алгоритмов и созданных на их основе программных средств ниже рассмотрено решение ряда конкретных задач.

4. Рассмотрен пример расчета изменений напряжений в стержне квадратного сечения 10×10 мм², закрепленном по торцам от продольных перемещений и выполненном из нержавеющей стали. Стержень находится под действием равномерно распределенных по объему температуры и потока нейтронов, меняющихся согласно следующей последовательности:

- начальное состояние – $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $N_0 = 0$ нейтр/см²;
- промежуточное состояние – $T_1 = 550^\circ\text{C}$, $N_1 = 0$ нейтр/см²;
- конечное состояние – $T_2 = 550^\circ\text{C}$, $N_2 = 4 \cdot 10^{22}$ нейтр/см²;

Процесс нагружения состоит из двух этапов (нагрев и последовательное облучение без нагрева), причем первый этап нагружения состоит из двадцати подэтапов нагружения, а второй этап состоит из десяти подэтапов нагружения. Таким образом, весь процесс терморadiационного нагружения состоит из тридцати подэтапов нагружения.

Было рассмотрено четыре варианта данной задачи с различными предположениями о свойствах материала:

1. Учитывается зависимость модулей упругости материала и коэффициента температурного расширения от уровней действующих температур и нейтронного облучения, также учитывается эффект радиационного распухания.

2. В дополнение к варианту 1 учитывается возможность появления в материале стержня пластических деформаций.

3. В дополнение к варианту 1 учитывается возможность появления в стержне деформаций термической ползучести, при этом предполагается, что временная протяженность первого этапа нагружения $\tau = 10$ часов, а второго этапа нагружения $\tau = 100$ часов.

4. В дополнение к варианту 1 учитывается возможность появления в материале стержня деформаций радиационной ползучести.

Ввиду того, что в процессе нагружения в стержне реализуется однородное напряженное состояние, решение задачи строилось с использованием одного пространственного 20-узлового КЭ с квадратичным законом распределения функций. Исползованные в расчетах материальные функции для аустенитной нержавеющей стали получены путем обработки физико-механических характеристик стали X18H9 и для близкой ей по свойствам стали X18H9T с учетом влияния температуры и накопленного флюенса нейтронов.

На рис. 1 представлены зависимости для всех рассмотренных вариантов задачи, где цифрами отмечены соответствующие варианты.

Результат решения первого варианта задачи демонстрирует, что по мере увеличения температурного воздействия в стержне возникают сжимающие осевые напряжения. При появлении нейтронного облучения происходит также увеличение интенсивности действующих напряжений, возникающих вследствие радиационного распухания материала стержня, и в конце нагружения их величина примерно на четверть больше соответствующих напряжений без учета радиационного распухания.

При учете в материале стержня пластических деформаций, начиная с третьего подэтапа нагружения, происходит релаксация напряжений. Достигнув на пятнадцат-

цатом подэтапе нагружения максимальной величины, в дальнейшем они практически не изменяют своих значений.

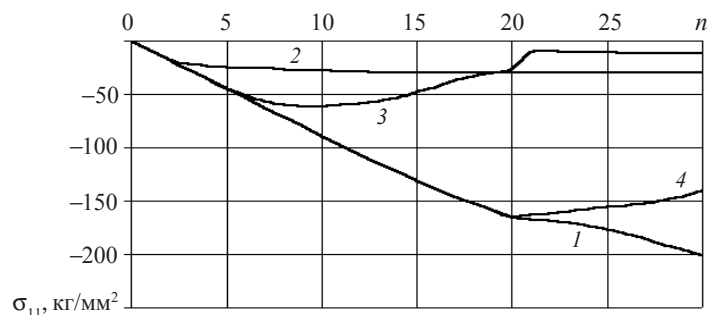


Рис. 1

Рассматривая результаты решения третьего варианта задачи, также можно отметить существенную релаксацию напряжений, вызванную учетом в расчетах деформаций термической ползучести, при этом уровень напряжений в конце нагружения для данного варианта задачи меньше в два с половиной раза соответствующих напряжений для упругопластического варианта задачи.

И, наконец, результаты решения четвертого варианта задачи также демонстрируют существенную релаксацию напряжений в стержне. Однако в данном варианте задачи релаксация напряжений появляется, только начиная с двадцать первого подэтапа нагружения, так как в этом случае она связана с появлением в материале стержня деформаций радиационной ползучести, а нейтронное облучение появляется именно на упомянутом выше подэтапе нагружения.

Анализируя представленные выше результаты, можно сделать вывод, что влияние каждого фактора, влияющего на процесс деформирования облучаемого материала, является существенным и что при расчете НДС конструкции, находящейся в условиях терморadiационных воздействий, необходимо учитывать все перечисленные выше факторы.

Вторая задача посвящена расчету НДС обечайки, находящейся в условиях пространственных радиационно-термических полей. Обечайка представляет собой круговую цилиндрическую оболочку длиной $L = 1900$ мм с внутренним диаметром $\varnothing 3300$ мм и толщиной стенки $h = 50$ мм. Обечайка выполнена из нержавеющей стали X18H9. Она находится под действием термического и радиационного полей, принятых постоянными по толщине стенки и меняющимися по длине цилиндра Y согласно следующим зависимостям: температура увеличивается линейно от 360 до 450°C , а флюенс меняется по синусоидальному закону, увеличиваясь от 10^{22} по краям обечайки до $8 \cdot 10^{22}$ нейтр/см² в центре.

При составлении расчетной схемы принималось, что вдоль сечений $Y = 0$ и $Y = L$ оболочка свободно оперта на элементы, препятствующие радиальным перемещениям кромок.

Вообще говоря, при заданных воздействиях и краевых условиях обечайка должна находиться в условиях осесимметричной деформации и для расчета ее НДС может быть использована двумерная постановка задачи. Однако для иллюстрации применения методики для анализа конструкции при произвольных терморadiационных нагружениях задача рассматривалась в пространственной постановке с учетом симметрии вдоль плоскостей XOY и YOZ . При численном решении задачи

на основе МКЭ обечайка (1/4 симметричная часть) аппроксимировалась сеткой пространственных изопараметрических КЭ с числом элементов: вдоль оси обечайки $n_1 = 8$, вдоль окружной координаты $n_2 = 12$, и по толщине стенки $n_3 = 1$. Схема дискретизации оболочки изображена на рис. 2.

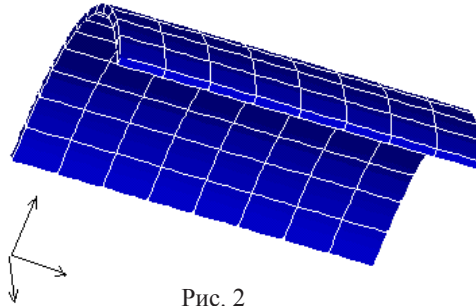


Рис. 2

Процесс нагружения конструкции представлялся в виде двух этапов: на первом этапе обечайка нагружалась температурным полем без облучения, на втором производилось облучение нагретой оболочки до расчетных значений флюенса. Этап радиационного нагружения обечайки осуществлялся за десять подэтапов с равномерно увеличивающейся дозой облучения.

В результате нагрева обечайки произошло ее деформирование. Линии уровня интенсивности напряжений σ_{ii} (кГ/мм²) показаны на рис. 3.

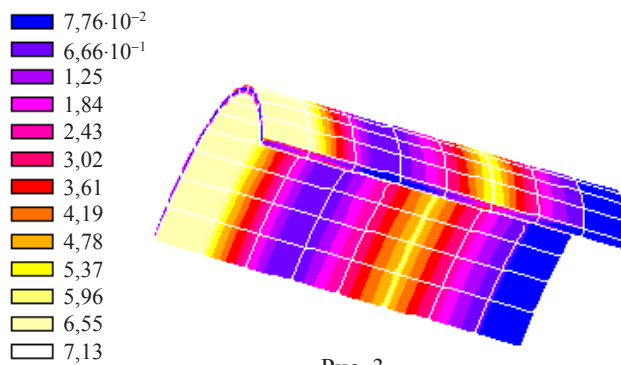


Рис. 3

Результаты решения задачи для конца второго этапа нагружения представлены на рис. 4–6.

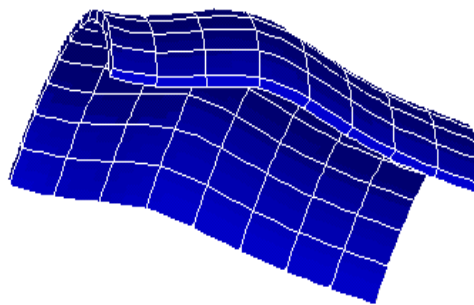


Рис. 4

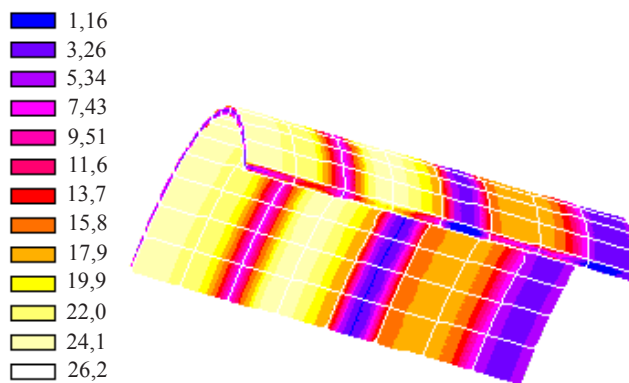


Рис. 5

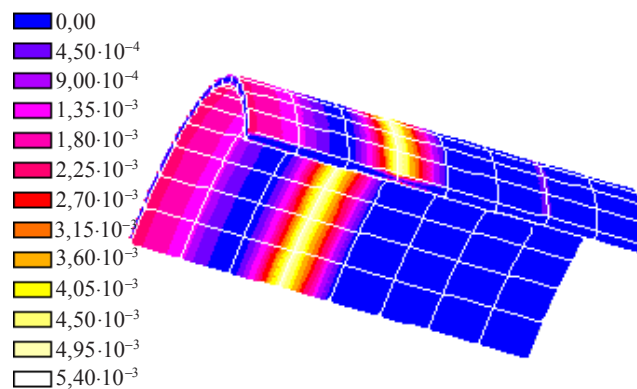


Рис. 6

На рис. 4 изображена деформированная конфигурация обечайки с десятикратным масштабом увеличения перемещений. Линии уровня интенсивности напряжений σ_u (кГ/мм²) изображены на рис. 5. В процессе радиационного нагружения в средней части обечайки (в районе максимального флюенса) появилась узкая зона незначительных по величине пластических деформаций, ориентированных в окружном направлении. Картина распределения пластических деформаций по поверхностям обечайки изображена на рис. 6.

В заключение следует отметить, что изложенная методика может быть применена в расчетах НДС конструктивных элементов из аустенитных нержавеющей сталей, работающих в условиях повышенных температур и флюенса, например, для бокового отражателя реакторов БН.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-01-08055, 05-01-00837) и ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники" (ЛОТ № 2005-Р4-112/001, XII очередь – научные школы, шифр темы Р4-112/001/404).

Литература

1. Писаренко, Г.С. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках / Г.С. Писаренко, В.Н. Киселевский. – Киев: Наукова думка, 1979. – 284 с.
2. Забудько, Л.М. Работоспособность ТВС быстрых реакторов / Л.М. Забудько, Ю.И. Лихачев, А.А. Прошкин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.

3. Казаков, Д.А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций / Д.А. Казаков, С.А. Капустин, Ю.Г. Коротких. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. – 226 с.

4. Капустин, С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: Учеб. пособие / С.А. Капустин. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 150 с.

5. Точность численного интегрирования в конечных элементах с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений. Исследование и оптимизация конструкций / С.А. Капустин, [и др.] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. – 1987. – С. 77–85.

6. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС №147 от 31.10.2002.

[21.06.2005]