УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Том 152, кн. 4 Физико-математические науки *2010*

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ, ТЕПЛОВЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С.А. Капустин

Аннотация

В статье рассмотрены методические основы и структура средств для численного моделирования процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморадиационных воздействий. Представлены модели, описывающие основные эффекты упруговязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах, а также постановки задач и основные уравнения исследования на основе МКЭ процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых и терморадиационных нагружениях с использованием предложенных моделей материалов. Рассмотрены архитектура и функциональные возможности программных средств, реализующих предложенные методические разработки на современных ЭВМ.

Ключевые слова: моделирование, процесс, разрушение, деформирование, повреждения, пластические деформации, ползучесть.

Практика создания и эксплуатации современных инженерных сооружений требует постоянного совершенствования вычислительных средств оценки прочности и ресурса проектируемых и действующих конструкций. Такие средства должны обеспечивать возможность детального описания термомеханических процессов в материале исследуемых конструкций с учетом реальных свойств и условий нагружения. При этом особые требования предъявляются к моделям, описывающим поведение конструкционных материалов при наличии силовых, тепловых и радиационных воздействий. В частности, такие модели должны описывать основные эффекты упруговязкопластического поведения материалов при монотонных и циклических, пропорциональных и непропорциональных, изотермических и неизотермических нагружениях, описывать основные стадии развития повреждений в материалах в процессе их деформирования и учитывать влияние этих повреждений на характеристики процессов деформирования. При этом очевидно, что описать перечисленные эффекты в рамках одной модели практически невозможно. Выходом из этой ситуации может служить создание составной модели, представляющей собой набор более простых моделей, настраивающихся на описание конкретного механического процесса в зависимости от наличия необходимых свойств исследуемого материала и условий решаемой задачи.

Естественно, что реализация подобных моделей в задачах расчета конструкций приводит к сложным системам нелинейных уравнений, для решения которых должны быть созданы специальные вычислительные схемы и алгоритмы.

В настоящей работе обсуждается один из возможных вариантов создания таких средств, созданный в НИИ механики Нижегородского государственного университета в рамках вычислительного комплекса ВК УПАКС [1–3].

Методическую основу ВК составляют три основных раздела: модели, описывающие поведение материалов, модели поведения конструкций на основе предложенных моделей материалов и программно-алгоритмические разработки, обеспечивающие реализацию математических моделей и численных методик в составе конкретных программных средств.

Каждый из этих разделов может развиваться независимо, однако все они должны быть увязаны в рамках единого вычислительного процесса.

Первый, наиболее важный, с нашей точки зрения, раздел связан с реализацией модели поврежденного материала [2, 4–6].

В самых общих чертах предложенная модель поврежденного материала представляет собой составную иерархическую модель в основу, которой положена возможность представления сложного процесса развития взаимосвязанных эффектов деформирования и разрушения в виде последовательности формально независимых элементарных актов, описываемых соответствующими частными моделями пластичности, ползучести и накопления повреждений. Учет взаимного влияния таких элементарных актов осуществляется на верхнем уровне в общей модели поврежденного материала. При этом влияние различных видов поврежденности на процесс деформирования строится на основе инвариантной по отношению к природе этих повреждений скалярной меры поврежденности ω путем введения зависимости упругих характеристик материала от текущего значения функции ω. С этой целью в уравнения, описывающие равновесие деформируемых систем, вводятся две характеристики напряжений: эффективные напряжения σ_{ij}, действующие на поврежденных площадках, и приведенные σ^*_{ij}, статически эквивалентные первым, но отнесенные к неповрежденным площадкам:

$$\sigma^*_{ij} = \sigma_{ij}(1-\omega).$$

Общие соотношения модели поврежденного материала устанавливают связь между изменениями приведенных напряжений и деформаций на элементарном шаге изменения внешних воздействий. Они имеют вид уравнений упругости с дополнительными членами $\Delta d_{i\,j}$, обусловленными эффектами температуры, необратимого деформирования и деградации свойств материала, связанной с накоплением повреждений:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) + \delta_{ij}\left(K - \frac{2}{3}G\right)(\Delta e_{i\,i} - \Delta d_{i\,i});$$

$$\Delta d_{ij} = \Delta e^*_{ij} + \omega(\Delta e_{ij} - \Delta e^*_{ij});$$

$$\Delta e^*_{ij} = \Delta e^p_{ij} + \Delta e^c_{ij} - \frac{\Delta G^* \overline{\sigma}'_{ij}}{2G^*\overline{G}} + \delta_{ij}\left[\Delta\left(\alpha T\right) - \frac{\Delta K^* \overline{\sigma}}{3K^*\overline{K}}\right];$$

$$\Delta G^* = G^* - \overline{G}^*; \quad G^* = (1-\omega)G; \quad \overline{G}^* = (1-\overline{\omega})\overline{G};$$

$$\Delta K^* = K^* - \overline{K}^*; \quad K^* = (1-\omega)K; \quad \overline{K}^* = (1-\overline{\omega})\overline{K},$$

где $K = K(T)$, $\overline{K} = K(\overline{T})$, $G = G(T)$, $\overline{G} = G(\overline{T})$ – модули объемной и сдвиговой деформаций соответственно в исходном и текущем состояниях; $\Delta\left(\alpha T\right)$ – изменение тепловой деформации; $\overline{\omega}$, ω – значения мер поврежденности в исходном (начале шага) и текущем (в конце шага) состояниях; $\overline{\sigma}$, $\overline{\sigma}'_{ij}$ – шаровая и девиаторная составляющие тензора эффективных напряжений в исходном состоянии.

Формальное представление частных моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений, используемых в общей модели поврежденного материала, имеют вид:

$$\Delta e_{ij}^p = \Delta e_{ij}^p\left(\sigma_{ij}, T, \Delta e_{ij}, r_\alpha^p\right); \quad \Delta e_{ij}^c = \Delta e_{ij}^c\left(\sigma_{ij}, T, \Delta e_{ij}, r_q^c\right);$$

$$\Delta\omega_k = \Delta\omega_k\left(\Delta\Psi_k, \overline{\omega}, q_\beta^k\right); \quad \Delta\Psi_k = \Delta\Psi_k\left(\sigma_{ij}, T, \Delta e_{ij}^{=}, r_{ks}^r, \overline{\Psi}_k\right),$$

где r_α^p $(\alpha = 1, \ldots, n)$ и r_q^c $(q = 1, \ldots, m)$ – скалярные и тензорные параметры, характеризующие историю пластического деформирования и ползучести (функционалы процесса); q_β^k $(\beta = 1, \ldots, \mu)$ – константы, характеризующие свойства материала, n, m, μ – число параметров r_α^p, r_q^c и констант q_β^k соответственно. При этом в рамках общей модели может функционировать широкий набор различных конкретных частных моделей, соответствующих такому формальному определению.

Каждая конкретная модель может быть получена из формальной, если в последней определить число, структуру и функциональные связи скалярных и тензорных параметров r_α^p, r_q^c, r_{ks}^r, характеризующих историю упругопластического деформирования, ползучести и развития поврежденности материала.

В основу частных моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений, реализованных в составе рассмотренной модели поврежденного материала, положены варианты моделей термопластичности и термоползучести с комбинированным упрочнением, а также различные варианты кинетических уравнений, описывающих накопление повреждений и деградацию материала для различных механизмов разрушения [2–5, 7].

Ниже представлены некоторые варианты конкретизации таких моделей, идентифицированные в ВК УПАКС с помощью числовых значений параметров: PI (пластичность), CI (ползучесть), RPI (накопление повреждений при пластичности), RCI (накопление повреждений при ползучести), RHI (накопление хрупких повреждений).

В приведенных ниже выражениях символьные обозначения с чертой наверху обозначают накопленные значения соответствующих функций, а знак $\langle\Delta\rangle$ – их приращения.

Варианты моделей пластичности

Общие соотношения

Условие пластичности:

$$S_{ij} * S_{ij} - C_p^2 = 0,$$

где $S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}$ – тензор активных напряжений, C_p – радиус поверхности текучести, ρ_{ij} – тензор остаточных микронапряжений.

Изменение C_p и ρ_{ij} на шаге нагружения:

$$C_p = \overline{C}_p + \Delta C_p, \quad \rho_{ij} = \overline{\rho}_{ij} + \Delta\rho_{ij}.$$

Приращение пластических деформаций:

$$\Delta e_{i\,j}^p = \lambda^p \cdot \left(\sigma'_{i\,j} - \rho_{i\,j}\right),$$

где λ^p определяется из условия прохождения текущей поверхности текучести через точку нагружения.

Вариант PI=1

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

$$\rho_{ij} = \overline{\rho}_{ij} + \Delta\rho_{ij};$$
$$\Delta\rho_{ij} = g_1^p \Delta e_{ij}^p + g_2^p \rho_{ij} \Delta\kappa_p + g_t^p \rho_{ij} \langle \Delta T \rangle ,$$

где κ_p – длина траектории пластической деформации:

$$\kappa_p = \overline{\kappa}_p + \Delta\kappa_p; \quad \Delta\kappa_p = \left(\frac{2}{3} \cdot \Delta e_{i\,j}^p \cdot \Delta e_{i\,j}^p \right)^{1/2}.$$

Материальные функции:

$$G(T), \quad K(T), \quad \alpha(T), \quad C_p(T, \kappa_p), \quad g_1(T), \quad g_2(T), \quad g_T^p(T).$$

Вариант PI=2

Вводится дополнительная поверхность «памяти» для тензора остаточных микронапряжений ρ_{ij} с радиусом ρ_c:

$$F_\rho = \rho_{ij} \cdot \rho_{ij} - \rho_c^2 = 0;$$

$$\Delta C_p = \left(q_k^p H^+ + q_c^p \left(C_s - C_p \right) H^- \right) \Delta\kappa_p + q_t^p \Delta T;$$
$$\Delta\rho_{ij} = g_1^p \Delta e_{ij}^p + g_2^p \rho_{ij} \Delta\kappa_p + g_t^p \rho_{ij} \langle \Delta T \rangle ;$$
$$\Delta\rho_c = \Delta\rho_c(\rho_{ij},\, \Delta\rho_{ij},\, \rho_{ij}^R);$$
$$\Delta\kappa_p = (2/3 \cdot \Delta e_{ij}^p \cdot \Delta e_{ij}^p)^{1/2}.$$

Материальные функции:

$$q_k^p(\kappa_p, T), \quad q_c^p(T), \quad q_T^p(\kappa_p, T), \quad g_1^p(T), \quad g_2^p(T), \quad g_T^P(T), \quad C_s(\rho_c, T), \quad C_s(\rho_c, T).$$

Варианты моделей ползучести

Общие соотношения

Условие ползучести:

$$F_c = S_{ij}^c S_{ij}^c - C_c^2 = 0,$$

где $S_{ij}^c = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^c$ – тензор активных напряжений, C_A – радиус поверхности ползучести, ρ_{ij}^A – тензор остаточных микронапряжений при ползучести.

Скорость деформаций ползучести:

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c S_{ij}^c.$$

Вариант CI=1

$$C_c = C_c \left(\kappa_c \,, T \right);$$
$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{e}_{ij}^c + g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\kappa}_c + g_T^c \rho_{ij}^c \langle \dot{T} \rangle;$$
$$\Delta e_{ij}^c = \widetilde{\dot{e}}_{ij}^c \Delta t, \quad \Delta\rho_{ij}^c = \widetilde{\dot{\rho}}_{ij}^c \Delta t;$$
$$\Delta\kappa_c = \left(\frac{2}{3} \Delta e_{ij}^c \Delta e_{ij}^c \right)^{1/2}.$$

Материальные функции:

$$g_1^c \left(T \right), \quad g_2^c \left(T \right), \quad g_T^c \left(T \right), \quad \lambda_c \left(S_{ij}^c \,, T \right).$$

Вариант CI=2

$$C_c = C_0 \left(T \right); \quad S_{ij} = \sigma'_{ij};$$

$$\lambda^c = L(T,\Theta)H(T,\tau);$$

$$L(T,\Theta) = \dot{e}^c_{ij}/S_{ij} \quad \text{при} \quad \tau = 0;$$

$$\Theta = \frac{S_{ij}S_{ij} - C_c^2}{C_c^2},$$

где $\tau = t_c$, или $\tau = \kappa_c$, или $\tau = \int\limits_0^t S_{ij}\,\dot{e}^c_{ij}\,dt$.

Материальные функции:

$$C_A(T), \quad L(T,\Theta), \quad H(T,\Theta,\tau).$$

Варианты моделей накопления повреждений

Накопление повреждений при пластичности

Общие соотношения

$$\Delta\omega = q\omega^{q-1/q}\Delta\psi_0;$$

$$\Delta\psi_0 = \begin{cases} \Delta\psi/(1-\psi_A) & \text{при} \quad \psi \geq \psi_A, \\ 0 & \text{при} \quad \psi < \psi_A; \end{cases}$$

$$\psi_A = \psi_A(T,\,\rho_c) = W_A/W_0^R,$$

где W_A – амплитуда значений энергии пластического разрыхления к концу первой фазы накопления повреждений при одноосном растяжении;

$$\Delta\psi = \frac{\Delta W}{W^R(\Pi)}; \quad W^R(\Pi) = f_1(\Pi)\,W_0^R(T),$$

где $W_0^R(T)$ – предельная энергия пластического разрыхления при одноосном растяжении; $f_1(\Pi)$ – функция вида НДС ($0 \leq f_1(\Pi) < \infty$);

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}};$$

Вариант RPI=2

$$\Delta W = \rho_{ij}\Delta e^p_{ij} \quad \text{при} \quad \Delta W > 0.$$

Материальные функции:

$$\psi_A(T,\rho_c), \quad W_0^R(T), \quad q(T).$$

Вариант RPI=3

$$\Delta W = a_{ij}\Delta e^p_{ij}, \quad a_{ij} = \sigma'_{ij} - S_{ij}\frac{C_0^p}{C_p};$$

$W_0^R(T) = \int\limits_0^{e_R} a_{ij}de^p_{ij}$ – предельная энергия пластического упрочнения.

Материальные функции:

$$W_0^R(T), \quad q(T).$$

Накопление повреждений при ползучести

Вариант RCI=1

$$\Delta\omega = \rho\,\overline{\omega}^{\,p-1/p}\Delta\psi;$$

$$\Delta\psi = \frac{\Delta V}{V^R(\Pi)}; \quad \Delta V = \sigma'_{ij}\Delta e^c_{ij};$$

$$V^R(\Pi) = f_2()V_0^R(T),$$

где $V_0^R(T)$ – предельное значение энергии диссипации при ползучести в условиях одноосного растяжения; $f_2(\Pi)$ – функция вида НДС ($0 \le f_2(\Pi) < \infty$).

Материальные функции:

$$V_0^R(T), \quad p(t).$$

Накопление хрупких повреждений

Вариант RHI=1

$$\Delta\omega = \begin{cases} 0 & \text{при } \ \sigma_1 < \sigma_0^R, \quad \sigma_3 > \sigma_0^S, \\ \dfrac{C(1-\overline{\omega})}{\sigma_1}(\sigma_1 - \sigma_0^R) & \text{при } \sigma_1 > \sigma_0^R, \\ \dfrac{C(1-\overline{\omega})}{\sigma_3}(\sigma_3 - \sigma_0^S) & \text{при } \ \sigma_3 < \sigma_0^S, \end{cases}$$

где $\sigma_0^R(T)$, $\sigma_0^S(T)$ – разрушающие значения эффективных напряжений при растяжении и сжатии.

Материальные функции:

$$\sigma_0^R(T), \quad \sigma_0^S(T).$$

На основе приведенных моделей, предназначенных для исследования традиционных, начально-изотропных однородных материалов, также предложены и реализованы модели, описывающие поведение кусочно-однородных материалов, представляющих собой композицию нескольких периодически повторяющихся фрагментов, свойства которых могут зависеть от текущего вида НДС [7–10].

Кроме этого, на базе предложенных выше моделей поврежденного материала при участии ОКБМ им. И.И. Африкантова и ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны модели, описывающие поведение конструкционных материалов в условиях терморадиационных воздействий.

Известно, что нейтронное облучение может существенно влиять на изменение механических характеристик многих конструкционных материалов. Наиболее сильно влияние облучения сказывается на изменении пределов текучести и прочности, снижении характеристик пластичности, а также на размерные изменения материалов, вызванные радиационным формоизменением и радиационной ползучестью. При этом все физико-механические характеристики материалов в условиях терморадиационных воздействий становятся функциями (а в ряде случаев функционалами) процессов деформирования, изменения температуры и нейтронного облучения.

Ниже представлены основные соотношения моделей, описывающих поведение хромоникелевых сталей в условиях терморадиационных воздействий с учетом перечисленных эффектов [3, 11]. Как видно из этих соотношений, построенных на основе экспериментальных зависимостей, полученных в ЦНИИ КМ «Прометей», характеристики процесса деформирования этих сталей зависят от параметров упруговязкопластического деформирования, температуры T, дозы нейтронного облучения N и интенсивности облучения $\dot{N}$.

Структура соотношений модели облученных хромоникелевых сталей

$$\Delta\sigma_{ij} = 2\widehat{G}(\Delta e_{ij} - \Delta e^*_{ij}) + \delta_{ij}(\widehat{K} - 2/3\widehat{G})(\Delta e_{ij} - \Delta e^*_{ij});$$

$$\Delta e^*_{ij} = \Delta e^p_{ij} + \Delta e^c_{ij} - \frac{\Delta G}{2\overline{G}\,\widehat{G}}\,\overline{\sigma}'_{ij} + \delta_{ij}\left[\Delta(\alpha T) + \Delta\beta - \frac{\Delta K}{3\overline{K}\,\widehat{K}}\,\overline{\sigma}\right];$$

$$\Delta(\alpha T) = \widehat{\alpha}\,\widehat{T} - \overline{\alpha}\,\overline{T}, \quad \alpha = \alpha(N,T);$$

$$\Delta\beta = \dot{\beta}\Delta N, \quad \dot{\beta} = \dot{\beta}(\dot{N}, N, \sigma, T).$$

Терморадиационная ползучесть

$$\dot{e}^c_{ij} = \sigma'_{ij}(B_0 + B_1\dot{N});$$

$$B_0 = B_0(\psi,\tau,T,N) = L_0(\psi,T)H(\tau,T)F_0(\dot{N},T);$$

$$B_1 = B_1\,(T,N);$$

$$\psi = \psi(\sigma), \quad \psi = \frac{\sigma'_{ij}\,\sigma'_{ij} - (C^N_c)^2}{(C^N_c)^2};$$

$$C^N_c(N,T) = C_c(T)F_c(N,T).$$

Пластичность (вариант модели PI=1 с учетом зависимости материальных функций пластичности от N)

$$C^N_p = C^N_p(k_p,T,N) = C_p(k_p,T)F_p(N,T);$$

$$\Delta\rho_{ij} = g_{1N}\Delta e^p_{ij} + g_{2N}\rho_{ij}\Delta k_p + g_{TN}\rho_{ij}\,\langle T\rangle\,;$$

$$g_{1N} = g_1(N,T), \quad g_{2N} = g_2(N,T), \quad g_{TN} = g_T(T).$$

Получены аналогичные соотношения, описывающие поведение конструкционных графитов в условиях терморадиационных воздействий [3, 12, 13]. В отличие от рассмотренной выше модели хромоникелевых сталей, для графитов использовались более простые зависимости, определяющие радиационное формоизменение и радиационную ползучесть, однако в уравнениях, описывающих процесс пластического деформирования графита, потребовалось учесть зависимость характеристик пластичности от параметра П текущего вида НДС.

Кроме этого известно, что некоторые виды конструкционных графитов проявляют значительную анизотропию физико-механических свойств в направлении вытяжки графита при его изготовлении. Поэтому наряду с приведенными соотношениями модели для изотропного графита разработана структурно-феноменологическая модель, позволяющая дополнительно учесть анизотропию свойств графита в направлении вытяжки [13].

Исследование поведения конструкций на основе рассмотренных выше уравнений строится путем пошагового интегрирования инкрементальных уравнений, записанных в метрике текущей деформированной конфигурации с использованием комбинированной шаговой схемы [2, 3, 6].

Суть этой схемы заключается в оптимальном сочетании простейших схем интегрирования эволюционных уравнений пластичности, ползучести и накопления повреждений в отдельных точках материала с итерационным уточнением равновесного состояния конструкции в целом.

На шагах верхнего уровня (этапах нагружения) осуществляется внешняя линеаризация задачи.

Реальный процесс нагружения представляется в виде кусочно-гладкой кривой в пространстве параметров нагружения и аппроксимируется совокупностью прямолинейных участков, величина которых определяется условиями удовлетворительной аппроксимации исследуемой траектории.

Каждый этап, в свою очередь, подразделяется на ряд регулярных шагов среднего уровня (подэтапов), число которых определяется из условия эффективности применения используемой схемы геометрической линеаризации.

Решение нелинейных задач на каждом подэтапе осуществляется с помощью метода начальных напряжений.

Для ускорения сходимости итерационного процесса на подэтапах используется схема промежуточных экстраполяций [2, 14], позволившая значительно ускорить процесс решения нелинейных задач. В результате завершения вычислений на подэтапе производится пересчет конфигурации системы и компонент тензора напряжений.

Численное решение линеаризованных задач осуществляется на основе МКЭ с использованием универсальных моделей изопараметрических КЭ с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений, обладающих высокой эффективностью при анализе как массивных, так и тонкостенных фрагментов [6, 15].

Для определения изменений необратимых деформаций и поврежденности в пределах подэтапа строится внутренняя шаговая схема, позволяющая с нужной степенью точности вычислить скорости изменения этих величин для внутренних точек траекторий деформирования и проинтегрировать в пределах текущего этапа. На внутренних шагах все вычисления строятся независимо для тех точек материала, где происходит изменение необратимых деформаций без коррекции уравнений равновесия.

Протяженность шагов нижнего уровня $\delta\tau_r$ $(\Sigma\delta\tau_r = 1)$ выбирается из условий, обеспечивающих заданную точность вычисления скоростей изменения необратимых деформаций и поврежденности для внутренних точек траектории нагружения и интегрирования их в пределах рассматриваемого этапа. При вычислении текущей протяженности шага $\delta\tau$ в текущей точке траектории деформирования сначала производится независимое вычисление протяженности из условий пластичности $\delta\tau^p$, ползучести $\delta\tau^c$, а затем выбирается наименьшая из протяженностей

$$\delta\tau = \min\{\delta\tau^p,\, \delta\tau^c\}.$$

Таким образом, в результате последовательного вычисления величин, входящих в уравнения пластичности, ползучести и накопления повреждений 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.

Ниже приведена функциональная характеристика шагов перечисленных уровней.

Шаги верхнего уровня (этапы нагружения)

1. Назначение:
   - внешняя линеаризация задачи.
2. Условия выбора размера шага (УВРШ):
   - удовлетворительная аппроксимация траектории нагружения.

Шаги среднего уровня (подэтапы)

1. Назначение:
   - решение физически нелинейной задачи с учетом коррекции исходного состояния;

- организация процесса последовательных приближений с использованием схемы промежуточных экстраполяций;
- формирование конфигурации и параметров НДС для текущего состояния.

2. УВРШ:
   - эффективность схемы геометрической линеаризации.

Шаги нижнего уровня

1. Назначение:
   - вычисление элементарных изменений δe^p_{ij}, δe^A_{ij}, $\delta\omega_k$;
   - интегрирование приращений Δe^p_{ij}, Δe^A_{ij}, $\Delta\omega$.
2. УВРШ:
   - точность вычисления Δe^p_{ij}, Δe^A_{ij}, $\Delta\omega$.

Для оценки работоспособности конструкций, нарушение которой может быть связано с разрушением, исчерпанием несущей способности или другими видами предельных состояний, в процессе решения задачи осуществляется анализ нескольких критериальных условий [2, 3, 6], относящихся к одной из двух основных групп.

В первой группе рассматриваются локальные критерии, заключающиеся в достижении допустимых значений мер поврежденности $|\omega|$, пластических деформаций $|\kappa_p|$, различных мер напряжений $|\sigma|$ в одном или нескольких смежных физических узлах.

Вторая группа критериев определяет условия исчерпания конструкцией ее несущей способности (глобальное нарушение прочности). При этом малое изменение внешних воздействий заданного вида приводит к большим изменениям перемещений и деформаций, интенсивно возрастающим по мере увеличения параметра нагрузки, то есть наступает потеря устойчивости необратимого деформирования. Проверка такого состояния конструкции осуществляется по изменению определителя системы алгебраических уравнений на этапах нагружения и (или) на основе анализа изменения вектора узловых перемещений $\{u\}_n$ нелинейной части решения задачи на текущем этапе в процессе последовательных приближений. Длина этого вектора $L(n) = |\{u\}_n|$ является функцией номера приближения n и обладает рядом особенностей, позволяющих использовать ее для установления момента начала потери устойчивости. В частности, при достаточной гладкости функций, определяющих процесс необратимого деформирования материала, L является гладкой, монотонно возрастающей функцией, имеющей положительную первую производную $dL/dn > 0$.

Для сходящихся процессов $dL/dn < 0$ и при возрастании n функция и ее производные стремятся к своим предельным значениям.

Перечисленные особенности поведения функции $L(n)$ позволили использовать ее для оценки несущей способности конструкций в процессе необратимого деформирования. При этом признаком исчерпания несущей способности служит условие

$$dL/dn > 0, \quad d^2L/dn^2 > 0.$$

Проверка этого условия осуществляется в процессе последовательных приближений на каждом шаге нагружения.

Следует также иметь в виду, что непосредственное применение описанных выше схем для исследования поведения конструкций при циклических нагружениях путем последовательного интегрирования уравнений для большого числа циклов, представляется весьма затруднительным из-за большой трудоемкости вычислений и возможности накопления численной погрешности. В связи с этим в настоящей статье обсуждаются реализованные в составе программных средств УПАКС алгоритмы, позволяющие значительно сократить общую трудоемкость решения задач

оценки малоцикловой прочности конструкций путем экстраполяции по циклам параметров, характеризующих упругопластическое состояние и поврежденность материала в узлах конструкции [3, 16, 17].

Такая экстраполяция может осуществляться либо до завершения первой стадии процесса развития повреждений, характеризующейся началом влияния поврежденности на характеристики процесса деформирования, после чего решение задачи продолжается в обычном режиме, либо до достижения в каком-либо узле предельного значения $\omega = |\omega|$, после чего процесс решения задачи заканчивается и фиксируется соответствующее число циклов. На основе результатов второго варианта экстраполяции может быть получена приближенная оценка предельного числа циклов до начала разрушения конструкции.

Перечисленные модели, численные схемы и алгоритмы послужили методической основой создания программных средств решения нелинейных термомеханических задач прочности конструкций на основе МКЭ в рамках вычислительного комплекса ВК УПАКС [1–3, 6].

Одной из особенностей архитектуры УПАКС, отличающей его от отечественных и зарубежных программных средств аналогичного назначения, является наличие специализированного информационного обеспечения, включающего локальную базу данных (ЛБД) и базу данных конструкционных материалов (БДМ).

ЛБД обеспечивает эффективный доступ к данным, определяющим состояние исследуемых объектов в процессе их нагружения, и позволяет легко реализовать в составе основных программных средств новые модели, схемы и алгоритмы, а также обеспечить информационную совместимость комплекса с другими программными средствами (препроцессорами, постпроцессорами).

БДМ представляет собой автономную подсистему обеспечения расчетов прочности данными по свойствам конструкционных материалов [2, 3, 18]. Кроме естественных функций накопления и хранения данных с помощью средств БДМ осуществляется обработка первичных экспериментальных данных, построения на их основе материальных функций, необходимых для работы различных моделей, описывающих поведение материалов, и оперативный доступ к данным из программных средств, реализующих эти модели.

Некоторые результаты численных, характеризующие область применения и возможности методических и программных средств ВК УПАКС, представлены в публикациях [2–5, 7–13, 16, 17, 19, 20].

Работа выполнена при финансовой поддержке Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2010 годы) (регистрационный номер проекта 2.1.2./881).

Summary

S.A. Kapustin. Numerical Analysis of Elastic-Viscoplastic Deformation and Failure Processes in Structures under Quasistatic Force, Thermal and Radiation Effects.

The paper deals with the methodological basis and the means for numerically analyzing deformation and failure processes of materials and structures subject to quasistatic thermal stress and thermal radiation effects. Models describing the main effects of elastic-viscoplastic deformation and damage accumulation in structural materials are introduced. The problem statements and basic equations for the FEM-based analysis of the deformation and failure processes of structures under quasistatic thermal stress and thermal radiation loading using the suggested models are presented. The architecture and functional capabilities of the modern software tools for the realization of the developed methodological projects are discussed.

Key words: modelling, process, failure, deformation, damages, plastic strains, creep.

Литература

1. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.
2. *Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г.* Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. – Н. Новгород: Изд-во Нижегор. гос. ун-та, 1999. – 226 с.
3. *Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А.* Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморадиационных воздействий // Тр. III школы семинара «Современные проблемы ресурса материалов и конструкций». – М.: МАМИ, 2009. – С. 90–104.
4. *Капустин С.А.* Численное моделирование процессов деформирования конструкций с учетом соотношений механики поврежденной среды // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико- математических процессов: Всесоюз. межвуз. сб. – Горький: Горьк. ун-т, 1989. – С. 4–14.
5. *Капустин С.А. и др.* Экспериментально-теоретическое изучение поведения изделий из жаропрочного сплава в условиях высокотемпературной ползучести // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород, 2008. – Вып. 70. – С. 100–111.
6. *Капустин С.А.* Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел. – Н. Новгород: Изд-во Нижегор. гос. ун-та, 2002. – 150 с.
7. *Капустин С.А., Лихачева С.Ю.* Численный анализ поведения конструкций из кусочно-однородных материалов, имеющих блочно-периодическую структуру // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород, 2000. – Вып. 62. – С. 93–100.
8. *Капустин С.А., Лихачева С.Ю., Чурилов Ю.А.* Моделирование процессов деформирования и разрушения конструкций кирпичной кладки при квазистатических нагружениях // Избранные труды Межд. конф. «Проблемы надежности машин и конструкций». – М., 2003. – С. 104–108.
9. *Аляевдин П.А., Капустин С.А., Симбиркин В.Н., Торопов В.В., Чурилов Ю.А.* Экспериментальное и численное моделирование процесса деформирования и разрушения кирпичной стенки в условиях плоского изгиба // Вестн. ННГУ. Сер. Механика. – 2004. – Вып. 1. – С. 114–123.
10. *Капустин С.А., Кулагин Ю.М., Лихачева С.Ю.* Расчет методом конечных элементов прочности сооружений кирпичной кладки // Приволж. науч. журн. – 2007. – № 1. – С. 33–43.
11. *Капустин С.А., Горохов В.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Марголин Б.З., Бучатский А.А.* Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций из нержавеющих сталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморадиационных воздействий // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород, 2007. – Вып. 69. – С. 106–116.
12. *Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Рябцов А.В.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния изделий из графита при терморадиационных воздействиях // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород, 2004. – Вып. 66. – С. 51–61.
13. *Капустин С.А. и др.* Численное моделирование поведения конструкций из трансверсально-изотропных материалов в условиях квазистатических силовых и терморадиационных воздействий // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н. Новгород, 2006. – Вып. 68. – С. 53–60.

14. *Капустин С.А., Прок А.Е.* Схема промежуточных экстраполяций для анализа неупругого поведения конструкций // Алгоритмизация и автоматизация научных исследований: Всесоюз. межвуз. сб. – 1988. – С. 107–111.

15. *Капустин С.А., Латухин А.Ю. и др.* Точность численного интегрирования в конечных элементах с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций: Всесоюз. межвуз. сб. – 1987. – С. 77–85.

16. *Зуров М.М., Капустин С.А.* Численное моделирование накопления повреждений в элементах конструкций при малоцикловых нагружениях // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы V Междунар. симпоз. – Ярополец, 1999. – С. 13–14.

17. *Капустин С.А.* Оценка прочности фрагментов подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях // Inzynieria Srodoviska W Exsploatacji Kompleksow Wojskowych, CZESC1, Praca zbiorowa. Zakopane. – 2001. - - С. 197–205

18. *Капустин С.А., Кузнецов А.М., Урлин С.О. и др.* Банк данных для информационного обеспечения моделей деформирования и разрушения материалов и сред // Вестн. ННГУ. – Н. Новгород, 2006. – Вып. 1. – С. 141–149.

19. *Капустин С.А., Бухарев Ю.М., Митин А.А., Чурилов Ю.А.* Численное моделирование процесса упругопластического деформирования и разрушения стандартного образца при растяжении // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: РАН, 1998. – № 3. – С. 52–56.

20. *Капустин С.А., Крамарев Л.Н., Горохов В.А., Пантелеев В.Ю., Чурилов Ю.А.* Экспериментально-теоретическое изучение упругопластического деформирования и разрушения образца с концентратором // Приволж. науч. журн. – 2009. – № 4. – С. 8–12.

Поступила в редакцию
24.03.10

Капустин Сергей Аркадьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

E-mail: *sergei.kapustin@mail.ru*