

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ИЗДЕЛИЯХ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

**Введение.** CAE-системы (CAE — Computer Aids Engineering) инженерного анализа (ABAQUS, ANSYS, COSMOS, I-DEAS, NASTRAN и др.) позволяют выполнять качественное моделирование систем различной физической природы, а также исследовать отклик этих систем на внешние воздействия. Одним из самых распространенных таких комплексов сегодня является программа ANSYS, использующая метод конечных элементов.

**Основная часть.** Возможность моделировать тепловыделение при деформировании предусмотрена в ANSYS в конструкции следующих элементов: PLANE223, SOLID226, SOLID227. При решении упругопластических задач вычисляются значения для каждого узла элемента, что требует значительных временных ресурсов. Для увеличения скорости расчета связанных задач в ANSYS предусмотрено уменьшение количества точек интегрирования в настройках элемента (KEYOPT(6) = 1).

При расчете пластического тепловыделения используется плотность теплового потока в пластической стадии, определяемая формулой  $\dot{Q}^p = \beta \dot{W}^p$ , где  $\beta$  — доля пластической работы  $\dot{W}^p$ , преобразуемая в тепло, известная как коэффициент Тэйлора—Квинни, и определяемая выражением  $\dot{W}^p = \{\sigma\}^T \{\dot{\epsilon}^p\}$ , а векторы  $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}\}^T$ ;  $\{\dot{\epsilon}^p\} = \{\dot{\epsilon}_x^p, \dot{\epsilon}_y^p, \dot{\epsilon}_z^p, \dot{\epsilon}_{xy}^p, \dot{\epsilon}_{yz}^p, \dot{\epsilon}_{xz}^p\}^T$ , где  $\{\sigma\}$  — вектор напряжений,  $\{\dot{\epsilon}^p\}$  — вектор скорости пластических деформаций.

Связанное уравнение движения и уравнение сохранения теплового баланса в матричном виде представляется

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [C^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [K^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} + \{Q^p\} \end{Bmatrix},$$

где  $[M]$  — матрица масс конечного элемента;  $[C]$  — матрица демпфирования;  $[K]$  — матрица жесткости элемента;  $\{u\}$  — вектор перемещений;  $\{F\}$  — сумма сил в узлах элемента и давления приложенного к элементу;  $[C^t]$  — тепловая матрица указанного элемента;  $[K^t]$  — матрица конвекционного рассеивания элемента;  $\{T\}$  — вектор узловых температур;  $\{Q\}$  — глобальный вектор тепловых потоков элемента;  $\{Q^p\} = \int_V \dot{Q}_n^p \{N\} dV$   $\dot{Q}^p$  — изменение плотности пластического тепла элемента за шаг  $n$ , рассчитываемое с помощью ANSYS; а  $\{N\}$  — функция формы элемента.

Для построения твердотельных моделей изделий можно использовать программу геометрического моделирования SolidWorks. Выполненные модели сохраняются в формате «.x\_t» (формат Parasolid), который впоследствии используется для импорта сторонней геометрии в ANSYS.

При создании конечно-элементной сетки в препроцессорной подготовке с использованием функции автоматического разбиения могут возникать ошибки. Для их минимизации необходимо оптимально выбрать форму элемента, его размеры. В местах значительных градиентов напряжений при необходимости производят измельчение сетки, избегая при этом элементов с очень острыми углами в вершине. Также на ход решения влияет правильность задания нагрузок, граничных условий и других факторов. В процессе расчетов используется критерий (теория) прочности Губера—Мизеса, который позволяет достаточно точно прогнозировать появление стадии пластичности для упругопластического моделирования и удовлетворительно отображает предельное состояние пластичных сталей.

Расчет выполняется с использованием истинной диаграммы растяжения материала, учитывающей уменьшение поперечного сечения в процессе нагружения образца. Программа ANSYS позволяет учитывать большие деформации при нелинейном поведении материалов.

Зависимость между изменениями абсолютной температуры материала  $\Delta T$  при упругой его работе и характеристиками напряженно-деформированного состояния ( $\sigma_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$ ) представляется выражением

$$\Delta T = -\frac{\alpha_L}{\rho C_p} T \sum_{i=1,2,3} \sigma_{ii}. \quad (1)$$

Обозначая в выражении (1) дробь  $\frac{\alpha_L}{\rho C_p}$  через  $K_m$ , получаем

$$\Delta T = -K_m T \Delta \sigma. \quad (2)$$

Для стали Ст3 при комнатной температуре  $K_m = 3,09 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ . Выражение (2) справедливо при адиабатическом нагружении в упругой стадии деформирования однородных изотропных материалов при абсолютной температуре  $T$  (в градусах Кельвина). При работе стали в пластической стадии повышение температуры ( $\Delta T$ ) в исследуемой точке  $K$  можно определить по формуле (с использованием ANSYS)

$$\Delta T = \beta \cdot W^p / (C\rho), \quad (3)$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры;  $\beta$  — коэффициент Тэйлора—Квинни (принят 0,9);  $W^p$  — величина пластической работы в единице объема;  $C$  — удельная теплоемкость стали;  $\rho$  — плотность материала.

С использованием формулы (3) и предположении адиабатного процесса рассчитано изменение температуры в точке  $K$  опасного сечения при работе материала в стадиях пластической и самоупрочнения (рисунок 1). Снижение температуры стали для той же точки при ее упругом деформировании можно рассчитать с использованием формулы (1). При величине первого инварианта тензора напряжений, превышающей 500 МПа, охлаждение стали может произойти более чем на градус.

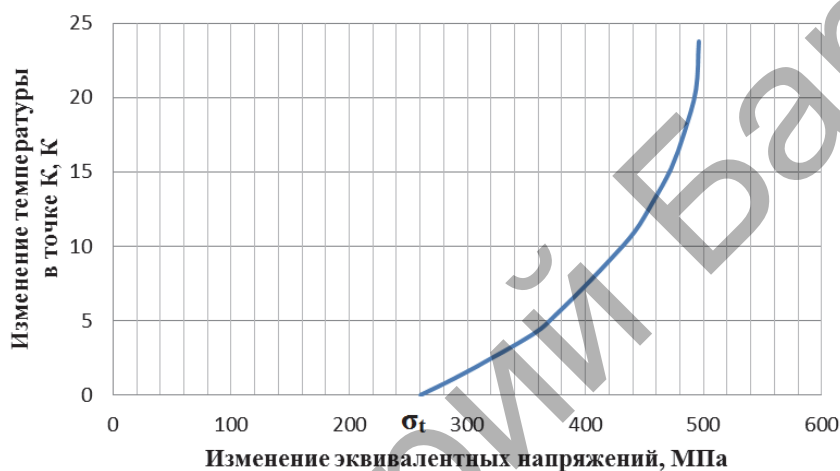


Рисунок 1 — Повышение температуры  $\Delta T$  при изменении эквивалентных напряжений в этой же точке выше предела текучести материала

**Заключение.** Многоцелевая направленность программы ANSYS, независимость от аппаратных средств (от персональных компьютеров до рабочих станций и суперкомпьютеров), средства геометрического моделирования на базе  $B$ -сплайнов, полная совместимость с CAD/CAM/CAE-системами ведущих производителей и «дружеский» интерфейс привели к тому, что ANSYS используется во многих университетах для обучения студентов и выполнения научно-исследовательских работ.

В технологических приложениях ANSYS позволяет выполнять расчеты конструкций практически любой сложности в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, включая монтажные нагрузки, температурные деформации, гидравлический удар, связанные тепломеханические задачи и др., не учитываемые при расчетах по существующим методикам, которые оказывают влияние на НДС деталей и на прочностную надежность изделий в целом.

УДК 535.21

**Е. А. Мойсейчик**, кандидат технических наук, доцент  
Белорусский национальный технический университет, Минск

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

**Введение.** Измерение температуры поверхности твердого тела  $I$  компьютерной термографической системой  $4$  основывается на исследовании его собственного инфракрасного излучения и производится дистанционно, в соответствии со схемой (рисунок 1). Электрический сигнал, фиксируемый преобразователем термогра-