

ВІСНИК



ОДЕСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО
МОРСЬКОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

18

УДК 531/534.004.74

Н. Г. Сурьянинов
М. А. Стариков

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS В РАСЧЕТАХ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЙ

Целью данной работы является отработка методики решения задач механики разрушения в программе ANSYS, основой которой является метод конечных элементов, и сравнение полученных результатов с известными решениями.

Ключевые слова: ansys, метод конечных элементов, линейная механика разрушения, численные методы, трещиностойкость.

Механика разрушения изучает условия равновесия и распространения трещин внутри нагруженных элементов конструкций вплоть до их полного разрушения и является сравнительно новым направлением в механике деформируемого твердого тела.

Установлено, что целый ряд катастроф происходит при сравнительно невысоком уровне напряжений. Внешне разрушения в таких случаях носят характер хрупкого излома и объяснить их смогли только после детального изучения устойчивости трещин.

Проблема трещиностойкости конструкций особенно возрастает в связи с применением современных высокопрочных материалов и повышением уровня нагруженности при возведении ответственных и дорогостоящих объектов.

Хрупкое разрушение рассматривают с позиций механизма накопления повреждений и распространения трещин в результате преобразования накопленной упругой энергии деформируемого тела. Процесс разрушения состоит из двух последовательно протекающих стадий: зарождения и роста трещины. Условие полного разрушения не тождественно условию образования растущей трещины в одном структурном элементе (зерне), оно включает условие распространения этой зародившейся трещины на соседний элемент. Микротрещина должна преодолеть границу структурного элемента материала, а потому для начала разрушения необходимы гораздо большие напряжения, чем для его распространения. Существует номинальное напряжение, которое следует преодолеть, чтобы разрушение началось. При статическом зарождении трещин этот барьер явно выражен, при динамическом высокоскоростном нагружении – легко преодолим и не имеет явного выражения.

Наличие трещины в теле существенно изменяет его напряженно-деформированное состояние и усложняет математическое описание.

Именно математические трудности ограничивают возможности решения задач о равновесии идеально упругого тела с трещинами в основном плоскими задачами.

В этой связи представляет значительный интерес использование численных методов анализа трещиностойкости конструкций и автоматизация процесса вычислений. Сегодня существует целый ряд конечно-элементных прикладных программ расчета конструкций, но только немногие из них способны решать задачи механики разрушения. Одной из таких программ является программа ANSYS. Целью данной работы является отработка методики решения задач механики разрушения в этой программе и сравнение полученных результатов с известными решениями.

Механика разрушения рассматривает три типа трещин: *I* – трещина нормального отрыва, здесь происходит растяжение плоскости с трещиной; этому типу задач соответствует клиновая дислокация; *II* – трещина поперечного сдвига, здесь происходит разрез в поле сдвига; этому типу задач соответствует краевая дислокация; *III* – трещина продольного сдвига, здесь происходит продольный сдвиг пространства с разрезом; этому типу задач соответствует винтовая дислокация.

Важнейшую роль в оценке устойчивости трещины играет величина, называемая коэффициентом интенсивности напряжений: K_I – для трещины типа *I*; K_{II} – для трещины типа *II*; K_{III} – для трещины типа *III* [1]. Величина K определяет трещиностойкость (вязкость разрушения) материала при достижении критического значения интенсивности напряжений K_{Ic} (плоское деформированное состояние) или K_c (плоское напряженное состояние).

Для многих материалов не выполняется условие малости пластической области около острия трещины в деформированном теле. К числу таких материалов относятся углеродистые и легированные стали, полимеры, композиты. Их разрушению предшествует пластическое деформирование значительного объема материала в окрестности острия трещины. Подходы линейной механики разрушения становятся неприменимы и используется нелинейная механика разрушения (НЛМР).

Одним из возможных подходов НЛМР является использование так называемого J -интеграла – энергетического контурного интеграла. В соответствии с этим подходом количество энергии, которую отдает тело при увеличении трещины на единицу длины, однозначно характеризует состояние тела с трещиной. Метод J -интеграла одновременно и независимо друг от друга предложен Г.П.Черепановым [2] и Дж. Рай-

сом. Выражение J -интеграла имеет вид

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial U}{\partial l} ds), \quad (1)$$

где W – плотность энергии деформирования, то есть величина энергии на единицу объема; \dot{O} – поверхностная сила; U – вектор перемещений; Γ – область интегрирования.

J -интеграл можно трактовать как интенсивность высвобождения потенциальной энергии тела в процессе изменения длины надреза или трещины

$$J = - \frac{\partial \Gamma}{\partial l} \dots \quad (2)$$

При выполнении определенных условий J -интеграл не зависит от контура интегрирования. Независимость J -интеграла от пути имеет важное значение для обоснованного его применения в качестве меры разрушения. Указанные условия заключаются в следующем: тело должно быть однородным, объемные силы равны нулю, берега трещины свободны от нагрузок, деформирование должно быть упругим или упругопластическим и описывается теорией малого упругопластического деформирования.

С помощью J -интеграла можно вычислить напряжения и деформации в вершине трещины. Соответствующие формулы приводятся в различных литературных источниках, например в [3].

Существуют различные методы вычисления текущих значений J -интеграла; отметим методы Бигли-Лендеса, Буччи, Райса. Используется также метод конечных элементов, на котором остановимся подробнее.

В соответствии с традиционной схемой применения МКЭ рассматриваемое тело с трещиной разбивают на конечные элементы и задают необходимые константы материала. Постепенно увеличивая нагрузку и удовлетворяя заданным граничным условиям, решают соответствующую упруго-пластическую задачу. На каждом шаге в необходимых точках вычисляются различные величины – перемещения, напряжения, деформации, энергия деформирования и др. С помощью этих величин вычисляется J -интеграл.

Рассмотрим подходы к решению задач механики разрушения в программе ANSYS.

В качестве параметров трещиностойкости здесь применяются:

- коэффициенты интенсивности напряжений K_I, K_{II}, K_{III} , связанные с тремя основными видами трещин;

- J -интеграл, который определяется как контурный интеграл, независимый от пути;
- норма освобождаемой энергии G , представляющая собой количество работы, связанной с открытием или закрытием трещины.

Для решения в ANSYS выполняется линейно-упругий или упруго-пластический статический анализ с последующим использованием специализированных команд постпроцессора или макросов для подсчета требуемых параметров трещинообразования.

Можно выделить два главных аспекта этой проблемы:

- моделирование области трещины;
- определение параметров трещинообразования.

Самая важная область при моделировании трещины – это область вокруг ее кромки. Под последней понимается вершина трещины в двумерной модели и фронт трещины – в трехмерной.

В линейной механике разрушения показано, что перемещения около вершины трещины (или фронта трещины в трехмерных задачах) разнятся как \sqrt{r} , где r – расстояние от вершины трещины. Для соблюдения сингулярности деформаций плоскости трещины должны пересекаться и элемент вокруг ее вершины (или фронта) должен быть квадратным с узлами в серединах сторон. Такие элементы называются сингулярными и имеются в библиотеке стандартных конечных элементов программы ANSYS. Для двумерных моделей рекомендуется использовать элемент PLANE2 – сплошной шестиузловый треугольный элемент.

В ANSYS предусмотрена возможность автоматической генерации сингулярных элементов вокруг определенной точки. Этой цели можно достигнуть двумя способами: с помощью команды препроцессора (PREP7) KSON или через Main Menu:

Main Menu >Preprocessor >Meshing >Size Cntrl >Concentrt KPs >Create При создании двумерной модели рекомендуется соблюдать некоторые принципы:

- используя симметрию, моделировать только половину области трещины с симметричными или кососимметричными граничными условиями;
- первый ряд элементов вокруг вершины трещины должен иметь радиус порядка $a/8$, где a – длина трещины;
- по окружности рекомендуется располагать один элемент на каждые $30-40^\circ$;
- элементы вокруг вершины должны иметь форму равнобедренных треугольников.

Для трехмерных моделей рекомендуется использовать конечный элемент SOLID95 – 20-узловой элемент, имеющий форму треугольной призмы.

Первый ряд элементов вокруг фронта трещины должен (как и в

двумерном случае) состоять из сингулярных элементов.

Создание трехмерной модели значительно сложнее, чем двумерной. Команда KSON недоступна для трехмерных объектов, и нужно убедиться, что фронт трещины проходит через ребро элемента.

При трехмерном моделировании рекомендуется:

- соблюдать такие же размеры элемента, как и для двумерных моделей; при этом соотношение размеров элемента во всех направлениях должно быть не более 4 : 1;

- для криволинейных фронтов трещин размер элемента вдоль фронта зависит от величины местной кривизны; в первом приближении один элемент должен приходиться на каждые $15-30^\circ$ вдоль кривой;

- все ребра элементов должны быть прямолинейными.

После статического анализа можно, используя постпроцессор (POST1), определить параметры развития трещины – коэффициент интенсивности напряжений, J -интеграл и норму высвобождаемой энергии.

Определение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) можно выполнить из POST1 с помощью команды KCALC или через Main Menu: Main Menu >General Postproc >Nodal Calc >Stres Int Factor.

Возможность использования команды KCALC ограничена условиями линейно-упругой задачи и однородным изотропным материалом вокруг трещины.

Правильное использование команды KCALC предполагает выполнение следующих действий:

- выбрать локальную систему координат вершины трещины (или фронта трещины) с осью X , параллельной поверхности трещины (в трехмерной задаче – перпендикулярно к фронту трещины), и осью Y , перпендикулярной плоскости трещины; эта координатная система должна быть активной координатной системой модели [CSYS] и результирующей координатной системой [RCSYS] при выполнении команды KCALC;

- определить путь по поверхности трещины; первый узел на этом пути должен быть узлом в вершине трещины; при моделировании половины трещины потребуются дополнительно два узла, расположенные вдоль ее поверхности; соответственно, для всей модели нужны четыре таких узла;

- вычислить K_I, K_{II}, K_{III} ; в поле KPLAN команды KCALC должно быть указано напряженно-деформированное состояние модели – плоская деформация или плоское напряженное состояние; исключая анализ тонких пластин, обычно предполагается плоская деформация. В поле KCSYM указывается вид модели: является модель половиной трещины с симметричными граничными условиями или половиной трещины с антисимметричными граничными условиями или это полная модель трещины.

Для двумерных задач J -интеграл в ANSYS вычисляется по

формуле

$$J = \int_r W dy - \int_r (t_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + t_y \frac{\partial U_y}{\partial Y}) ds, \quad (3)$$

где r – произвольный контур вокруг вершины трещины; W – плотность энергии деформации (энергия деформации на единицу объема); t_x – вектор силы сцепления вдоль X ; t_y – вектор силы сцепления вдоль Y ; $t_x = \sigma_x n_x + \sigma_{xy} n_y$; $t_y = \sigma_{yx} n_x + \sigma_y n_y$; σ – компоненты напряжения; n – единичный внешний вектор, нормальный к пути; U – вектор перемещения; s – расстояние вдоль пути r .

Норма освобождаемой энергии G используется для определения количества работы (изменения энергии), связанной с открытием или закрытием трещины.

Метод вычисления нормы высвобождаемой энергии – это метод виртуального распространения трещины. Здесь выполняются два вида анализа: один с длиной трещины a , второй – с длиной трещины $a + \Delta a$.

Норму высвобождаемой энергии можно определить по формуле

$$G = - \frac{U_{a+\Delta a} - U_a}{B_{\Delta a}}, \quad (4)$$

где B – толщина модели; U – потенциальная энергия деформации.

Для анализа второго вида (при длине трещины $a + \Delta a$) выбираются все узлы поблизости от трещины и масштабируются в направлении X с помощью фактора Δa . В командном режиме для этого используется NSCALE, а соответствующий путь в Main Menu имеет вид:

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Operate > Scale.

При использовании твердотельного моделирования перед масштабированием нужно отсоединить модель трещины от конечно-элементной модели. «Близость к трещине» обычно означает все узлы в радиусе $a/2$ от вершины трещины; фактор Δa для масштабирования обычно лежит в диапазоне $(0,5 \div 2)\%$ от длины трещины.

Рассмотрим пластину с центральной трещиной под действием растягивающей распределенной нагрузки по краям пластины, параллельной берегам трещины, при берегах трещины, свободных от нагрузки (рис. 1).

Материал – сталь ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$). Длина трещины $0,02$ м, растягивающая нагрузка 100 МПа. Определим коэффициент интенсивности напряжений. Решение этой задачи дано в [3] при

$$\sigma = 10^8 \text{ МПа}; E = 2 \times 10^5 \text{ МПа}; \nu = 0,3; \frac{h}{L} = 0,6; \frac{l}{L} = 0,1.$$

Приняв $l = 100$ мм; $L = 1000$ мм; $h = 0,6 \times 1000 = 600$ мм, по результатам опыта авторы получили результат $K = 1,033$.

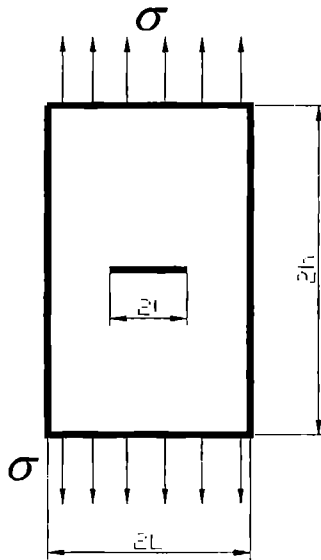


Рис.1. Пластина с трещиной под действием равномерно распределенной нагрузки

Решим задачу в ANSYS и сравним результаты с экспериментальными данными. Считаем механизм образования трещины линейно упругим.

Вследствие допущенных предположений коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины может быть подсчитан с использованием команды KCALC; ввиду симметрии задачи анализируется четверть модели; сетка конечных элементов около вершины трещины строится из четырехугольного (сингулярного) 8-узлового элемента PLANE82 (рис. 2).

В результате решения получена картина деформации четверти пластины (рис.3).

В результате расчета получен КИН в вершине трещины

$$K_1 = 0,5812 \times 10^8. \quad K = \frac{K_1}{\sigma \sqrt{\pi l}} = \frac{0,5812 \times 10^8}{10^8 \times \sqrt{3,14 \times 0,1}} = 1,0372.$$

Погрешность вычисления КИН составляет

$$\varepsilon = \frac{1,033 - 1,0372}{1,033} \times 100\% = 0,21\%.$$

Полученный результат показывает хорошую сходимость расчета в ANSYS с экспериментальными данными.

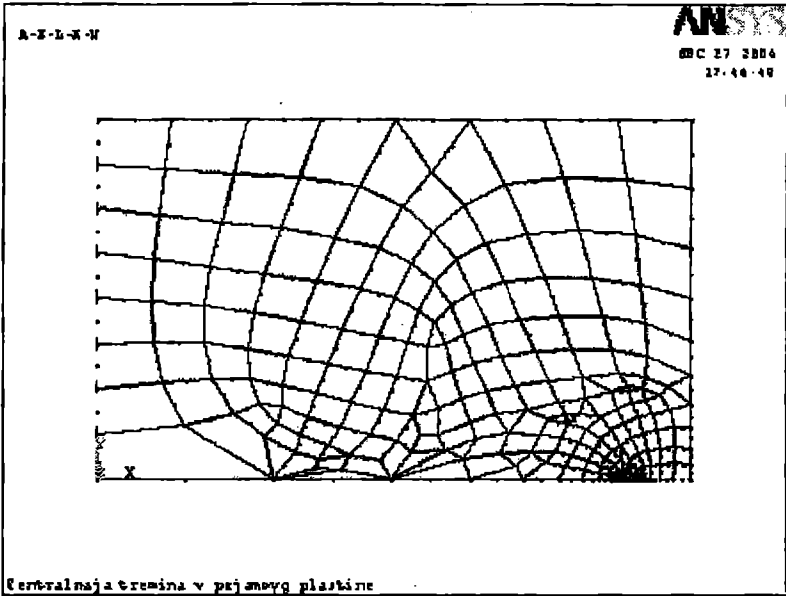


Рис.2. Четверть пластины с наложенной сеткой конечных элементов

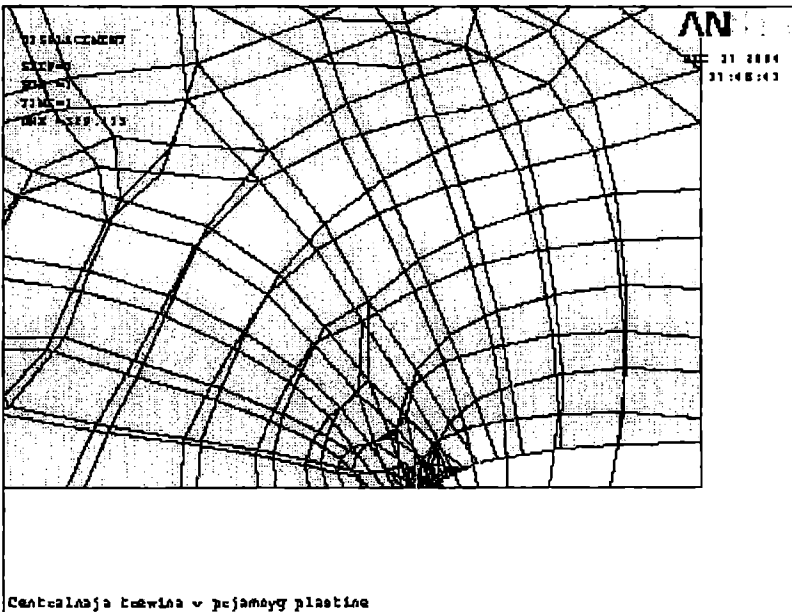


Рис.3. Деформированная и недеформированная формы четверти пластины

ЛИТЕРАТУРА

1. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 367 с.
2. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие в 4-х томах / Под ред. В.В. Панасюка. – Т.3. – К: Наук. думка: – 1988. – 434 с.

Надійшла 14.12.2005