

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В ANSYS

Журавков М.А., Гляков С.А., Громыко О.В.

3-D finite-element model of rigid body with crack was created in ANSYS program. Stress intensity factors were calculated for three loading situations. Comparison of the solutions of the classical crushing mechanics problems with computer simulation results instill confidence in the validated modeling. ANSYS mode was used for exploration of the stressedly-deformed mode in the vicinity of crack.

Введение

Среди задач, связанных с поиском оптимальных способов разрушения конструкций, зданий, сооружений, горных пород при добыче полезных ископаемых, с обработкой деталей методами механического удаления поверхностных слоев и скола частиц материала, определения эффективных режимов резания и разрушения материалов [1], весьма важными являются задачи исследования концентрации напряжений вблизи трещин. Появление дефектов и трещин характерно для широкого класса конструкций и материалов и в большинстве случаев приводит к их разрушению. Исследование процессов возникновения, распространения и развития трещин весьма актуально, кроме того, и для обеспечения достаточной прочности и надежности машин, зданий и других конструкций.

Важнейшей задачей при изучении поведения трещины является наиболее достоверное и точное определение полей распределения напряжений в зоне их концентрации. Описание напряженного состояния вблизи трещин и оценка опасности разрушений предусматривает использование таких типовых параметров как коэффициенты интенсивности напряжений, удельная потенциальная энергия образования трещины, трещиноподвижная (расклинивающая) сила Гриффитса [2,3] и др. Коэффициенты интенсивности напряжений K_I , K_{II} , K_{III} исчезающим образом характеризуют упругие поля вблизи вершины трещины, поскольку в остальной области распределение напряжений и деформаций полностью определено.

Теоретические основы исследований

В литературе приведены многочисленные аналитические решения, но они относятся к трещинам в телах бесконечной протяженности [2,3]. Однако практически более важными являются решения, относящиеся к малым трещинам в телах конечных размеров. Среди численных методов определения коэффициентов интенсивности напряжений особо следует выделить метод конечных элементов. В этом подходе тело представляют в виде совокупности конечных элементов, а решение получают интерполяцией значений основных неизвестных в узлах. К их числу относятся, например, перемещения узловых точек, общих для смежных элементов. Одним из наиболее популярных компьютерных приложений метода конечных элементов является широко известный пакет ANSYS [4,5]. Однако рассматриваемая задача в литературе, посвященной обзору методик использования пакета ANSYS, не рассматривается. Особо отметим, что в последнее время все шире применяются методы граничных интегральных уравнений и элементов [6].

Постановка задачи

Представленная работа посвящена определению коэффициентов концентрации напряжений путем моделирования в пакете ANSYS трещин, вызванных приложенными в их зоне продольных и поперечных нагрузок различного вида. Подчеркнем, что классические уточненные модели и аналитические решения с учетом различных моделей материалов [2] не всегда приводят к достоверным и согласованным с экспериментальными данными результатам. Как правило, основная трудность заключается в построении модели, адекватной условиям развития трещин. Для проверки качества компьютерного моделирования вначале выполним определение коэффициента интенсивности напряжений для случая, многократно исследу-

довавшегося аналитическими методами и для которого известно аналитическое решение (рис. 1 а). Если результаты моделирования удовлетворительно совпадут с аналитическим решением, то построенную компьютерную модель можно в дальнейшем использовать для решения аналогичных задач, но, например, с примененными нагрузками другого вида (рис. 1 б, в) или для которых аналитические решения отсутствуют.

Компьютерную модель построим для куба со стороной $a = 6 \text{ см}$. Рассмотрим начальную трещину, глубина которой составляет $L = 1 \text{ см}$ (рис. 1). В первом расчетном случае (рис. 1 а) приложена разрывающая нагрузка интенсивностью $\sigma = 1 \text{ Н/см}^2$, в двух других расчетных случаях направление приложения сил соответствует продольным и поперечным по отношению к образцу сдвиговым деформациям (рис. 1 б, в). Задача анализа состоит в определении коэффициента интенсивности напряжения K_1 для трещины, а также характера распределения напряжений в прилегающей зоне.

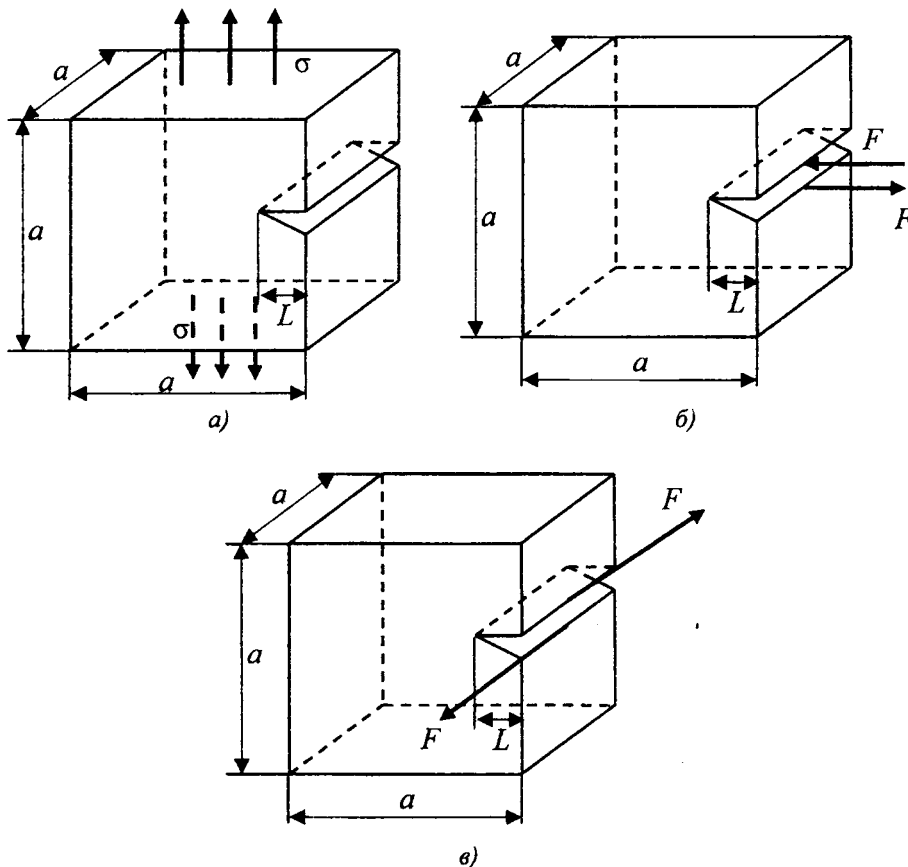


Рис. 1. Схемы приложения нагрузок вблизи трещины

Построение модели

Несмотря на то, что во всех случаях можно использовать условия симметрии и строить только часть модели для всех трех вариантов нагружения, в рассматриваемом примере в пакете ANSYS построена полная пространственная модель. Задача решается с использованием 3-D элементов SOLID45 и SOLID95. При помощи макроса элементы вблизи фронта трещины преобразуются из SOLID45 в сингулярный SOLID95 (с промежуточными узлами, находящимися ближе к фронту трещины).

Для построения пространственной модели с трещиной используется восьмиузловой элемент с прямыми ребрами SOLID45 и двадцатиузловой элемент с криволинейными ребрами SOLID95, который является квадратичной версией объемного элемента SOLID45. Элемент SOLID95 допускает возможность построения нерегулярной сетки без потери точности, имеет совместные формы перемещений. Он может быть использован в моделях, в том числе с трещинами, с искривленными границами. Как и большинство объемных элементов библиотеки

теки ANSYS обсуждаемые элементы имеют три степени свободы в каждом узле, т. е. перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. Дополнительными особенностями элементов SOLID45 и SOLID95 являются свойства пластичности и ползучести, радиационного набухания и изменения жесткости при приложении нагрузок, больших перемещений и больших деформаций. Эти свойства потенциально расширяют возможности компьютерного моделирования трещин для различных условий деформации и поведения материалов. Опция «рождение-смерть элемента» облегчает компьютерное моделирование процесса развития трещины. Для повышения наглядности и информативности выводимых результатов исследования имеются специальные опции определения интенсивности главных и эквивалентных напряжений на поверхности (по Треску, фон Мизесу и Сен-Венану), значений критериев разрушения и их максимумов в каждой точке интегрирования.

Модель строится таким образом, чтобы поверхность трещины была параллельна оси X, а фронт трещины располагался перпендикулярно оси Y.

Построение модели начинается с создания узлов вокруг фронта трещины командой *N* в цилиндрической системе координат и затем добавления промежуточных узлов между уже построенными командой *FILL*. При создании узлов им присваиваются такие номера, чтобы затем воспользоваться автоматическим повторением команд со смещением по номеру узла. Остальные узлы таким же образом достраиваются в декартовой системе координат (рис. 2).

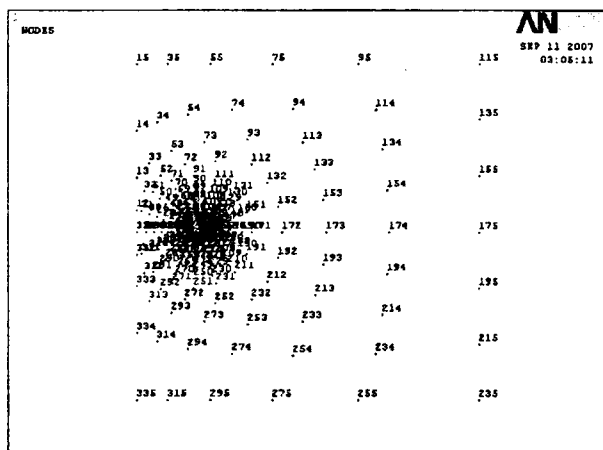


Рис. 2. Узлы конечно-элементной модели

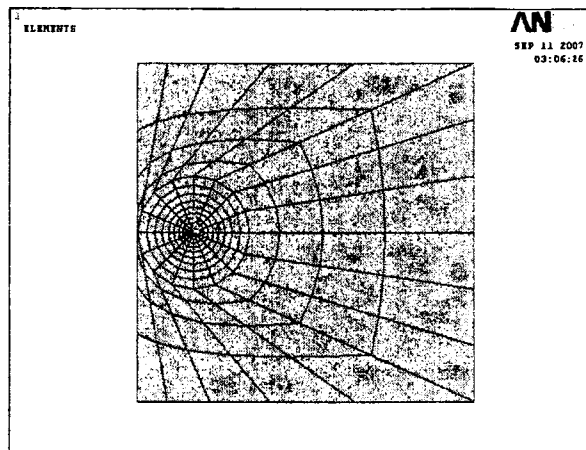


Рис. 3. Конечно-элементная сетка.

После определения координат всех узлов модели командой *E* создается элемент вблизи фронта трещины. Далее на его основе при помощи команды *EGEN* генерируются все элементы вокруг трещины. А затем, используя смещение по номерам узлов, командой *EGEN* создаются остальные элементы вдали от фронта трещины к краям тела (рис. 3).

Лишние степени свободы тела как твердого целого устранены путем закрепления двух узлов на противоположной от трещины стороне модели по всем трем направлениям.

В результате анализа вычислены коэффициенты интенсивности напряжений K_I , K_{II} , K_{III} для трех случаев с различными способами приложения нагрузки.

Выполнение расчетов и анализ результатов решений

После завершения работы решателя ANSYS определяем пятью узлами контур трещины, а затем в постпроцессоре стандартной командой *KCALC* выполняем вычисление коэффициента концентрации напряжений K_I (рис. 4). Совершенно аналогично после приложения соответствующих поперечных нагрузок вычисляются коэффициенты K_2 и K_3 .

Из рис. 4 следует, что коэффициент интенсивности напряжений на основании описанной компьютерной модели равен $K_I = 1,7137$. Аналитическое решение для определения этого же коэффициента K_I выражается соотношением:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} (1.12 - 0.23\lambda + 0.16\lambda^2 - 21.7\lambda^3 + 30.4\lambda^4).$$

Учитывая, что λ — это отношение геометрических параметров модели L к a , получим:

$$K_I = 1\sqrt{3.14 \cdot 1} \left(1.12 - 0.23 \cdot \frac{1}{6} + 0.16 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^2 - 21.7 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^3 + 30.4 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^4 \right) = 1.788.$$

```

KCAL C Command
File
**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****
ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS
ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 MODES)
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 1 5 11 325 331
WITH NODE 1 AS THE CRACK-TIP NODE
USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 1
EX = 0.30000E+08 MUZY = 0.30000 AT TEMP = 0.0000
**** KI = 1.7137 , KII = 0.0000 , KIIT = 0.0000 ****
    
```

Рис. 4. Результаты вычисления коэффициентов интенсивности напряжений.

Различие между аналитическим и численным решением для коэффициента K_I составляет лишь 4%. Стремление к повышению точности моделирования заставляет уменьшать размеры элементов. Сгущение конечно-элементной сетки вблизи фронта трещины приводит не только к повышению скорости сходимости результатов. Вместе с этим существенно увеличивается размерность задачи и время ее решения. Итак, на основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что построенная компьютерная модель дает достоверные результаты и может быть использована для определения коэффициентов интенсивности напряжений K_{II} и K_{III} .

Таким образом, используя данную модель и прикладывая нагрузку в поперечном направлении, указанном на рис. 1б, получим $K_2 = 1.2828$. Для расчетного случая, приведенного на рис. 1в, получим коэффициент интенсивности напряжений $K_3 = 0.5846$.

Заключение. Аналитические решения для определения коэффициентов интенсивности напряжений существуют для большого количества типов трещин и при различных вариантах приложения нагрузки. Наряду с ними, однако, существуют и варианты приложения нагрузки, для которых аналитические решения для коэффициентов интенсивности напряжений неизвестны. В представленной работе был продемонстрирован численный способ определения этих коэффициентов на основе компьютерного моделирования для таких случаев. Построенная в пакете ANSYS полная трехмерная конечно-элементная модель тела с трещиной использована для решения классической задачи механики разрушения с известным аналитическим выражением коэффициента интенсивности напряжений. Сопоставление результатов численных и аналитических решений позволило сделать вывод о приемлемой точности компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громько, О.В. и др. Популярно о механике / Под ред. М.А. Журавкова. – Минск: БГУ, 2006. – 192 с.
2. Хеллан, К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
3. Морозов, Е.М. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 328 с.
4. Чигарев, А.В., Кравчук, А.С., Смалюк, А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
5. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
6. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов). – Минск.: БГУ, 2002. – 432 с.