

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ РАСЧЕТОВ В PRO/MECHANICA

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Получивший развитие в 60-е годы XX-го века анализ методом конечных элементов (МКЭ или FEA, Finite Element Method) является одним из самых старых приложений для компьютерного проектирования. Первоначально этот вид расчетов был в определенной степени элитарным. Это было вызвано тем, что компактную и вместе с тем точную модель для вычисления на относительно слабой ЭВМ мог разработать только специалист высокой квалификации. Сложность создания модели, в особенности трехмерной, служила своеобразной «защитой от дурака», отсеивая недостаточно подготовленных инженеров.

Положение начало меняться в 90-е годы, когда бурно начали развиваться САД-системы объемного моделирования, способные работать на персональных ЭВМ. Конструктор получил возможность легко и быстро разрабатывать трехмерные модели, которые можно было непосредственно использовать при МКЭ-расчетах. Одновременно вычислительная мощность ЭВМ возросла на несколько порядков. Появилась возможность в разумные сроки рассчитывать даже неоптимизированные конечно-элементные модели. Эту возможность использовали разработчики САПР. В результате, наряду с универсальными МКЭ-пакетами (ANSYS, NASTRAN), в большинстве современных САД-пакетов появились встроенные МКЭ-модули для прочностных и тепловых расчетов.

Встроенные модули предназначены, в первую очередь, для экспресс-оценки характеристик изделия на ранних стадиях проектирования. На этой стадии особенно важно иметь возможность сравнивать между собой различные варианты конструкции детали. Точные значения нагрузок еще не известны, поэтому высокая точность расчетов не обязательна. Отсюда вытекают главные требования к встроенным в САД расчетным модулям – простота подготовки исходных данных и скорость работы. Как правило, это достигается за счет снижения точности расчета и возможностей моделирования.

Кроме того, встроенные модули САЕ рассчитаны на малоподготовленных пользователей. Поэтому для них характерна предельная автоматизация проведения расчетов. Например, даже материал модели может определяться автоматически (если, конечно, он задан в САД-модуле). Сетка конечных элементов строится тоже автоматически и часто даже не показывается на модели. Возможности ее коррекции минимальны или вообще отсутствуют. Но при этом предусмотрено автоматическое сгущение сетки в местах геометрических особенностей (например, вокруг отверстий, во внутренних углах и т.д.) и в зонах приложения нагрузок и закреплений. Для моделирования геометрии используются ограниченный набор конечных элементов (как правило, только твердотельных или пластинчатых), причем выбор разных типов элементов в рамках одной модели возможен не всегда.

Возможности по заданию нагрузок и закреплений во встроенных пакетах существенно меньше по сравнению с универсальными пакетами. С другой стороны, поскольку встроенный САЕ-модуль тесно интегрирован с САД, в некоторых модулях можно естественным способом использовать условия сопряжения деталей в сборке для задания граничных условий (закреплений).

Состав различных видов анализа ограничен по сравнению с составом универсальных программ и в основном предназначен для решения таких задач, как линейный статический механический и тепловой анализ, определение собственных форм колебаний (модальный анализ), оценка устойчивости конструкции и т.д. Результаты расчета представляется стандартным для МКЭ-пакетов способом. Например, распределение механических напряжений или температур в модели показывают изменением цвета (раскрашиванием). Аналогично, деформация модели на экране утрирована, но пропорциональна расчетной деформации и т.д.

Существуют разные способы интеграции CAD и CAE модулей, но чаще всего доступ ко всем возможностям встроенного CAE-модуля обеспечивается непосредственно из интерфейса базового CAD-пакета. Таким уровнем интеграции обладают, например, Pro/ENGINEER, Visual Nastran или CATIA Analysis для CATIA, COSMOS/Works для SolidWorks, T-Flex Анализ для T-Flex и т.д.

К сожалению, простота подготовки данных и наглядность представления результатов при использовании встроенных МКЭ-пакетов может сыграть злую шутку над инженером-конструктором. Если для профессионального инженера-расчетчика оценка точности расчета представляет главную и часто наиболее трудоемкую часть работы, то конструктор иногда с трудом принимает саму необходимость такой оценки. Яркость и «научнообразность» представления результатов приводит к тому, что среднему конструктору психологически трудно сомневаться в результатах расчета, полученных с использованием «инновационных технологий». Кроме того, стандартная процедура расчета во встроенном МКЭ-пакете просто не предполагает оценки точности расчета. Поэтому часто результаты расчетов принимают как истину в последней инстанции, без какой-либо критической оценки.

В связи с этим оценим, хотя бы в первом приближении, точность статического прочностного расчета в CAE-модуле Pro/MECHANICA пакета САПР высшего уровня Pro/ENGINEER. Выбор пакета для оценки обусловлен тем, что Pro/ENGINEER является пионером в области параметрического трехмерного моделирования. Поэтому встроенный в него CAE-модуль PRO/MECHANICA, вероятно, самый «старый» и, соответственно, наиболее отработанный встроенный расчетный модуль. Кроме того, отдельный интерес представляет оценка точности конечных элементов, используемых в PRO/MECHANICA. В отличие от подавляющего большинства МКЭ-пакетов, PRO/MECHANICA использует не только линейные или параболические конечные элементы, но и позволяет аппроксимировать их полиномами вплоть до девятой степени (т.н. геометрические элементы). С одной стороны, такой подход позволяет точно описывать сложную геометрию минимальным количеством конечных элементов. С другой стороны, оценить погрешность расчета с использованием таких элементов становится труднее.

Сравним результаты конечно-элементных расчетов с результатами, полученными по аналитическим зависимостям для напряжений в телах простого сечения. В качестве первой тестовой задачи определим нормальные напряжения в гладкой пластине длиной 400 мм, шириной 40 мм и толщиной 10 мм. Конечно-элементная модель пластины, подготовленная в PRO/MECHANICA, представлена на рисунке 1. Левый край пластины жестко закреплен, а к правому приложена сила $F=1000$ Н, направленная вдоль оси пластины (ось X). Расчетное значение нормальных напряжений σ_{xx} в этом случае равно:

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} = \frac{1000}{0.04 \times 0.01} = 2.5 \text{ МПа,}$$

что точно совпадает со значением, полученным в процессе МКЭ-расчета с однопроходной адаптацией, предлагаемым в PRO/MECHANICA по умолчанию (рисунок 1). Следует отметить, что такой результат получен при использовании всего только 13 конечных элементов.

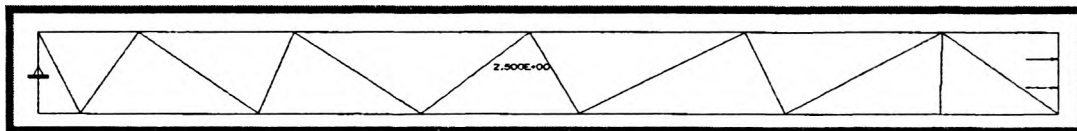


Рисунок 1 – Результат МКЭ-расчета гладкой пластины

Усложним тестовую модель и проведем расчет пластины с полукруглыми вырезами (концентраторами напряжений) в центре, радиус r и глубина t которых равна 10.9 мм. В этом случае расчетное значение нормального напряжения σ_{xx} равно [1]:

$$\sigma_{xx} = \alpha \frac{F}{S_{MIN}} = 1.45 \times \frac{1000}{(0.04 - 2 \times 0.0109) \times 0.01} = 7.967 \text{ МПа} \quad (1)$$

где S_{MIN} – площадь ослабленного сечения пластины; α – коэффициент, приблизительно равный 1.45 при условии $t = r$.

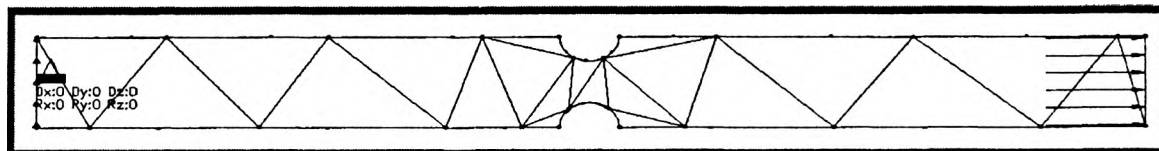


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель пластины, создаваемая по умолчанию

На рисунке 2 показана модель, создаваемая PRO/MECHANICA при установках по умолчанию (однопроходная адаптация). Максимальное значение нормальных напряжений σ_{xx} наблюдается в самом узком месте сечения пластины и равно 9.05 МПа. Погрешность в сравнении с теоретическим результатом (1) составляет 13.6%, что для столь простой задачи, безусловно, много.

Стандартный способ повышения точности при МКЭ-расчетах заключается в постепенном сгущении сетки конечных элементов в окрестностях проблемных мест. Процесс повторяется до тех пор, пока результаты не перестают заметно изменяться. Например, при расчете в универсальном МКЭ-пакете MSC/Nastran погрешность 0.6% в сравнении с результатом расчета по формуле (1) достигается уже при размещении 48 элементов на каждой полукруглой кромке выреза и практически не изменяется при дальнейшем сгущении сетки.

Была предпринята попытка увеличить точность расчета в PRO/MECHANICA, принудительно увеличивая число конечных элементов на ребрах вырезов. Результат оказался парадоксальным.

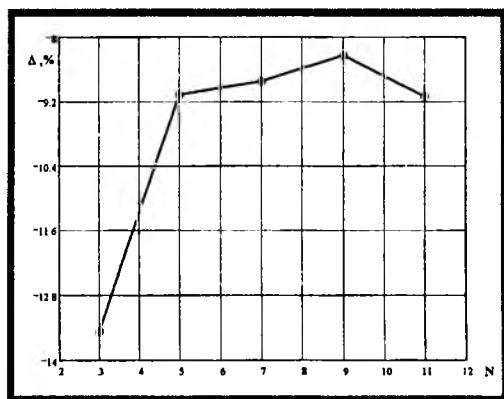


Рисунок 3 – Зависимость погрешности расчета от числа конечных элементов на ребрах вырезов

Первоначально, с увеличением числа конечных элементов, точность расчета возрастает, но при увеличении числа элементов выше 10 опять начинает падать. График на рисунке 3 иллюстрирует изменение погрешности расчета Δ , % в зависимости от числа конечных элементов N , размещенных на ребрах вырезов.

Можно предположить, что это явление объясняется ухудшением формы конечных элементов, в частности, вырождением их в длинные и узкие клинья, как показано стрелкой на рисунке 4. К сожалению, в PRO/MECHANICA отсутствуют средства гибкого управления сеткой конечных элементов, поэтому существенно повысить точность расчета сгущением сетки не удастся.

Помимо режима расчета с однопроходной адаптацией, принятого по умолчанию, в PRO/MECHANICA существует режим расчета с многопроходной адаптацией. С точки зрения пользователя, отличие в том, что в режиме многопроходной адаптации возможно задать более жесткие критерии сходимости решения и увеличить порядок полинома аппроксимации до предельных значений. Сама же сетка конечных элементов может остаться той же самой.

Как показали пробные расчеты, минимальная погрешность достигается при задании степени полиномов в диапазоне от 1 до 9 и процента сходимости (разницы между пробными решениями) равным 1%. В этом случае нормальные напряжения σ_{xx} оказываются равными 8.493 МПа, а погрешность в сравнении с теоретическим результатом (1) составляет уже только 6.35%, что более чем в 2 раза меньше, чем при расчете с установками по умолчанию. Однако следует отметить, что при максимальных установках время расчета тестовой пластины возрастает с 1.12 до 13.35 секунды.

Таким образом, для получения приемлемой точности при работе в PRO/MECHANICA представляется целесообразным использовать режим МКЭ-расчета «Многопроходная адаптация». При этом желательно выставлять допустимые значения степеней полинома в диапазон 1...9 и задавать минимально рекомендуемый (1%) процент сходимости. По-

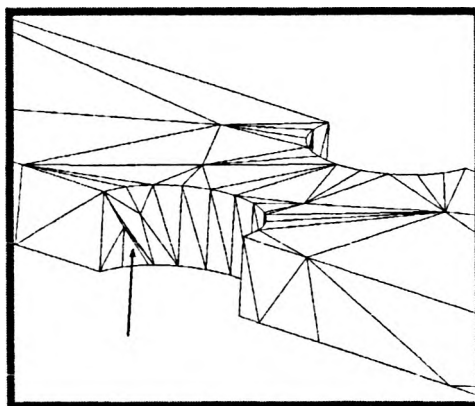


Рисунок 4 – Искажение формы конечных элементов при чрезмерном сгущении сетки

сколько во встроенных САЕ-модулях трудно оценить погрешность расчетов, следует быть осторожным при использовании результатов таких расчетов для оптимизации конструкции ответственных узлов и деталей.

Автор благодарен сотрудникам фирмы «Рэндбел» Баринову В.А. и Кузьмину И.А. за помощь в получении учебной лицензии на Pro/Engineer и ценные консультации по использованию пакета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-ое изд. – Киев: Наук. Думка, 1988. – 736 с. 2.