

Оценка сходимости напряжений в сложных металлоконструкциях методом конечных элементов

Приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов (МКЭ) ряда машиностроительных и строительных конструкций. Показано, что в местах сопряжения отдельных элементов между собой имеют место так называемые «особые точки», напряжения в которых имеют тенденцию к расходимости. Дана оценка градиента напряжений в этих зонах. Ил. 7. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: метод конечных элементов, сингулярность, сходимость напряжений, машиностроительная конструкция, строительная конструкция

The results of stressed-deformed state calculation by finite element method of a series of engineering and building constructions are presented. It is shown that there are so-called "singular points" in which stress tends to spread in places of certain elements convergence. The estimation of stress gradient in these zones is given.

Keywords: finite element method, singularity, stress convergence, engineering construction, building construction

Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) является в настоящее время наиболее популярным методом анализа работы машиностроительных и строительных конструкций. Этому способствуют как достаточно детальная его теоретическая проработка [1, 2], имеющиеся практические наработки и рекомендации относительно многих расчетных случаев [3, 4]), так и наличие большого количества современных программных продуктов, реализующих его в удобном для пользователя компьютере виде [5]. Благодаря этому МКЭ завоевал многих последователей, которые используют его достаточно активно при решении самых разнообразных проектно-конструкторских задач в самых различных сферах инженерной деятельности.

Заметим, что достаточно типовая инженерная задача в сфере проектирования новых и оценки работоспособности уже существующих конструкций формулируется примерно следующим образом: необходимо по заданным размерам элементов конструкции выяснить количественный уровень основных расчетных характеристик. В качестве последних для различных случаев принимаются статические прогибы и углы поворота, амплитуды колебаний и количество циклов нагружения, величины пластических деформаций и критические силы потери устойчивости. Однако наиболее важной характеристикой являются напряжения. При этом принято оценивать самые разнообразные их виды: нормальные, касательные, главные, эквивалентные, приведенные и т.д. В то же время без знания их величины невозможно гарантировать надежную и долговечную работу конструкций при эксплуатации. Поэтому задача их достоверного и точного определения является одной из краеугольных при создании и оценке работы как машиностроительных, так и любых других видов конструкций, например, строительных.

Всевозрастающая мощность и скорость работы

© Банников Д.О., Гуслистая А.Э., 2011 г.

современной компьютерной техники позволила создавать очень детальные и подробные модели, количество степеней свободы в которых исчисляется миллионами. При этом появилась возможность наложения гораздо более мелкой конечно-элементной (КЭ) сетки, что в свою очередь предполагает повышение точности и достоверности получаемых при расчете результатов. В то же время реально наблюдаемая картина оказывается несколько иной.

В работах ряда авторов упоминается о наличии в конструкциях, анализируемых с помощью МКЭ, так называемых «особых точек», в которых возникают сложности со сходимостью результатов [3-5]. В зарубежной литературе даже появилось для них специальное название - Hot Spot [6]. Эти точки представляют собой стыки и места соединения отдельных элементов конструкции между собой. Именно в этих зонах, как показывает статистика отказов и аварий, чаще всего и происходит разрушение конструкций. Поэтому, оценка сходимости, в первую очередь, напряжений для таких зон является в настоящее время довольно актуальным и одновременно недостаточно исследованным вопросом.

В связи с этим в публикации рассмотрена и проанализирована сходимость основных расчетных параметров в районе «особых точек» для ряда машиностроительных и строительных конструкций, с которыми авторам пришлось столкнуться в свое время.

Материалы и результаты анализа

Буферный брус магистрального электровоза.
При транспортировке различных грузов достаточно часто используют разнообразные тяговые агрегаты на железнодорожном ходу. Они представляют собой достаточно сложную пространственную коробчатую систему с множеством узлов и элементов. Одним из основных несущих конструктивных узлов таких машин является буферный брус. КЭ-анализ модели такого бруса одного из модификаций отечественных магистральных электровозов был выполнен с помо-

Таблица. Уровень напряжений в зонах концентрации для модели буферного бруса тягового агрегата

Размер КЭ-сетки, мм	Величина эквивалентных напряжений в зоне концентрации, МПа									
	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L
50	329	488	1340	477	455	323	398	332	395	277
25	398	720	1351	683	650	365	544	433	513	351
12,5	455	921	1690	881	835	380	783	494	589	429
6	480	1292	1752	1023	1011	444	1100	596	773	651

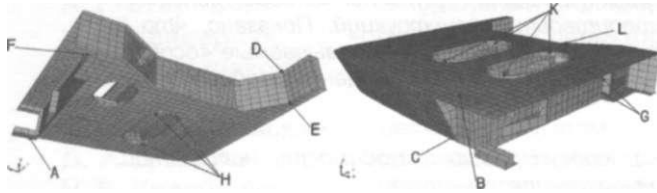


Рис. 1. Зоны концентрации напряжений в модели буферного бруса тягового агрегата

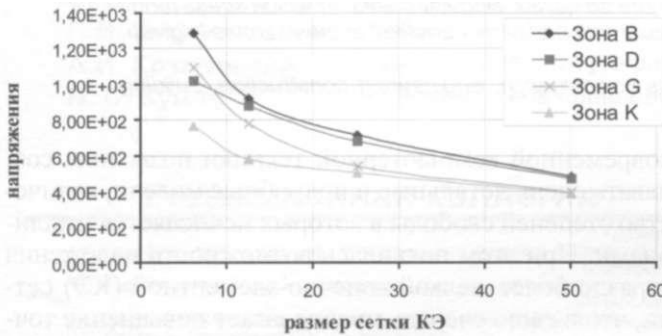


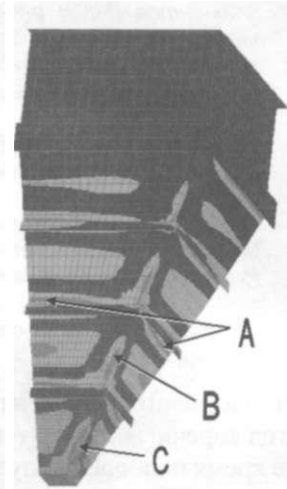
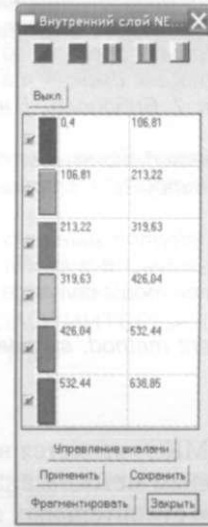
Рис. 2. Сходимость напряжений в модели буферного бруса тягового агрегата

шью проектно-вычислительного комплекса SCAD for Windows [5]. При этом создавалась пластинчатая КЭ-модель, представляющая собой половину конструкции (симметричная схема) с назначением соответствующих граничных условий и условий нагружения.

В результате КЭ-анализа было получено около десятка наиболее нагруженных зон в конструкции бруса, изображенных на рис. 1. Поскольку КЭ-сетка была выбрана достаточно грубо (размер КЭ составил около 5 см), то выполнялась серия последовательных сгущений сетки для уточнения получаемых результатов расчета (таблица). Было установлено, что напряжения (как главные, так и эквивалентные) не только не сходятся, но расходятся со все возрастающей скоростью по логарифмическому закону, что для наиболее ответственных зон конструкции проиллюстрировано на графике рис. 2, где по горизонтальной оси отложен размер КЭ в мм, а по вертикальной - уровень эквивалентных напряжений в МПа.

Отметим, что конструкция буферного бруса эксплуатируется на магистральных электровозах уже около 10 лет без каких-либо отказов и аварий.

Бункерная емкость для сыпучих материалов. Для кратковременного или длительного хранения разнообразных видов сыпучих материалов используют емкостные строительные конструкции в виде замкнутых пространственных оболочек, подкрепленных ребрами жесткости различной конфигурации. КЭ-анализ модели такой емкости, как и в предыдущем случае, выполнялся с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD for Windows [5]. При этом создава-



а)

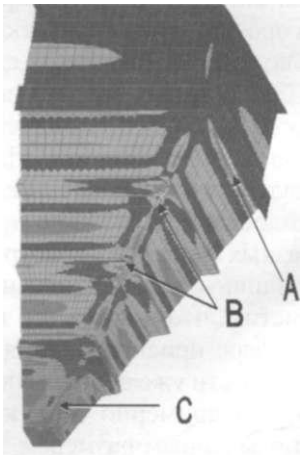
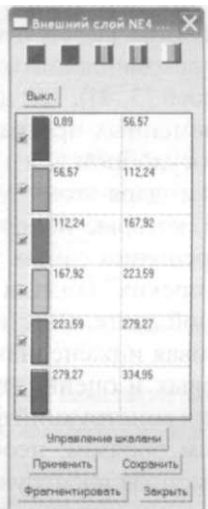


Рис. 3. Зоны концентрации напряжений в модели бункерной емкости с тавровыми ребрами жесткости (а) и U-образными ребрами жесткости (б)

лась пластинчатая КЭ-модель, представляющая собой четверть конструкции с назначением соответствующих граничных условий и условий нагружения.

На рис. 3 приведены картины распределения эквивалентных напряжений вместе с их уровнем в МПа. Четко прослеживаются несколько зон локальной концентрации напряжений, обозначенные на рисунке латинскими буквами. Как видно, полученные значения напряжений даже на достаточно грубой КЭ-сетке имеют очень высокие значения. При дальнейшем сгущении сетки наблюдается расхождение результатов, аналогичное приведенному в предыдущем примере.

Отметим, что бункерные емкости данной конструктивной схемы успешно эксплуатируются уже свыше 30 лет.

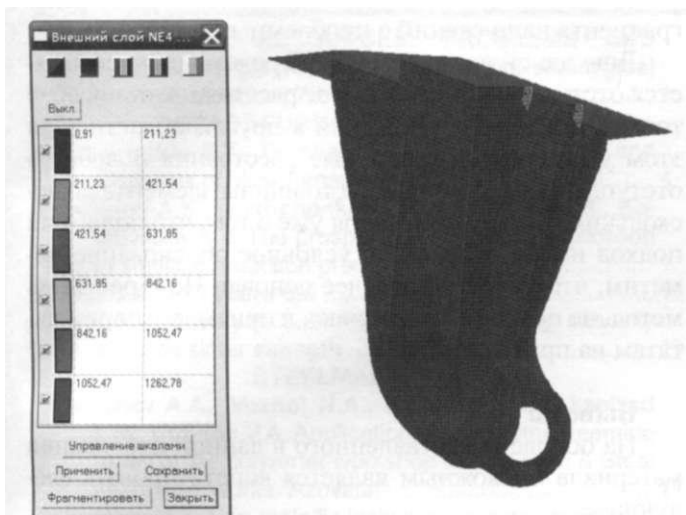
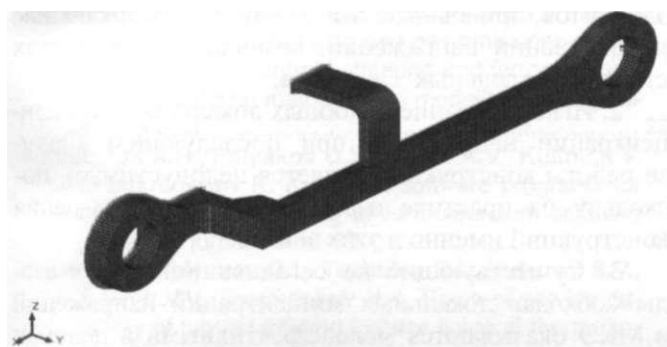


Рис. 4. Зона концентрации напряжений в модели кронштейна тягового агрегата



X,

Рис. 5. Расчетная модель подвески тягового агрегата

Кронштейн тягового агрегата. Более выраженная локальная концентрация напряжений наблюдается в конструкциях и их элементах, работающих по консольной схеме нагружения. На рис. 4 приведена картина напряженного состояния для кронштейна двигателя одной из модификаций отечественных карьерных тяговых агрегатов, используемого при добыче преимущественно рудных полезных ископаемых в карьерах и шахтах. Достаточно четко видна явно выраженная зона концентрации напряжений в углах подкрепляющих ребер жесткости. При этом в отличие от предыдущих случаев модель выполнялась объемными КЭ. Как видно из приведенных на рисунке значений эквивалентных напряжений, даже на грубой КЭ-сетке их уровень оказывается чрезмерно высоким. При сгущении сетки происходит его дальнейшее увеличение, аналогичное приведенному на рис. 2.

Заметим, что для всех рассмотренных конструкций используется углеродистая или низколегированная сталь с пределом текучести не более 300 МПа.

Чем это грозит?

Приведенных примеров оказывается вполне достаточно для того, чтобы проиллюстрировать одну из неприятнейших особенностей МКЭ. Она заключается в отсутствии сходимости напряжений в любых угловых зонах соединения отдельных элементов и носит название сингулярности по напряжениям. Причем, как показывают наработки авторов публикации, сингулярность характерна как для пластинчатых, так

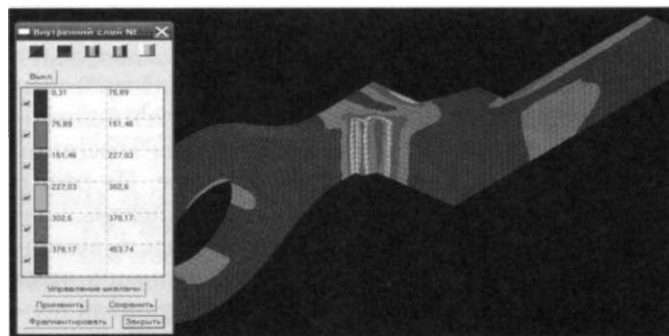


Рис. 6. Зона концентрации напряжений в модели подвески тягового агрегата

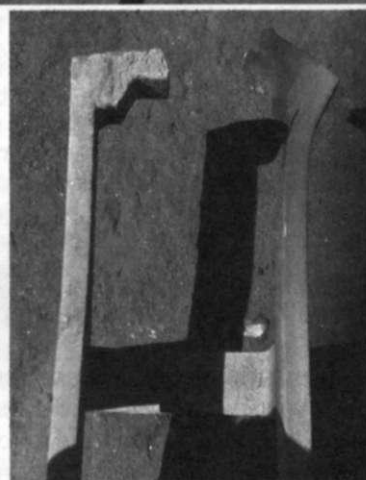
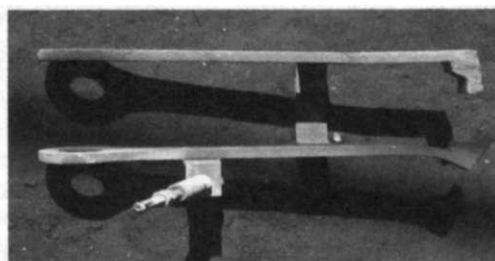


Рис. 7. Разрушенная подвеска тягового агрегата

и для объемных КЭ любых известных на сегодняшний день видов. Основным условием ее возникновения является наличие сколь-нибудь отличного от нуля градусов угла между сопрягаемыми плоскостями. Таким образом, важнейшая характеристика анализа работы конструкции - напряжение - фактически оказывается неопределимой.

Одним из достаточно популярных подходов в данной ситуации, применяемым инженерами на практике, является отказ от рассмотрения указанных локальных зон концентрации напряжений. При этом считается, что в таких случаях вполне оправданным оказывается использование теории приспособляемости, предполагая, что даже если в этих зонах и возникают пластические деформации при работе конструкции, то они являются не опасными.

Рассуждения такого рода, по нашему мнению, требуют достаточно точной и обоснованной теоретической аргументации. В случаях же динамического нагружения конструкций, что, например, достаточно характерно для машиностроительных конструкций, подобные подходы вообще могут быть лишены

МАШИНОВЕДЕНИЕ

смысла. В связи с этим считаем уместным привести следующий пример.

Подвеска тягового агрегата. На рис. 5 приведен общий вид КЭ-модели подвески одной из модификаций отечественных карьерных тяговых агрегатов, упоминавшегося в предыдущем примере. На рис. 6 приведена картина распределения эквивалентных напряжений в зоне переходной шейки. Модель выполнена с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD for Windows и представляет собой пространственную конструкцию (до оси симметрии), составленную из объемных КЭ. Концентрация напряжений, как и в предыдущих случаях, носит локальный характер.

Заметим, что срок эксплуатации данного конструктивного узла на карьерных электровозах составляет около 30 лет.

На рис. 7 приведены фотографии этой же тяги, разрушившейся после непродолжительной эксплуатации (7 лет) в указанном месте концентрации.

Таким образом, игнорирование локальных мест концентрации напряжений, получаемых при расчете МКЭ, оказывается недопустимым. На практике конструкции с подобными концентраторами могут разрушаться.

Справедливости ради следует отметить, что подобная локальная концентрация напряжений наблюдается не только при расчетах с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD for Windows. Все перечисленные в данной публикации конструкции моделировались с помощью программно-вычислительных комплексов NASTRAN, SolidWorks и ANSYS. Получаемые картины напряженного состояния во всех случаях оказывались абсолютно идентичны приведенным выше в качественном отношении и с небольшим отличием в количественном отношении.

Разработчики о сходимости

Интерес авторов к данной проблеме и необходимость ее решения подтолкнули его к выходу на разработчиков ряда проектно-вычислительных комплексов, аналогичных уже упомянутых выше.

Прежде всего, многие из них подтверждают сам факт отсутствия сходимости напряжений в «особых точках», ссылаясь на теорию МКЭ. Однако, для пользователя программных продуктов этого явно недостаточно, поскольку при проведении любых инженерных расчетов необходимо иметь четкое представление о характере напряженно-деформированного состояния в анализируемом объекте.

В качестве рекомендаций обхода «особых точек» предлагается выполнять скругления в местах соединения отдельных элементов, имитирующие сварные швы. В связи с этим следует отметить, что для пластинчатых КЭ - моделей подобный подход вообще оказывается невозможным. Сами же выполняемые скругления, как показывают авторские наработки, не решают проблему сходимости, а лишь приводят к снижению

градиента напряжений в проблемных зонах.

Еще одной часто слышимой рекомендацией является отступление на некоторое расстояние от «особой точки» и анализ напряжений в другой области. При этом указываются различные расстояния подобного отступления - от половины толщины элемента до нескольких толщин. Не говоря уже о том, что подобный подход имеет достаточно условное обоснование, заметим, что на такой же идее основан Hot-Spot Stress метод, не приводящий, однако, к приемлемым результатам на практике [6].

Выводы

На основе представленного в данной публикации материала возможным является констатировать следующее.

1. Все машиностроительные и строительные конструкции, состоящие из отдельных пересекающихся элементов, при анализе МКЭ будут иметь локальные концентрации напряжений, возникающие в местах стыков отдельных элементов.

2. Игнорирование подобных локальных мест концентрации напряжений при последующем анализе работы конструкции является недопустимым, поскольку на практике известны случаи разрушения конструкций именно в этих зонах.

3. Существующие на сегодняшний день методы «обхода» локальных концентраций напряжений в МКЭ оказываются малоэффективными в целом и трудноприменимыми для пластинчатых КЭ-моделей в частности.

4. Требуется разработка новых теоретических моделей, описывающих работу локальных зон концентрации напряжений в конструкциях. При этом необходимо уточнение и корректировка результатов, получаемых с помощью стандартных методов строительной механики, таких как МКЭ.

Библиографический список

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. - М.: Мир, 1975. - 542 с.
2. Основы метода конечных элементов / В.И. Большаков, Е.А. Яценко, Г. Соссу и др. - Днепропетровск: ПГАСА, 2000. - 255 с.
3. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д.О. Банников, М.И. Казакевич. - Днепропетровск: Наука и образование, 2003. - 150 с.
4. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. - К.: ВПП «Компас», 2001. - 448 с.
5. SCAD для пользователя / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунрв, А.В. Перельмутер и др. - К.: ВВП «Компас», 2000. - 332 с.
6. Fatigue Assessment of Aluminum Ship Details by Hot-Spot Stress Approach / W.T. Bard, W. Xiaozhi, B. Stig // ABS Technical Papers, 2007. - P. 255-271.

Поступила 02.06.2011