

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СТАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ABAQUS

Надольский В.В., Полещук А.Л.

**Введение.** Использование информационных технологий позволяет стремительными темпами развиваться всем отраслям, в том числе и строительной. Внедрение комплексов автоматизированного проектирования в строительство позволяет принимать наиболее рациональные решения, а также минимизировать материально–технические ресурсы при производстве.

Одной из наиболее важных задач при проектировании является оценка значений фактической несущей способности элемента. Расчетные модели сопротивления, регламентированные в нормативных документах, подтверждаются большим количеством экспериментов и опытом проектирования. При этом в условиях современного быстрого совершенствования технологий и методов проектирования все шире используют новые оригинальные конструктивные формы, для которых расчетные модели не регламентированы или не применимы. Использование новых конструктивных форм, как правило, требует экспериментального подтверждения. Ввиду высокой стоимости испытаний все большее распространение получают численные методы.

В настоящее время среди численных методов решения с точки зрения точности вычислений, адаптации к вычислительной технике, многообразия и сложности решаемых задач, приближения расчетных схем к реальному объекту наиболее удобно использовать метод конечных элементов, на основании которого создано много систем КЭ-анализа с высокоразвитым интерфейсом, применяемых в инженерной деятельности. Для сопоставимости результатов расчёта необходима разработка единых требований к моделям, созданным с использованием метода конечных элементов. Требования должны быть направлены на то, чтобы проектирование с использованием МКЭ было надежным и сопоставимым по точности с инженерными расчетными зависимостями.

В связи с этим разработка и анализ КЭ моделей стальных балок с целью сравнения результатов с экспериментальными данными, полученными при испытании балок в реальных условиях, являются весьма актуальными. Результаты настоящей работы могут быть использованы в качестве основы для дальнейшей разработки моделей и частичного замещения реальных экспериментов моделированием.

**Общие сведения о КЭ моделировании стальных элементов.** На сегодняшний день область применения МКЭ очень широка и охватывает все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Главные преимущества метода конечных элементов:

- Метод конечных элементов может быть применен к телам, которые состоят из нескольких материалов, т.к. свойства материалов смежных элементов не обязательно должны быть одинаковыми.

- Криволинейная область может быть описана двумя способами: с помощью прямолинейных элементов или более точно посредством криволинейных элементов.

- Размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнять или измельчать сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.

• Указанные выше преимущества метода могут быть использованы при составлении достаточно общей программы для решения частных задач определенного класса.

Вычисления, которые требуется проводить при использовании метода конечных элементов, слишком громоздки для ручного счета даже в случае решения очень простых задач. Поэтому особенность метода конечных элементов заключается в необходимости составления вычислительных программ и применения вычислительной техники.

Несмотря на то, что принципиальный подход работы программных комплексов одинаковый, программы отличаются набором конечных элементов, которые определяют круг решаемых задач. Множество современных программных комплексов имеют большую библиотеку конечных элементов, использование собственных подпрограмм позволяет создавать свои модели поведения различных материалов, конечные элементы и типы нагрузок. Большинство таких программных комплексов являются программами общего назначения для проведения многоцелевого инженерного анализа. Универсальные программные комплексы позволяют наилучшим образом оценить сложное нелинейно-деформированное состояние модели благодаря обширной библиотеке конечных элементов и их удачной автоматической генерации. Однако в таких программах не предусмотрены в достаточном объеме библиотеки материалов, поперечных сечений элементов согласно различным стандартам, поэтому часто приходится создавать собственные типы поперечных сечений и задавать свойства материала вручную, что значительно увеличивает трудоемкость создания модели. Также существуют сложности с оценкой предельных состояний конструкций согласно требуемым нормам проектирования.

Избежать этого помогают специализированные программные комплексы, предназначенные для строительства. Но многие из них не имеют полной поддержки решения нелинейных задач (таких как моделирование грунта, учет геометрической нелинейности и нелинейности свойств материала т.д.), имеют ограничения размеров задач, автоматическая генерация сетки конечных элементов не всегда является удачной.

**Краткое описание экспериментальных образцов и методики испытаний.** Для оценки значений сопротивления стального элемента с помощью КЭ модели в программном комплексе Abaqus были смоделированы 5 балок, испытания над которыми проводились в лаборатории Лихайского университета Бетлехема, штат Пенсильвания, США. Подробное описание образцов и методики эксперимента представлено в работе].

Испытания были проведены на двух балках, которые изначально отличались только расстоянием между ребрами жесткости. Балки состояли из тестируемой секции, в которой ожидается отказ, и двух усиленных концевых секций, отказ которых сводился к минимуму (рисунок 1). Размеры двух балок идентичны за исключением шага ребер жесткости в тестируемой секции. Толщина стенки в тестируемой секции – 4,9 мм, толщина стенки в остальных секциях – 9,4 мм, толщина верхней полки – 19,8 мм, толщина нижней полки – 19,8 мм, ширина верхней полки – 308,1 мм, ширина нижней полки – 308,1 мм, высота стенки – 1270 мм, ширина ребра жесткости – 101,6 мм, толщина ребра жесткости – 6,4 мм, длина балок – 12500 мм. Сталь в балках применена ASTM 373-56T с пределом текучести 275 МПа.

В балках были установлены поперечные ребра жесткости двух типов: промежуточные и опорные. Все промежуточные ребра были приварены с обеих сторон к стенке и к сжатому поясу. Опорные ребра жесткости, используемые в местах нагружения и опор, имели тавровое сечение. Промежуточные ребра жесткости имели прямоугольное сечение. Сталь уобоих типов ребер имела предел текучести около 300 МПа.

При испытании, тестируемые секции были освобождены от концентраций напряжений во время начального нагружения и, насколько возможно, подвергались «чистому сдвигу». Далее балка проходила стадии нагружения до отказа, сопровождающегося местной потерей устойчивости стенки и образованием характерной растянутой диагонали. Развитие полноценной закритической стадии работы отсека не допускалось. После испытания балки отказавший отсек усиливали постановкой **дополнительных ребер жесткости** и проводили испытания повторно с ожидаемым отказом в не усиленном отсеке.

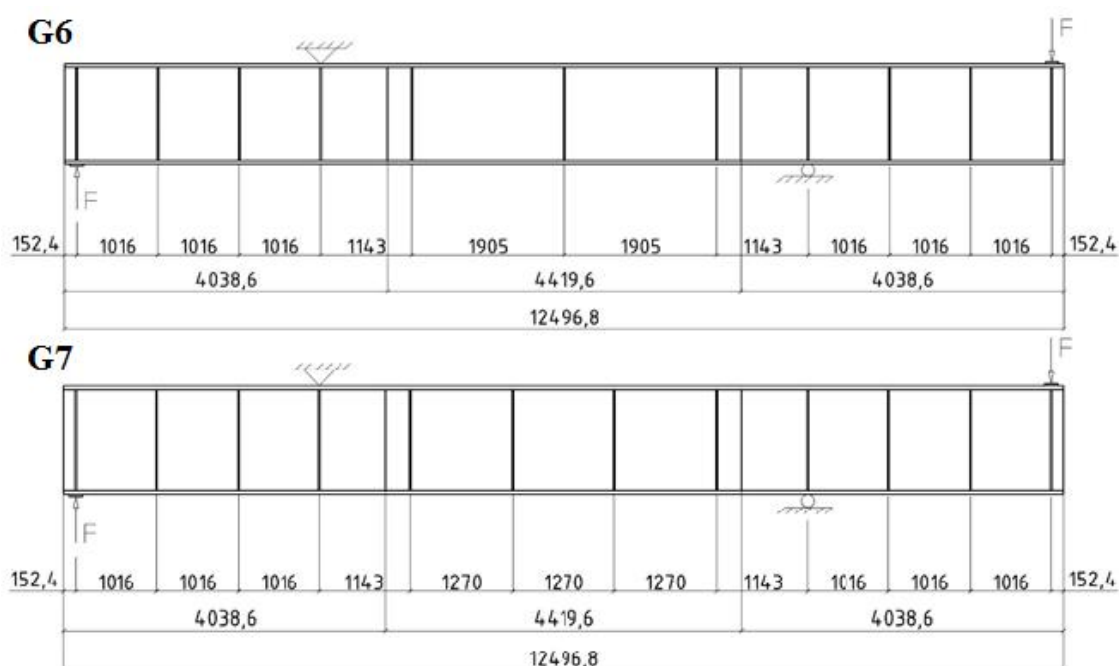


Рисунок 1 – Схема испытательной установки

**Создание модели стального элемента в программном комплексе Abaqus.** При создании тонкостенных элементов можно использовать КЭ элементы shell или solid. Выбор был сделан в пользу shell, т.к. для этой формы добиться точного разбиения на конечные элементы гораздо проще. Вторым фактором стало то, что при расчете модели, созданной с помощью элементов shell, требуется меньше дискового пространства, а соответственно и скорость анализа будет выше, что особенно важно для нелинейного расчета.

Моделируемые балки состоят из следующих частей: верхний и нижний пояса, стенка в испытываемом отсеке, утолщенная стенка за пределами испытываемого отсека, ребра жесткости и утолщенные ребра жесткости в местах загрузки и опор.

В Abaqus нет библиотеки материалов, поэтому все характеристики требуется задавать вручную. Моделируемые балки состоят из двух сталей с заявленными пределами текучести 275 МПа и 300 МПа. Сталь ребер жесткости имеет предел текучести 300 МПа, все остальные элементы – 275 МПа.

Для обеих марок стали были заданы следующие упругие свойства: модуль упругости – 206000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Из-за отсутствия данных о фактических значениях предела прочности стали при растяжении и пластических деформациях используемых сталей, были заданы наиболее распространенные значения. Для стали с заявленным пределом текучести 275 МПа заданы следующие пластические свойства: предел текучести – 253 МПа, предел прочности при растяжении – 480 МПа, предельные относительные пластические деформации – 0,02. Для стали с заявленным пределом текучести 300 МПа заданы следующие пластические свойства: предел текучести – 280 МПа, предел прочности при растяжении – 500 МПа, предельные относительные пластические деформации – 0,02.

Нагрузка в моделируемых балках передается через пластины, поэтому были созданы контактные поверхности (верхний пояс и пластина, нижний пояс и пластина). При создании геометрии пластины, был выбран тип «Discreterigid».

Создав нагрузки или закрепления элемента на различных шагах, возможно организовать их последовательное влияние на элемент. В моделях были созданы 3 шага: начальный, первый и второй шаг. На начальном шаге была закреплена балка и отсек, к которому будет приложена сила, эквивалентная геометрическим несовершенствам. На верхнем поясе создано закрепление с ограничением перемещений по  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . На нижнем поясе – с ограничением перемещений по  $y$ ,  $z$ . Угловые точки стенки отсека закреплены от перемещений по  $z$ .

На первом шаге были приложены собственный вес и давление, эквивалентное геометрическим несовершенствам. Геометрические несовершенства были учтены с помощью эквивалентной силы. Согласно ТКП EN 1993-1-5 [2] величина эквивалентных геометрических несовершенств может быть принята равной минимальной из значений  $(a/200, b/200)$ , где  $a$  и  $b$  являются сторонами рассматриваемого отсека. Для получения эквивалентной силы, к отсеку прикладывалось некоторое давление до тех пор, пока перемещения в нем не достигли эквивалентных геометрических несовершенств.

На втором шаге были приложены узловые силы к контактным пластинам на поясах.

После создания загружений была построена сетка конечных элементов. Для уменьшения погрешности при использовании МКЭ необходимо, чтобы элементы имели оптимальную форму. Т.е. разбитые элементы должны иметь форму простейших равносторонних фигур (квадрат, равносторонний треугольник).

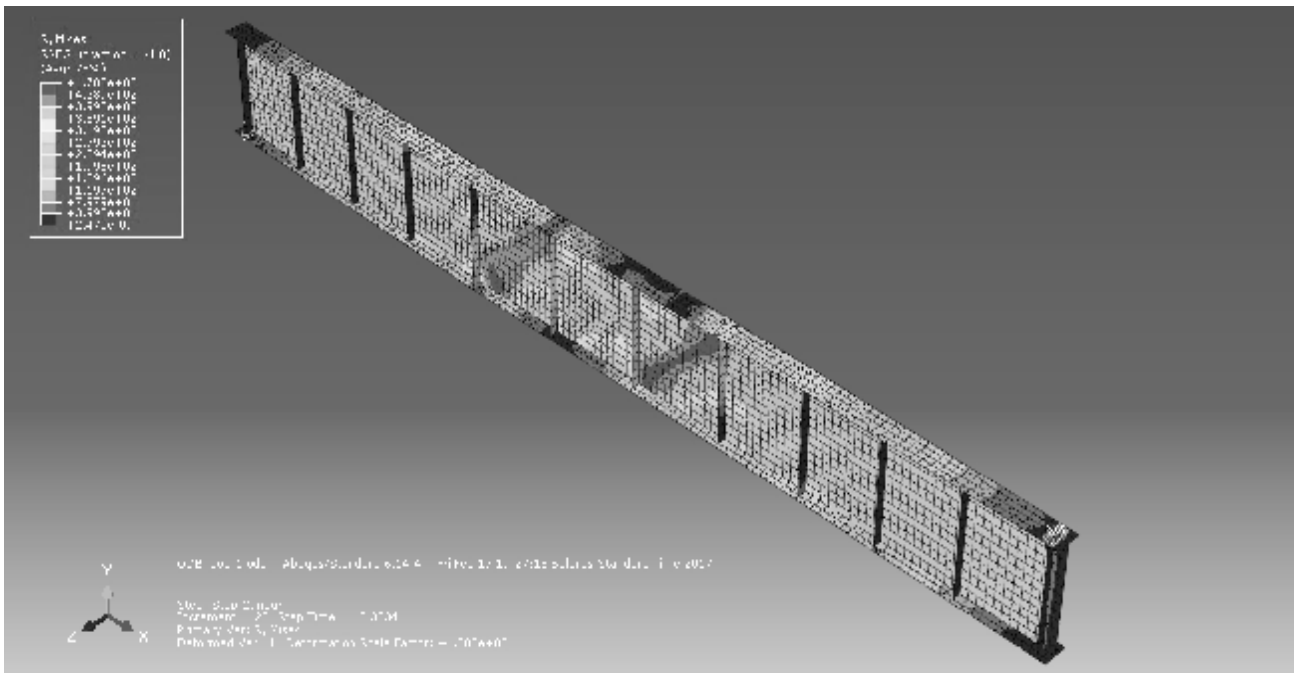
При построении сетки конечных элементов важно учитывать следующие рекомендации:

- Отношение сторон элемента должно быть не более 1:10;
- Углы пластинчатых элементов должны быть между 30 и 150 градусами;
- Если вершины четырехугольника находятся не в одной плоскости, то следует использовать два треугольных элемента;
- Четырехугольный пластинчатый элемент не должен иметь самопересечений;
- Четырехугольный пластинчатый элемент должен быть выпуклым.

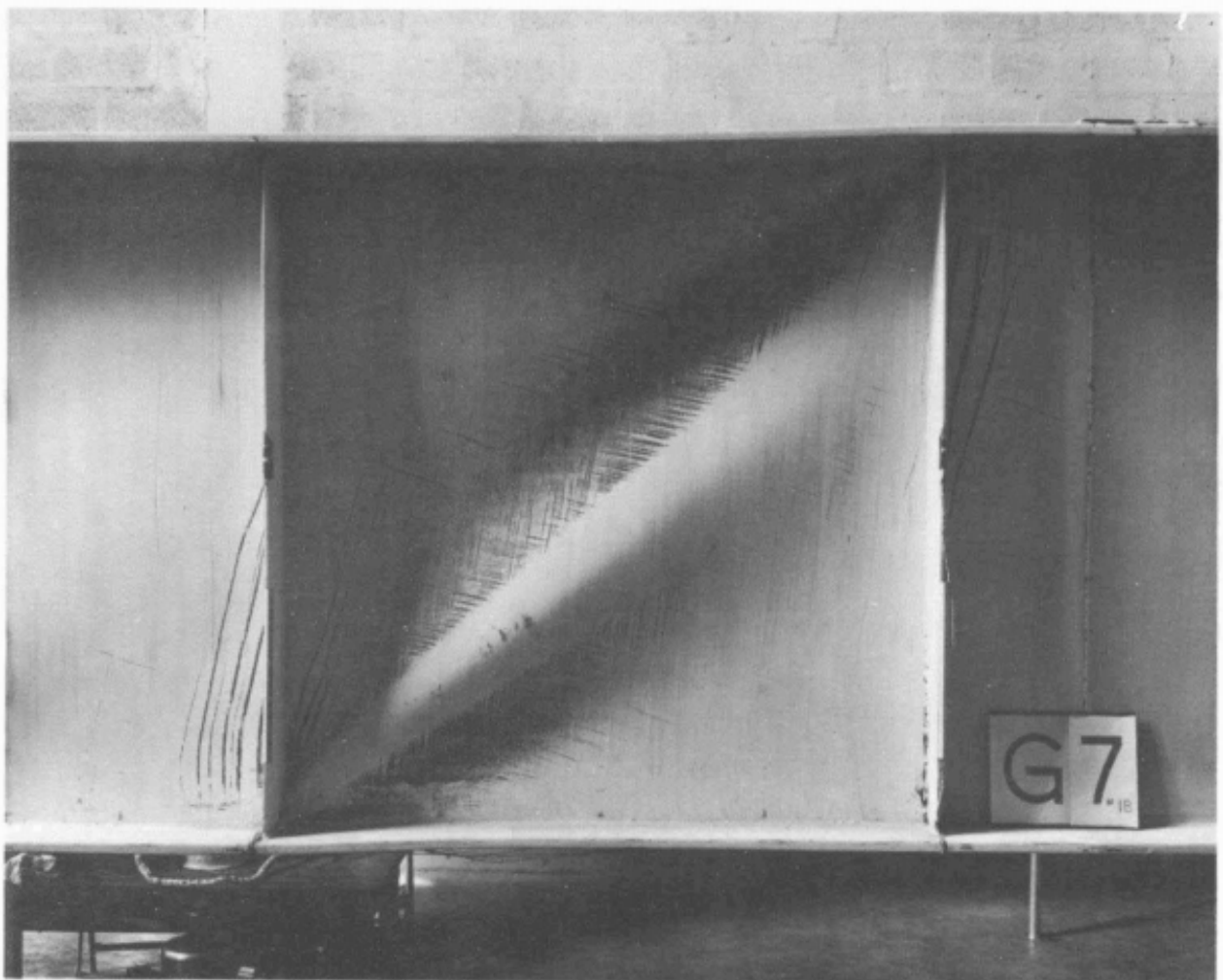
Степень измельчения сетки балки была подобрана путем сравнения полученных результатов с экспериментальными и составила 100мм, для контактных пластин – 30 мм. Тип конечного элемента – S4R. Сетка была сгенерирована и структурирована автоматически.

Расчет проводился нелинейный с начальным приращением – 0,1 от нагрузки, минимальным приращением –  $1 \cdot 10^{-5}$  и максимальным приращением, равным величине действующей силы.

На рисунке 2 представлена КЭ модель одного (G7 T1) из испытываемых образцов при достижении предельной нагрузки. На рисунке 3 представлен отказавший отсек балки G7 T1.



**Рисунок 2 – Балка G7T1 после достижения предельных деформаций**



**Рисунок 3 – Деформации стенки и поясов балки G7**

**Заключение.** На основании численного и качественного анализа смоделированных в программном комплексе Abaqus стальных балок, испытания которых проводились в лаборатории Лихайского университета Бетлхема, США [0], можно сделать следующие выводы. Полученные результаты работы балок (нагрузки и перемещения) были сопоставлены с результатами натурального эксперимента, отличие значений составило менее 10% в четырех моделях из пяти. В одной модели значения различались на 20%. Дополнительными факторами, влияющими на неопределенность результатов, являются отсутствие таких исходных данных как фактический предел текучести для одной из использованных сталей, предел прочности при растяжении, относительные деформации, геометрические сечения ребер жесткости и т.д.

При дальнейшем исследовании возможно получение адекватных результатов моделирования элемента для различных стадий работы материала. Это позволит исследовать и совершенствовать элементы, сокращая объемы дорогостоящих реальных испытаний.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Basler, K. Web buckling tests on welded plate girders, Part 3: Tests on plate girders subjected to shear – Fritz Engineering Laboratory Lehigh University Bethlehem – 1960. – 48с.
2. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций: ТКП EN 1993-1-5-2009\*. Введ. 01.01.2010– Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2014. – 51 с.
3. Еврокод. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990-2011. Введ. 01.07.12. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2015. – 70 с.