

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.А. ТУРКОВА

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГЕОМЕТРИИ ТРЕЩИН В SIMULIA ABAQUS.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРОКОНЕЧНЫХ ТРЕЩИН
И ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНОГО ИНТЕГРАЛА.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ТРЕЩИН**

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебно-методического пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 01.03.03, 01.04.03 Механика и математическое моделирование

САМАРА
Издательство Самарского университета
2023

УДК 539.4(075)+004.94(075)
ББК В251я7+А62я7
Т880

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. М. Е. Ф е д и н а,
канд. техн. Наук, доц. В. В. А в с и е в и ч

Туркова, Вера Александровна
Т880 **Особенности моделирования геометрии трещин в SIMULIA ABAQUS. Моделирование остроконечных трещин и вычисление контурного интеграла. Моделирование открытых трещин:** учебно-методическое пособие / В.А. Туркова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 64 с.

ISBN 978-5-7883-1887-5

Данное учебно-методическое пособие содержит углубленное изучение темы работы с моделированием трещин и предназначено для обучающихся и преподавателей, работающих с конечно-элементным пакетом Simulia Abaqus. Предполагается, что обучающиеся обладают базовыми практическими навыками по работе в конечно-элементном пакете Simulia Abaqus.

Предназначено для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирование (Вычислительные технологии в механике сплошных сред) и 01.03.03 Механика и математическое моделирование (Вычислительная механика).

УДК 539.4(075)+004.94(075)
ББК В251я7+А62я7

ISBN 978-5-7883-1887-5

© Самарский университет, 2023

Учебное издание

Туркова Вера Александровна

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ТРЕЩИН В SIMULIA ABAQUS.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРОКОНЕЧНЫХ ТРЕЩИН И ВЫЧИСЛЕНИЕ
КОНТУРНОГО ИНТЕГРАЛА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ТРЕЩИН**

Учебно-методическое пособие

Редакционно-издательская обработка А.С. Никитиной

Подписано в печать 26.04.2023. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,0.

Тираж 27 экз. Заказ . Арт. – 2 (Р1УМП)/2023.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
1.1. Работа с сеткой разбиения модели	6
1.2. Сингулярность в вершине трещины при расчете малых деформаций	7
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИН С ОСТРЫМ КОНЦОМ В 2D	7
2.1. Задача о наклонной трещине в пластине	8
2.1.1. Варианты настройки опций трещин	16
2.2. Моделирование сингулярности в вершине трещины при помощи четырехугольных элементов второго порядка	18
2.3. Моделирование сингулярности в вершине трещины при помощи четырехугольных элементов первого порядка	19
2.4. Контроль расположения узлов на сторонах элемента при КЭ-разбиении	19
2.5. Угловое разрешение элементов у вершины трещины	20
2.6. Создание преобразованных элементов	20
2.7. Альтернативные варианты создания преобразованных элементов	21
2.8. Создание сетки в задаче о наклонной трещине в пластине.....	21
3. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНОГО ИНТЕГРАЛА.....	28
3.1. Задание параметров для вычисления контурного интеграла в задаче о наклонной трещине в пластине	32
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИН С ОСТРЫМ КОНЦОМ В 3D	34
4.1. Опции для задания фронта трещины и линии трещины	34
4.2. Моделирование сингулярности у кончика трещины в 3D	36
4.3. Задача о конической трещине в бесконечной полуплоскости	38
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ТРЕЩИН	58
5.1. Моделирование открытых трещин в 2D	58
5.2. Моделирование открытых трещин в 3D	59
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	64

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

КЭ	– конечный элемент;
ЛУМР	– линейно-упругая механика разрушения;
МКЭ	– метод конечных элементов;
FEM	(Finite Element Method) – метод конечных элементов;
XFEM	(Extended Finite Element Method) – расширенный метод конечных элементов.

Математическая сингулярность (особенность) – точка, в которой математическая функция стремится к бесконечности или имеет какие-либо иные нерегулярности поведения.

ВВЕДЕНИЕ

Востребованному специалисту необходимо владеть современными инструментами расчета, особенно проектировщикам, конструкторам, инженерам по прочности, ученым. Самые современные инструменты расчета, соответственно, это системы инженерного анализа – CAE (Computer-Aided Engineering).

CAE Simulia Abaqus – программный комплекс мирового уровня в области КЭ расчетов на прочность, с помощью которого можно получать точные и достоверные решения для сложных линейных и нелинейных инженерных задач. Пакет также предоставляет широкие возможности для моделирования задач механики разрушения, в том числе трещин разного вида.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

КЭ пакет Abaqus предлагает два альтернативных метода моделирования трещин. Первый – основан на стандартном методе конечных элементов и предполагает, что пользователь самостоятельно создаст разбиение модели на элементы, соответствующее геометрии трещины. Второй – основан на расширенном методе конечного элемента (XFEM). Этот метод не требует соответствия разбиения модели и ее геометрии.

Трещина (crack) может моделироваться с острым концом (sharp) (рис. 1, *а*) либо затупленным (blunted) (рис. 2, *б*).

Трещины с острым концом применяются при вычислении малых деформаций. Сингулярное поведение в вершине такой трещины требует особого внимания. В Abaqus острые трещины моделируются при помощи геометрии «шва» (seam geometry).

Трещины с затупленным концом применяются при расчете конечных деформаций. Характеризуется не сингулярным поведением в вершине трещины. В Abaqus трещина с затупленным концом моделируется, используя «открытую» геометрию (open geometry), например, надрез (notch).

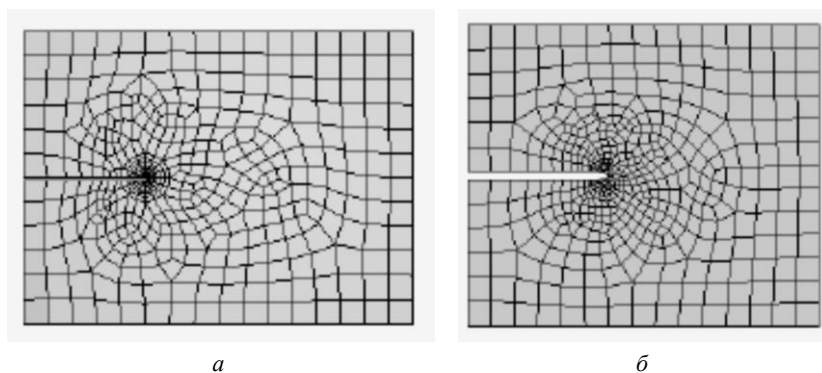


Рисунок 1 – Типы трещин при моделировании:
а – трещина с острым концом; б – трещина с затупленным концом

1.1. Работа с сеткой разбиения модели

Вершины трещин вызывают концентрацию напряжений. Градиенты напряжений и деформаций возрастают при приближении к концу трещины. Поэтому, чтобы получить точные значения напряжений и деформаций, КЭ-сетка должна быть уточнена в окрестности вершины трещины.

Важное замечание – J -интеграл является мерой измерения энергии, и для ЛУМР точные значения J -интеграла могут быть получены с довольно грубой сеткой, несмотря на то, что локальные поля напряжений и деформаций будут не очень точными. Для пластичности или сверх пластичности область кончика трещины должна моделироваться аккуратно, для получения точных результатов J -интеграла.

1.2. Сингулярность в вершине трещины при расчете малых деформаций

Для сходимости сетки при анализе малых деформаций необходимо учитывать сингулярность в вершине трещины. Значения J -интеграла более точные, если сингулярность включена в сетку в кончике трещины. Поля напряжений и деформаций в кончике трещины будут смоделированы более точно, если брать в расчет сингулярность.

При анализе малых деформаций сингулярность следующая:

- для линейной упругости $\varepsilon \propto r^{-1/2}$;
- для идеальной пластичности $\varepsilon \propto r^{-1}$;
- для степенного закона упрочнения $\varepsilon \propto r^{-n/(n+1)}$.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИН С ОСТРЫМ КОНЦОМ В 2D

В двумерной системе координат трещина моделируется как разбиение внутреннего края, включенного (частично или целиком) в поверхность модели. Это называется моделирование трещины в виде шва (seam crack). Край вдоль шва будет иметь дублирующие узлы, так, чтобы элементы на противоположных сторонах шва не имели общих узлов.

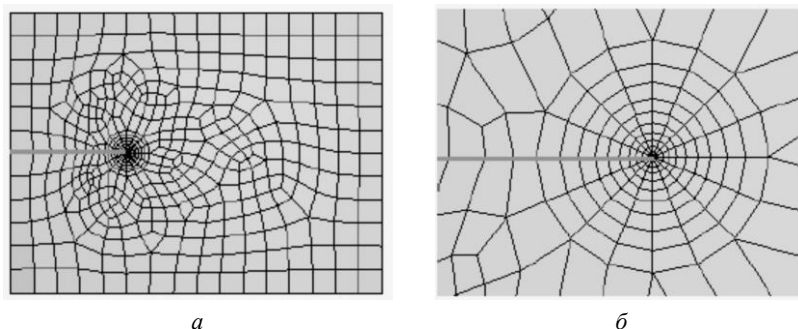


Рисунок 1 – Пример разбиения модели с трещиной: а – общий план; б – крупный план

Вся 2D модель разбита на четырехугольные (quad) элементы, или на элементы с преобладанием четырехугольных (quad-dominated) (рис. 2, а). В вершине трещины вставляется кольцо треугольных элементов вместе с концентрическими слоями структурированных четырехугольных элементов (рис. 2, б). Все треугольные элементы в граничных с концом трещины областях должны представлять собой редуцированные четырехугольные элементы (degenerated quads).

2.1. Задача о наклонной трещине в пластине

1. Создайте 2D модель прямоугольной пластины (рис. 3), с размерами сторон 4 и 10 единиц.

2. Добавьте геометрию будущей трещины, используя файловое меню «Tools» – «Partition» (рис. 4). В открывшемся окне «Create Partition» выберите тип «Face», метод «Sketch», выберите поверхность, на которой будет рисоваться эскиз, нажмите кнопку «Done» (рис. 4) и создайте эскиз трещины (рис. 5). Когда эскиз будет готов, нажмите кнопку «Done».

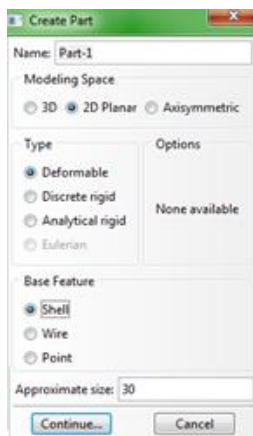


Рисунок 2 – Окно настроек эскиза

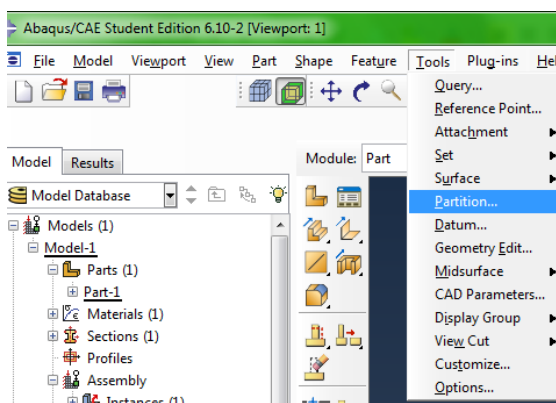


Рисунок 3 – Инструмент добавления эскиза

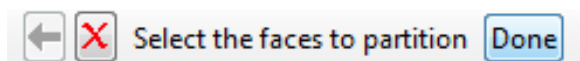


Рисунок 4 – Окно подтверждения готовности эскиза

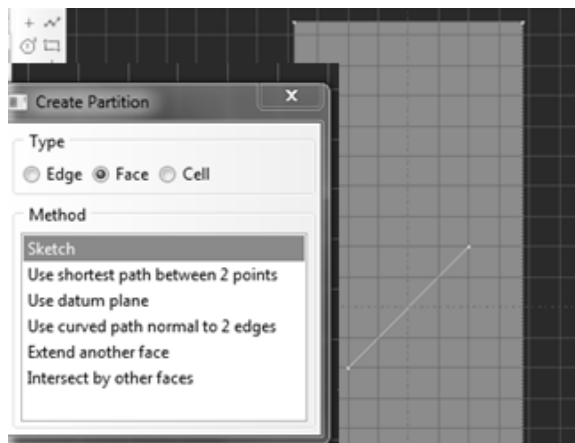


Рисунок 5 – Инструмент добавления эскизов (продолжение)

3. Задайте материал модели: упругий, константы материала $E = 70 \times 10^9$ Па, $\nu = 0,3$ (рис. 6).

4. Создайте сечение для модели: твердое, однородное тело (рис. 7). Для этого двойным щелчком кнопки мыши на разделе «Sections» в дереве модели создайте новое сечение. В открывшемся окне «Create Section» выберите категорию «Solid», тип «Homogeneous». Нажмите «Continue».

5. В открывшемся окне «Edit Section» из выпадающего списка выберите ранее созданный материал модели. Отметьте галочкой пункт «Plane stress/strain thickness» – толщина модели пластины, в качестве значения данной толщины укажите 1 и нажмите кнопку «OK» (рис. 8).

6. Присвойте созданное сечение модели, нажав на кнопку «Assign Section» (рис. 9) и выбрав в области построения пластинку (рис. 10). Нажмите кнопку «Done».

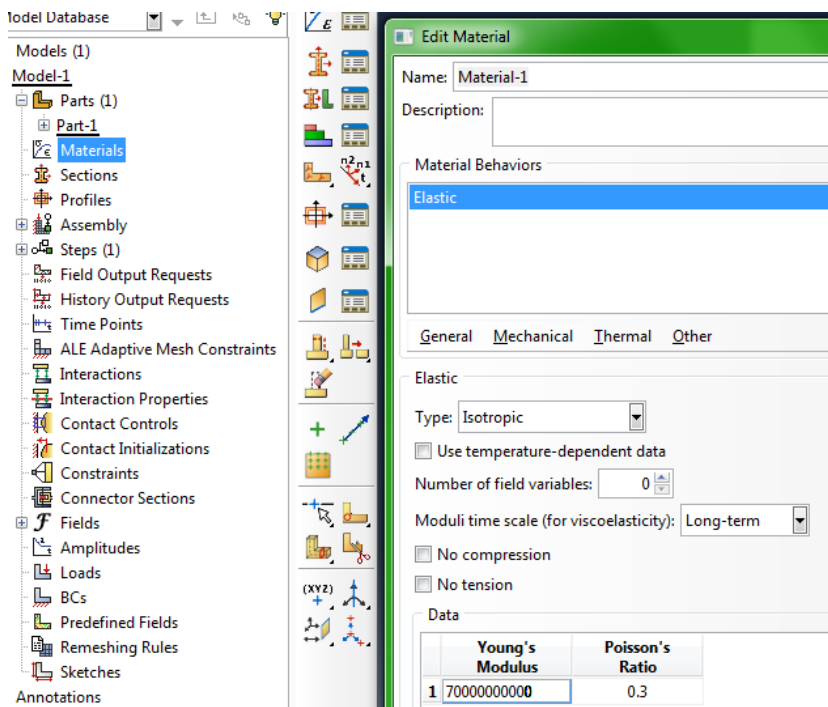


Рисунок 6 – Окно создания материала

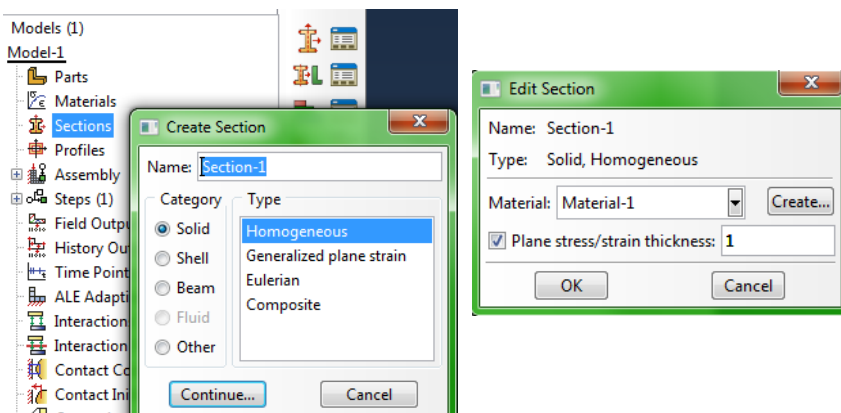


Рисунок 7 – Окно создания сечения

Рисунок 8 – Окно редактирования сечения

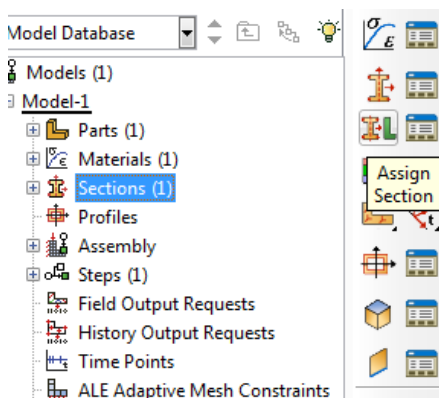


Рисунок 9 – Кнопка присвоения сечения геометрии детали

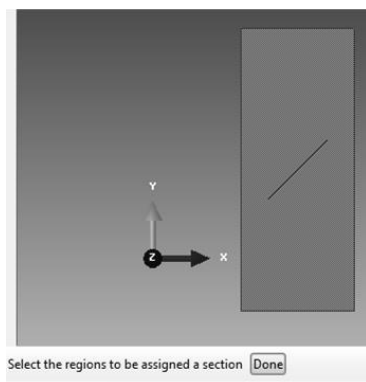


Рисунок 10 – Присвоение сечения детали

7. Перейдите в модуль «Assembly» (рис. 11), который служит для создания привязок (ссылок на детали) и объединения деталей в сборки. Двойным щелчком кнопки мыши на разделе «Instances» откройте окно «Create Instance», в котором выделите модель пластины и выберите тип «Independent». Нажмите кнопку «ОК».

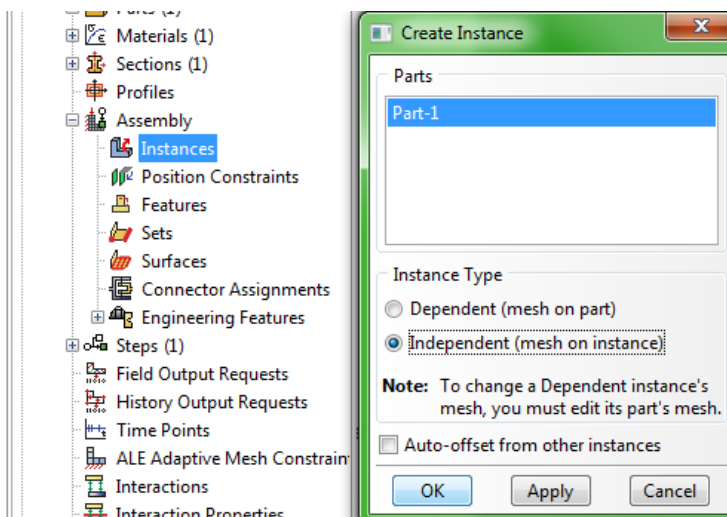


Рисунок 11 – Создание сборки

8. Перейдите в модуль «Interaction» («Взаимодействие») (рис. 12).

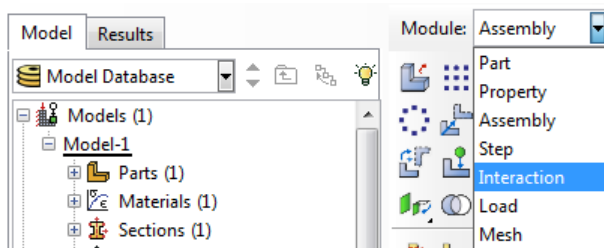


Рисунок 12 – Переход в модуль «Взаимодействие»

9. Присвойте «геометрию шва» эскизу трещины в пластине. Для этого в файловом меню выберите «Special» – «Crack» – «Assign Seam» (рис. 13).

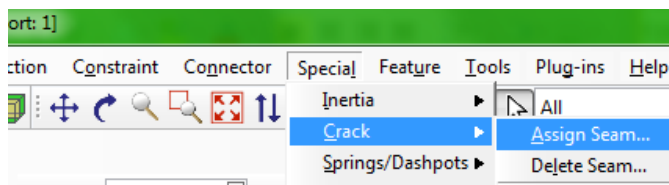


Рисунок 13 – Создание трещины

10. В области просмотра выделите эскиз трещины и нажмите кнопку «Done» (рис. 14).

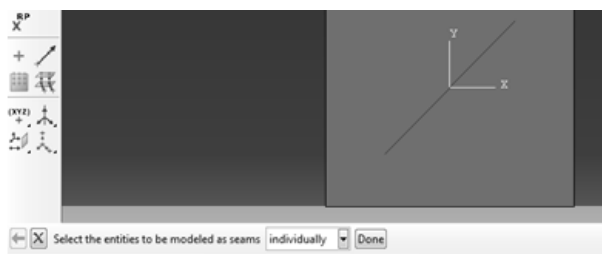


Рисунок 14 – Выбор геометрии трещины в представлении

11. Чтобы создать трещину, необходимо определить:

- фронт трещины и кончик трещины;
- нормаль к плоскости трещины или направление распространения трещины.

Примечание: направление распространения трещины называется « q вектор». q вектор определяет направление, в котором трещина бы распространялась, если бы росла. Данная величина используется для вычисления контурных интегралов.

12. В модуле «Assembly» в разделе «Engineering Features» (рис. 15) двойным щелчком кнопки мыши на пункт «Cracks» откройте окно «Create Crack» и выберите способ задания трещины «Contour integral» и нажмите кнопку «Continue».

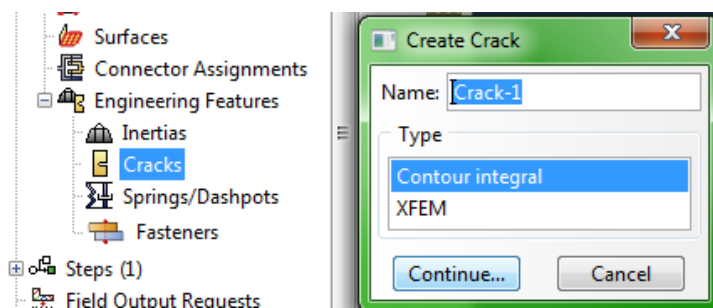


Рисунок 15 – Создание трещины, выбор типа моделирования

13. Далее необходимо указать в окне просмотра фронт трещины. В рассматриваемой задаче фронтом трещины является вершина трещины (рис. 16). Выберите в окне просмотра вершину трещины и нажмите кнопку «Done» (рис. 17).

14. Выберите, при помощи какого метода будете указывать направление распространения трещины: через нормаль к поверхности трещины, либо через q вектор. Для примера приведем указание направления через q вектор. Нажмите на текущей панели кнопку « q vectors» (рис. 18).

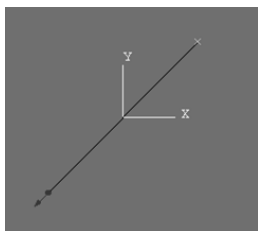


Рисунок 16 –
Указание вершины
трещины

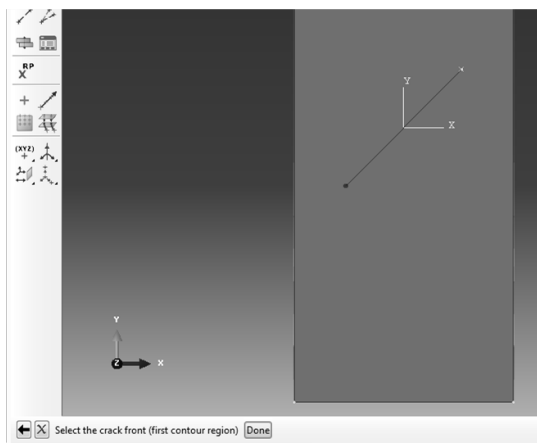


Рисунок 17 – Расположение кнопки «Done»

15. Укажите координаты начальной точки q вектора (рис. 19), нажмите клавишу «Enter».

16. Укажите координаты конечной точки q вектора (рис. 20), нажмите клавишу «Enter».

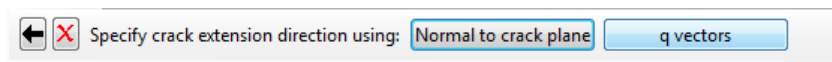


Рисунок 18 – Кнопка «q vectors»

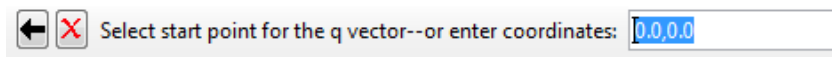


Рисунок 19 – Задание начальной точки вектора

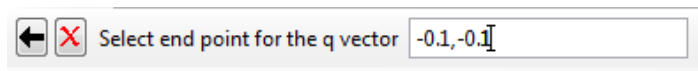


Рисунок 20 – Задание конечной точки вектора

Примечание: будьте внимательны с координатами конечной точки q вектора! Проверяйте направление получившегося вектора!

17. В открывшемся окне «Edit Crack» на вкладке «General» оставьте все значения по умолчанию (рис. 21), перейдите на вкладку «Singularity» и установите для «Midside node parameter» значение «0,25». В списке «Degenerate Element Control at Crack Tip/Line» выберите вариант «Collapsed element side, single node» (рис. 22). Нажмите кнопку «OK».

Примечание: подробно про назначение настроек в окне «Edit Crack» можно узнать в следующих разделах настоящего учебно-методического пособия.

18. Повторите действия в пунктах 12–17 для другого конца трещины.

Примечание: будьте внимательны с координатами конечной точки q вектора! Проверяйте направление получившегося вектора!

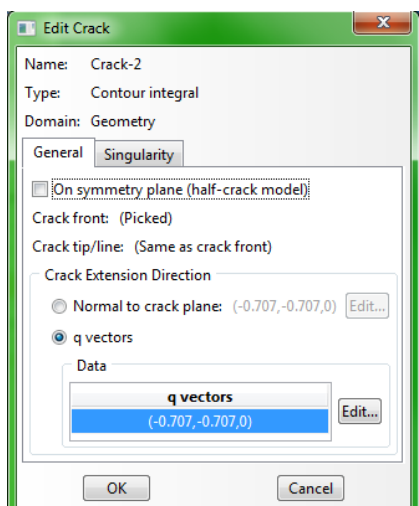


Рисунок 21 – Задание общих настроек трещины

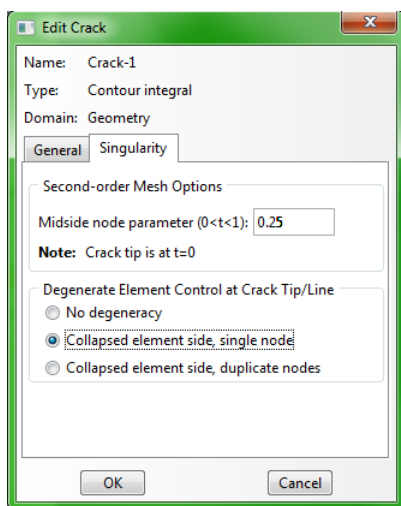


Рисунок 22 – Задание настроек сингулярности

2.1.1. Варианты настройки опций трещин

На рис. 25 показаны варианты использования опций окна «Edit Crack» – «General» при моделировании трещин.

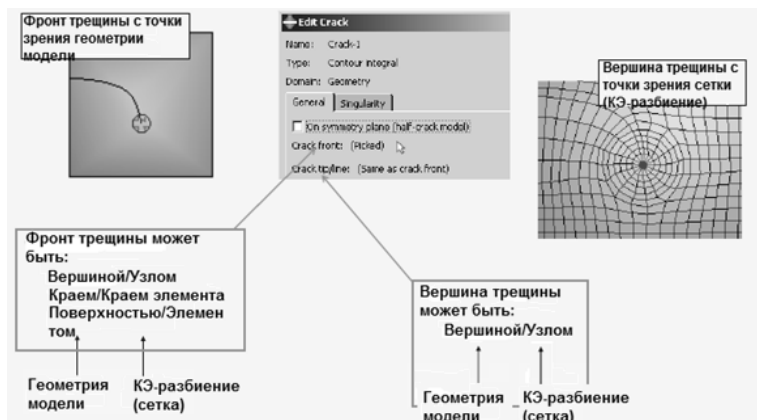


Рисунок 23 – Объяснение настроек в окне создания трещины

В случае моделирования трещины, располагающейся на симметричной поверхности, нет необходимости определять шов.

Примечание: Данная опция действует только для трещин нормального отрыва (Mode I).

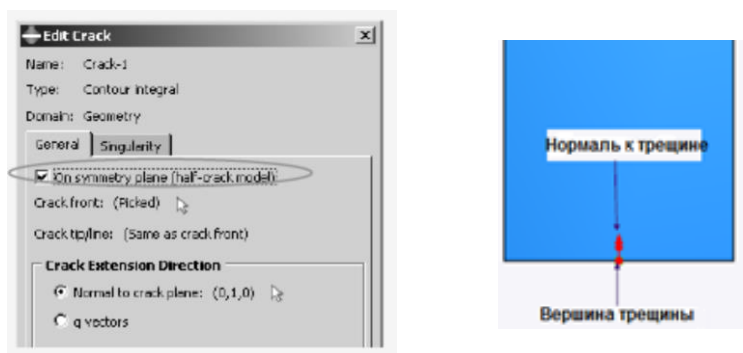


Рисунок 24 – Задание опций трещины, располагающейся на симметричной поверхности

На рис. 27 показаны варианты использования опций окна «Edit Crack» – «Singularity» при моделировании трещин.

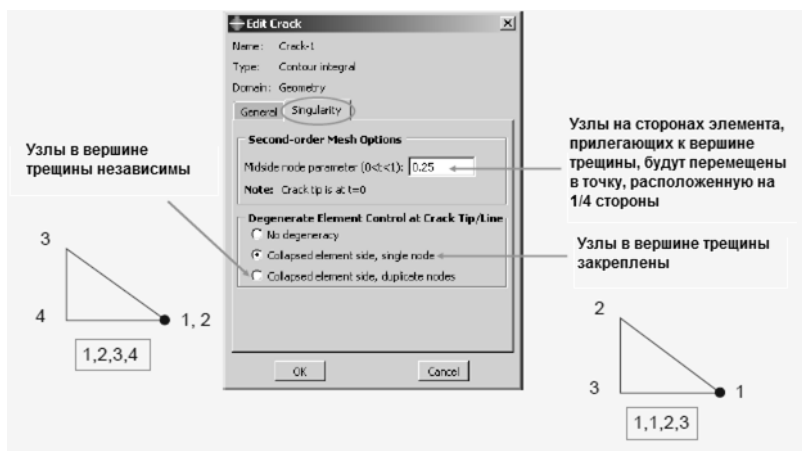


Рисунок 25 – Объяснение настроек сингулярности при создании трещины

Если сторона элемента не преобразовывается, но узлы на сторонах, прилегающих к вершине трещины, перемещаются в точки на $\frac{1}{4}$ стороны, то:

- сингулярность деформаций пропорциональна квадратному корню вдоль сторон элемента, но не внутри элемента;
- это лучше для результатов расчета, чем отсутствие сингулярности вообще, но результаты будут не такими точными, как при использовании преобразованных элементов.

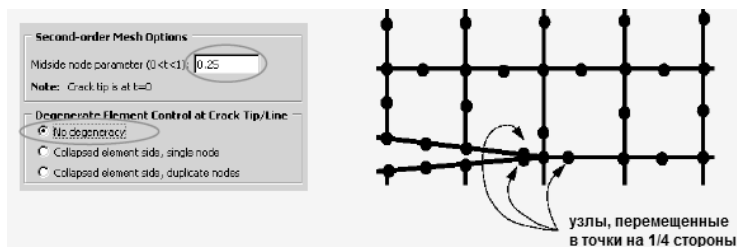


Рисунок 26 – Смещение узлов на четверть стороны элемента

2.2. Моделирование сингулярности в вершине трещины при помощи четырехугольных элементов второго порядка

Чтобы учесть сингулярность, используя 8-узловой изопараметрический элемент, необходимо:

- так преобразовать одну из сторон элемента (например, состоящую из узлов a, b, c), чтобы все три узла геометрически располагались в вершине трещины;
- передвинуть узлы с середины сторон элемента (midside nodes), прилегающих к вершине трещины, в точку, располагающуюся на $\frac{1}{4}$ стороны элемента и являющуюся ближайшей к вершине трещины.

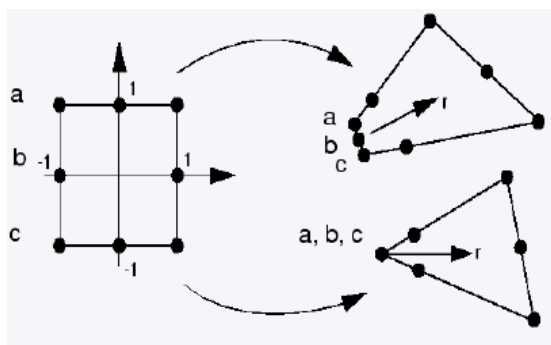


Рисунок 27 – Схема преобразования элементов

Если узлы a, b и c могут перемещаться независимо друг от друга, то $\varepsilon \rightarrow \frac{A}{r} + \frac{B}{\sqrt{r}}$ при $r \rightarrow 0$, по всему дегенерированному элементу.

Если узлы a, b и c закреплены и перемещаются вместе, $A = 0$: сингулярность напряжений и деформаций пропорциональна квадратному корню (подходит для линейной упругости).

Если узлы a, b и c могут перемещаться независимо друг от друга и узлы на сторонах (midside nodes) продолжают оставаться на серединах сторон, $B = 0$: сингулярность деформаций верна для идеально-пластического материала.

2.3. Моделирование сингулярности в вершине трещины при помощи четырехугольных элементов первого порядка

Преобразование стороны четырехугольного элемента первого порядка с независимыми узлами на этой стороне дает: $\varepsilon \rightarrow \frac{A}{r}$ при $r \rightarrow 0$.

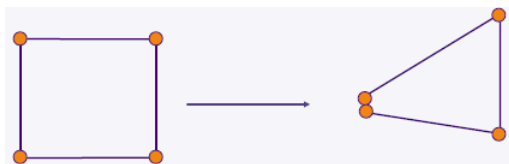


Рисунок 28 – Преобразование стороны четырехугольного элемента первого порядка

2.4. Контроль расположения узлов на сторонах элемента при КЭ-разбиении

Средства управления сингулярностью не могут применяться к конечно-элементной сетке, поэтому необходимо использовать инструменты «Edit Mesh» – «Adjust midside» для корректировки их расположения.

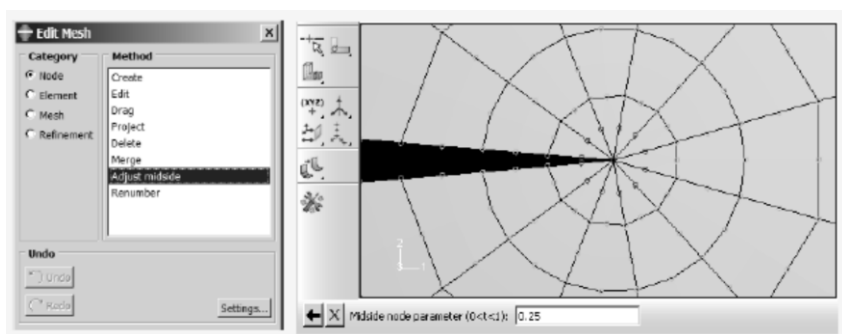


Рисунок 29 – Функция просмотра смещенных узлов в элементах

2.5. Угловое разрешение элементов у вершины трещины

Необходимо достаточное количество элементов, чтобы получить достоверные результаты для поля деформаций вокруг вершины трещины.

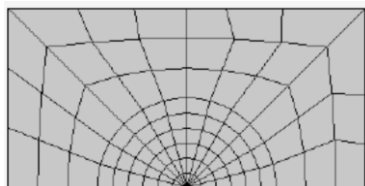


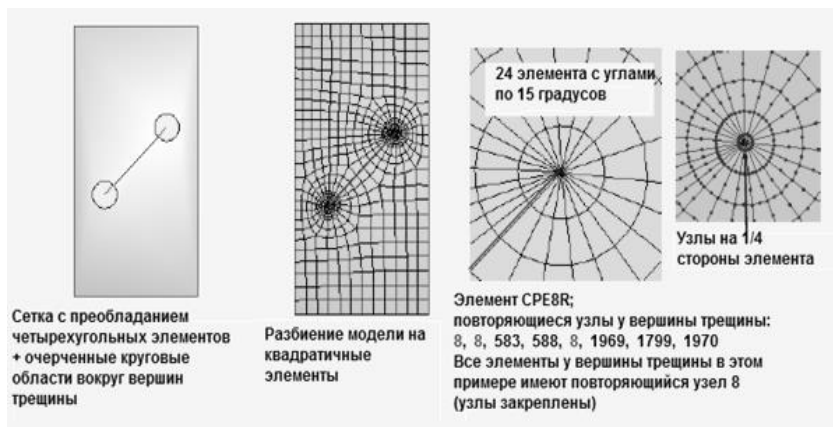
Рисунок 30 – Пример правильной сетки разбиения

Разумные результаты достигаются для линейной механики разрушения, если типовые треугольные элементы вокруг вершины трещины имеют углы от 10° до 22.5° .

Для нелинейных материалов требуются более точные сетки.

2.6. Создание преобразованных элементов

Чтобы обеспечить создание преобразованных четырехугольных элементов необходимо сначала подготовить рабочие области вокруг вершин трещины (для этого используется функция «Partition»), позволяющие создать подобное разбиение модели на конечные элементы, и задать сетку с преобладанием четырехугольных элементов.



Сетка с преобладанием четырехугольных элементов + очерченные круговые области вокруг вершин трещины

Разбиение модели на квадратичные элементы

24 элемента с углами, по 15 градусов

Узлы на 1/4 стороны элемента

Элемент CPE8R; повторяющиеся узлы у вершины трещины: 8, 8, 583, 588, 8, 1969, 1799, 1970. Все элементы у вершины трещины в этом примере имеют повторяющийся узел 8 (узлы закреплены)

Рисунок 31 – Подготовка областей вокруг вершины трещины для дальнейшего разбиения

2.7. Альтернативные варианты создания преобразованных элементов

На рис. 34 представлены элементы без преобразования:



Рисунок 32 – Элементы без преобразования

На рис. 35 представлены элементы с преобразованием с дублирующими узлами:

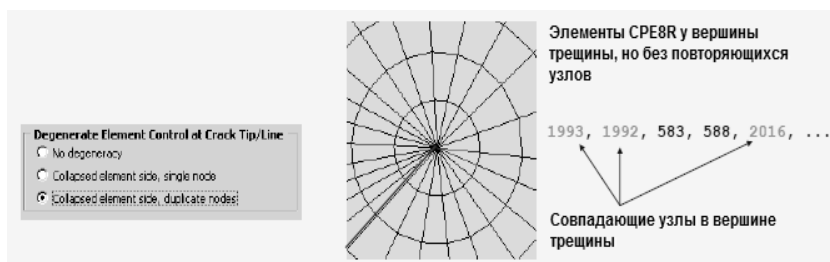


Рисунок 33 – Преобразованные элементы с дублирующими узлами

2.8. Создание сетки в задаче о наклонной трещине в пластине

1. Для того, чтобы правильно сгенерировать сетку в задаче, необходимо выполнить дополнительные геометрические построения в модели. Перейдите в модуль «Mesh» (рис. 34). В файловом меню выберите «Tools» – «Partition» (рис. 35).

2. В открывшемся окне «Create Partition» (рис. 36) выберите тип «Face», метод «Sketch», выберите в качестве поверхности эскиза пластину и нарисуйте 2 равные окружности произвольного радиуса с центрами в вершинах трещины. Вторую точку при построении окружности по двум точкам рекомендуется ставить на линии трещины, с тем, чтобы избежать сложностей при построении КЭ-сетки.

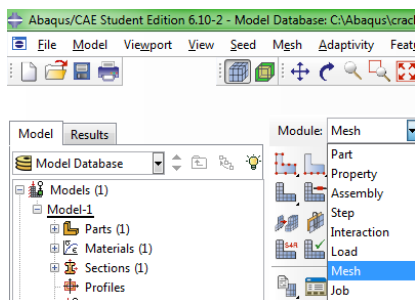


Рисунок 34 – Переход в модуль «Mesh»

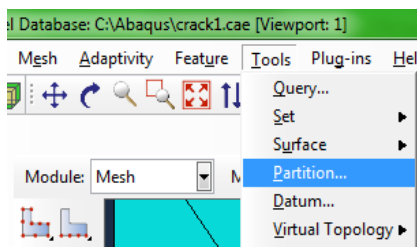


Рисунок 35 – Инструмент дополнительных разбиений модели

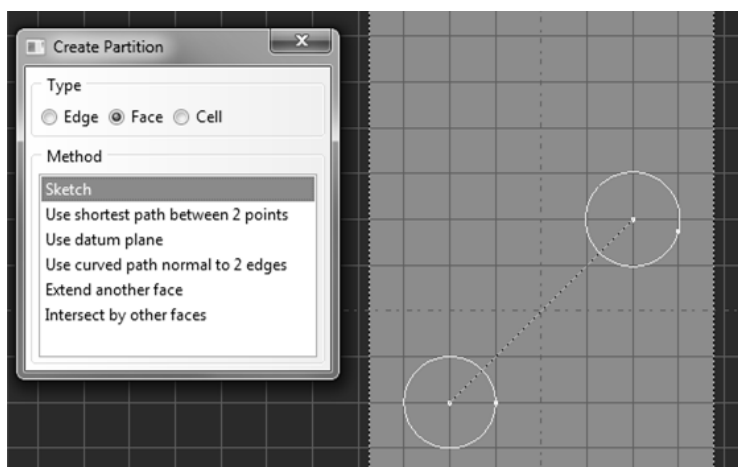


Рисунок 36 – Дополнительные построения

3. При помощи инструментов построения геометрии разбейте каждую окружность на 24 сектора по 15 градусов (рис. 37). Добавьте еще несколько концентрических окружностей (в примере добавлена одна). Когда эскиз будет завершен, нажмите кнопку «Done» (рис. 38).

Примечание: следите, чтобы при построении окружности по двум точкам вторая точка совпала с точкой пересечения окружности и луча, разбивающего окружность. В противном случае возникнут проблемы с правильным разбиением на КЭ областей около вершины трещины!

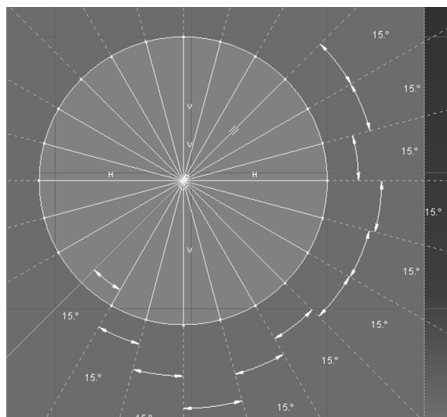


Рисунок 37 – Пример разбиения окружности на сектора по 15 градусов

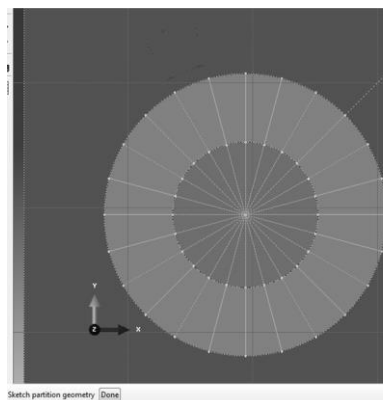


Рисунок 38 – Добавление концентрических окружностей

4. В окне просмотра выделите рамкой целиком всю модель. В файловом меню выберите «Mesh» – «Element Type» (рис. 39). В открывшемся окне «Element Type» выберите следующие значения (рис. 40):

- Element Library – «Standard»;
- Family – «Plane Strain»;
- Geometric Order – «Quadratic».

Проверьте получившийся тип элемента. Должен быть – **CPE8R**. Если все верно, нажмите «OK».

5. В окне просмотра выделите все области внутри окружностей (рис. 41) и нажмите кнопку «Assign Mesh Controls». В открывшемся окне «Mesh Controls» выберите форму элемента «Quad-dominated», технику разбиения «Sweep». Нажмите «OK».

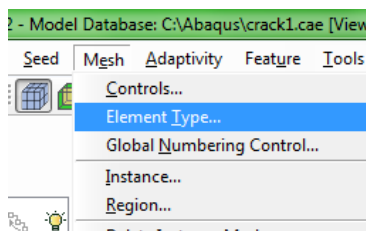


Рисунок 39 – Меню выбора типа элементов

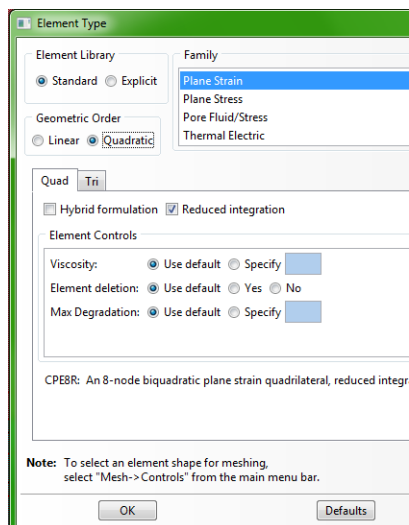


Рисунок 40 – Настройка типа элементов

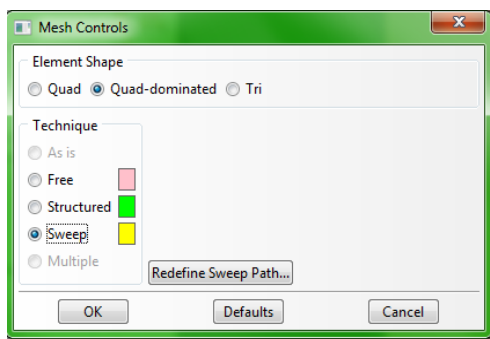


Рисунок 41 – Настройка закономерностей разбиения модели на элементы

6. После этих действий модель должна выглядеть следующим образом (рис. 42).

7. Если добавлено не очень много концентрических окружностей, как в примере, то для формирования более подробной сетки необходимо вручную указать количество элементов при помощи инструмента «Seed Edges» (рис. 43, рис. 44).

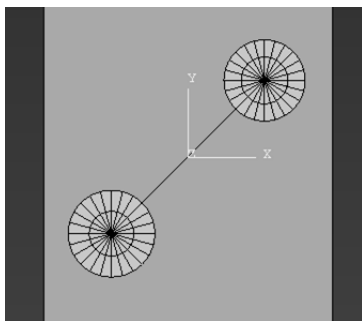


Рисунок 42 – Внешний вид модели после настройки свойств разбиения

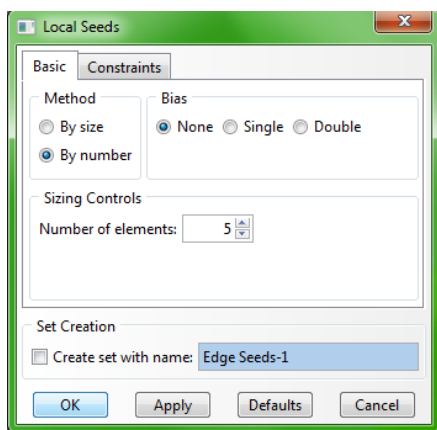


Рисунок 43 – Настройка количества элементов вдоль кривой

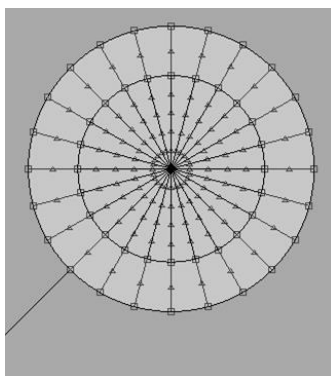


Рисунок 44 – Предпросмотр размера и количества элементов

8. Воспользовавшись тем же инструментом, укажите количество элементов на границах пластины: выберите метод «By size», задайте значение «Approximate element size» (рис. 45).

9. Разбейте пластину на элементы, используя команду «Mesh Part Instance» (рис. 46). Примерный вид получившейся сетки приведен на рис. 47.

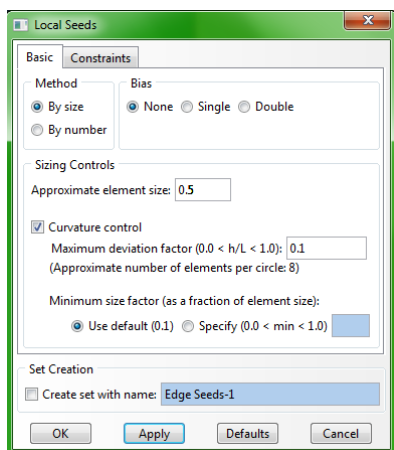


Рисунок 45 – Окно задания количества элементов

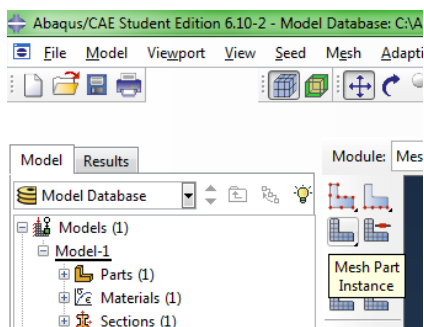


Рисунок 46 – Расположение кнопки «Mesh Part Instance»

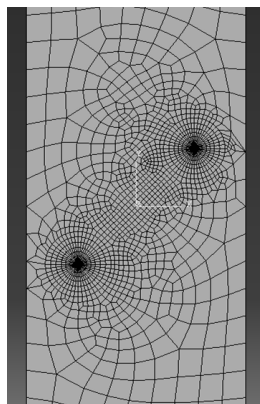


Рисунок 47 – Примерный вид сетки КЭ

10. Для того, чтобы проверить, применились ли настройки по смещению узлов у деградированных элементов у вершины трещины, воспользуйтесь командой файлового меню «Mesh» – «Edit».

11. В открывшемся окне «Edit Mesh» выберите категорию «Node», метод «Edit», узлы подсветятся зеленым цветом и можно увидеть, что в элементах, прилегающих к вершине трещины, узел смещен на $\frac{1}{4}$ стороны элемента (рис. 49).

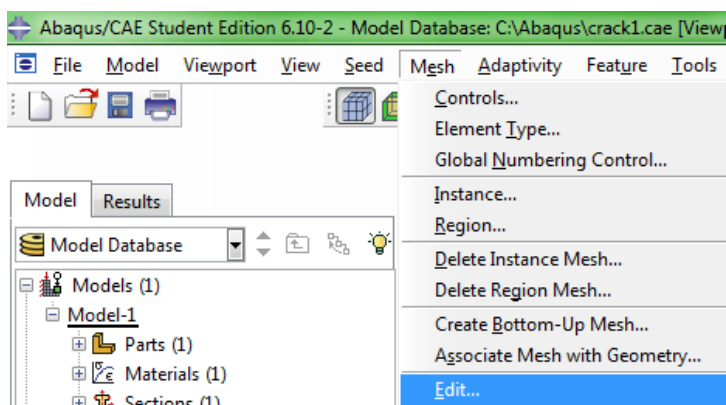


Рисунок 48 – Расположение команды редактирования сетки

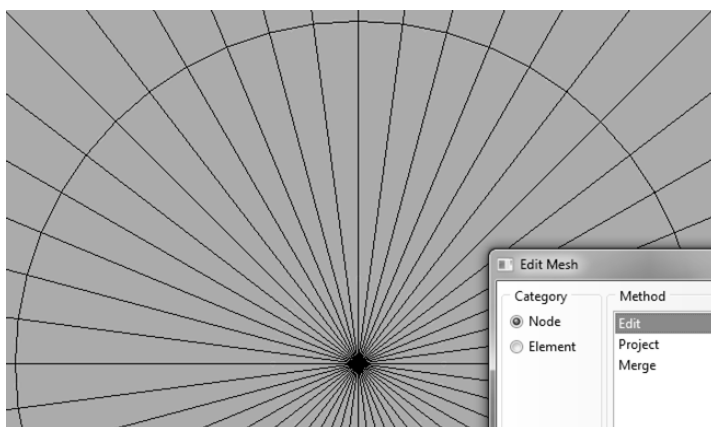


Рисунок 49 – Просмотр смещенных узлов

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНТУРНОГО ИНТЕГРАЛА

Abaqus предлагает два различных способа вычисления контурного интеграла.

Первый основан на стандартном методе конечного элемента (его и будем рассматривать в данном учебно-методическом пособии). Данный метод требует от пользователя соответствия сетки и геометрии трещины, указания фронта трещины и задания направления продвижения виртуальной трещины.

Второй метод основан на расширенном методе конечного элемента (XFEM). Этот метод не требует соответствия сетки геометрии. Но вычисление контурного интеграла возможно только для тетраэдральных элементов (tetrahedron) первого и второго порядка и элементов-кирпичиков (brick) 2 порядка.

Abaqus также позволяет вычислять некоторые другие важные параметры механики разрушения:

- интенсивность напряжений K_I, K_{II}, K_{III} , которые используются, главным образом, в линейно-упругой механике разрушения для вычисления прочности конструкции в области кончика трещины;
- Т-напряжения в линейно-упругих вычислениях;
- направление распространения трещины: угол, под которым ранее существовавшая трещина будет двигаться;
- C_t -интеграл, который используется при ползучести, зависящей от времени.

Вышеуказанные результаты могут выводиться и записываться в файл выходной базы данных (формат *.odb), файл данных (формат *.dat), или файл результатов (формат *.fil).

Из соображений точности контурный J -интеграл вычисляется с использованием интегрирования по области. Интеграл вычисляется по площади/объему внутри контура, окружающего кончик трещины (рис. 50). В 2D, Abaqus определяет эту область с точки зрения

колец элементов, окружающих кончик трещины. В 3D, Abaqus определяет поверхность в форме трубы вокруг линии фронта трещины (рис. 51).

Различные контуры создаются в Abaqus автоматически. Первый контур состоит из фронта трещины и одного слоя элементов его окружающего. Кольцо элементов от одного края трещины до другого (либо до поверхности симметрии).

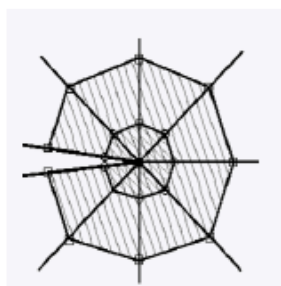


Рисунок 50 – Определение области в 2D

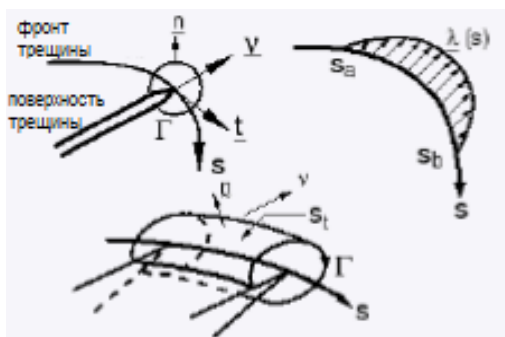


Рисунок 51 – Определение области в 3D

Следующий контур состоит из кольца элементов, соприкасающихся с первым контуром. Каждый последующий контур определяется добавлением следующего кольца элементов, соприкасающихся с предыдущим контуром.

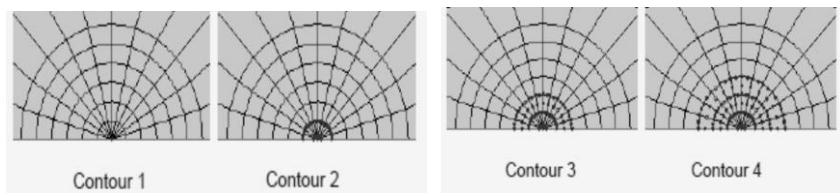


Рисунок 52 – Пример подсчета контуров

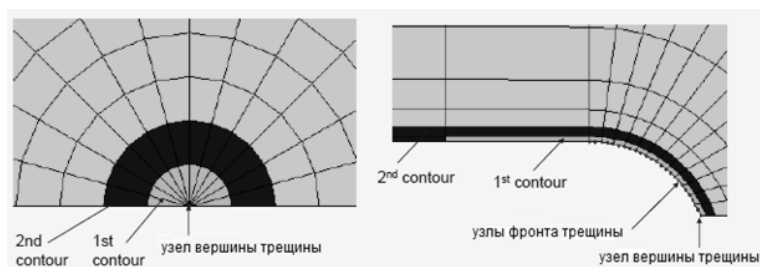


Рисунок 53 – Примеры форм контуров

J -интеграл и C_t -интеграл при установившейся ползучести должны быть независимыми от пути интегрирования. Значение для первого контура обычно отбрасывается. Примеры форм контуров представлены на рис. 53.

Контурные интегралы в Abaqus могут быть вычислены не для всех типов нагрузок. Типы нагрузок, для которых J -интеграл вычисляется:

- температурные нагрузки;
- распределенная нагрузка (давление) и тяговая нагрузка для сплошных (continuum) элементов и оболочек (shell);
- однородные и неоднородные массовые силы;
- центробежные нагрузки для сплошных (continuum) элементов и оболочек (shell).

Типы нагрузок, для которых J -интеграл не вычисляется:

- гидростатическое давление;
- сосредоточенные нагрузки;
- контактные взаимодействия;
- гравитационные нагрузки и т.д.

При наличии в модели таких нагрузок Abaqus выдает предупреждающее сообщение.

Примечание: если все-таки необходимо задать сосредоточенную нагрузку – измените разбиение на элементы таким образом, чтобы создать очень маленький (относительно всей модели) элемент и приложите к нему распределенную нагрузку.

Количество контуров пользователь задает вручную в модуле «History Output Requests» (рис. 54).

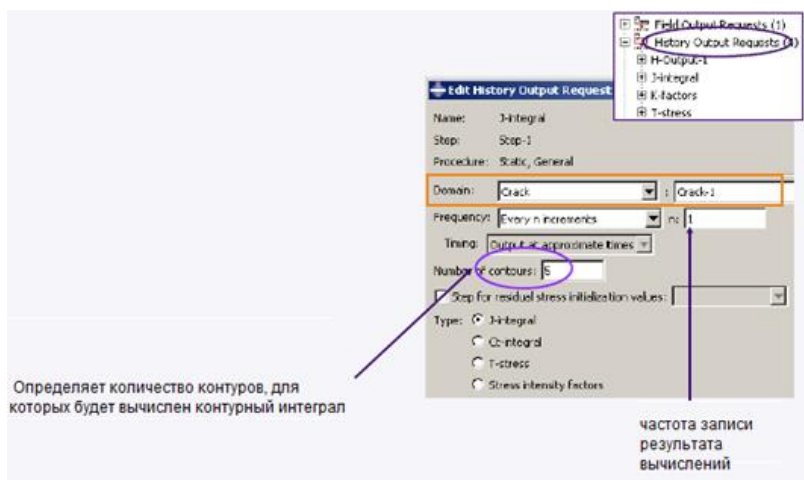


Рисунок 54 – Пример задания количества контуров

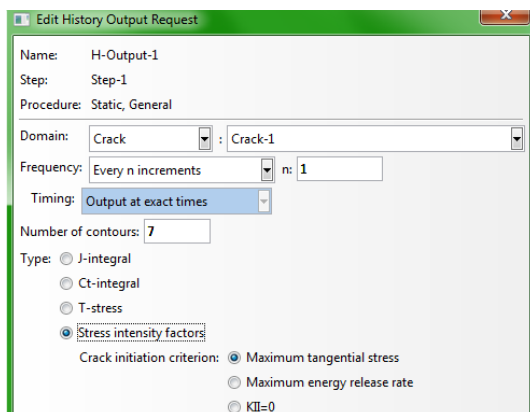


Рисунок 55 – Задание критериев

При вычислении коэффициентов интенсивности напряжений пользователь может выбрать критерий, который будет использоваться для определения страгивания трещины и определения

направления распространения трещины в гомогенных, изотропных или линейно-упругих материалах (рис. 55):

- максимальные тангенциальные напряжения (MTS);
- максимальная скорость высвобождения энергии (MERR);
- $K_{II} = 0$.

3.1. Задание параметров для вычисления контурного интеграла в задаче о наклонной трещине в пластине

Параметры для вычисления контурного интеграла задаются в разделе «History Output Requests». Чтобы перейти к их редактированию, сначала нужно создать шаг расчета в модуле «Step».

1. Двойным щелчком кнопки мыши на пункт «Step» откройте окно «Create Step» и выберите нужный тип расчета. В нашем случае это «Static, General». И нажмите кнопку «Continue». В открывшемся окне «Edit Step» отредактируйте, при необходимости, параметры шага расчета и нажмите кнопку «ОК».

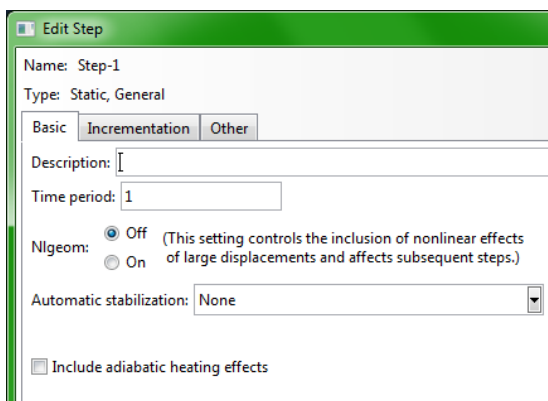


Рисунок 56 – Задание свойств шага расчета

2. Раскройте в дереве пункт «History Output Requests». Нажмите правой кнопкой мыши на вычисляемые на этом шаге параметры (H-Output-1) и откройте на редактирование, нажав «Edit» (рис. 57).

3. В открывшемся окне «Edit History Output Request» выберите область, для которой будут вычисляться параметры: «Domain» – «Crack» (рис. 58) – «Crack-1» (или другую потребную вершину трещины, если их несколько) (рис. 59).

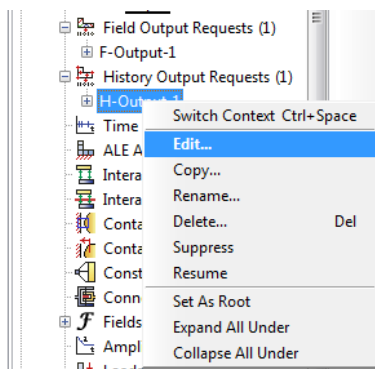


Рисунок 57 – Редактирование параметров

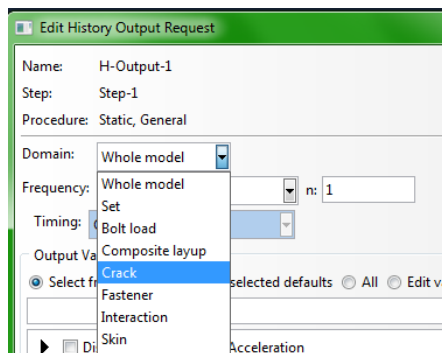


Рисунок 58 – Задание параметров расчета для вычисления контурного интеграла

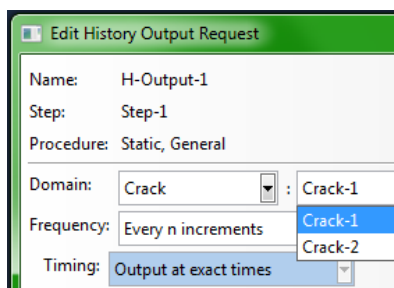


Рисунок 59 – Выбор трещины

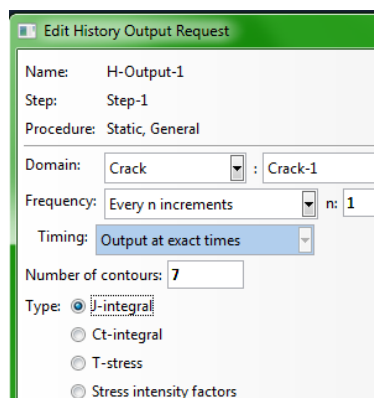


Рисунок 60 – Задание количества контуров

4. Задайте нужное количество контуров для вычисления контурного интеграла (рис. 60). В данной задаче – 7 (рис. 61).

5. Тип выберите «J-интеграл» и нажмите кнопку «ОК».

Задайте закрепления, нагрузки и выполните расчет модели. Вычисленные значения контурных интегралов можно посмотреть в файле данных (формат *.dat).

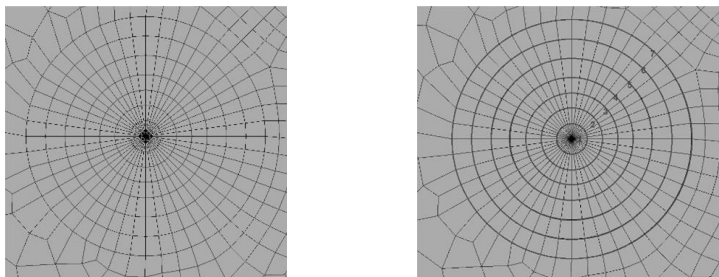


Рисунок 61 – Визуализация заданных контуров

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИН С ОСТРЫМ КОНЦОМ В 3D

В трехмерных задачах трещина в виде шва моделируется как отделение поверхности, которое частично или полностью встроено в твердое тело.

Поверхность вдоль шва будет иметь дублирующие узлы с тем, чтобы элементы на противоположных сторонах поверхности не имели общих узлов.

Вдоль фронта трещины должны быть созданы клиновидные конечные элементы.

4.1. Опции для задания фронта трещины и линии трещины

В трехмерных задачах можно задавать нормаль к поверхности трещины (в случае если трещина плоская) или предположительное направление распространения трещины (q вектор). Для геометрических случаев может задаваться только один q вектор.

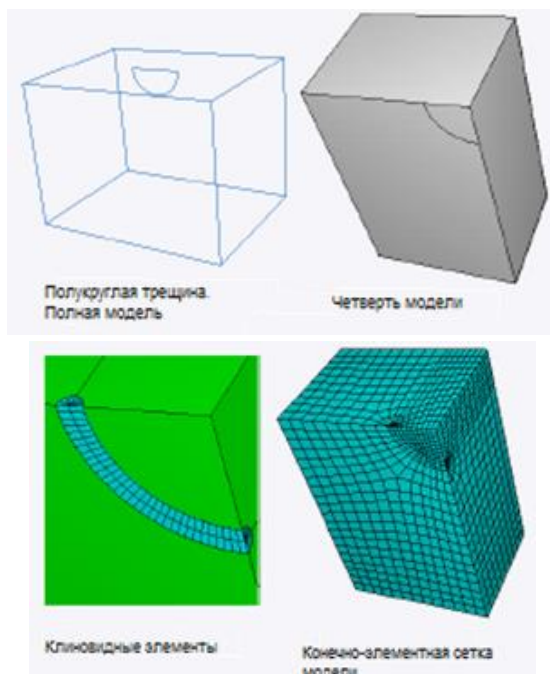


Рисунок 62 – Преставление моделирования трещины в 3D

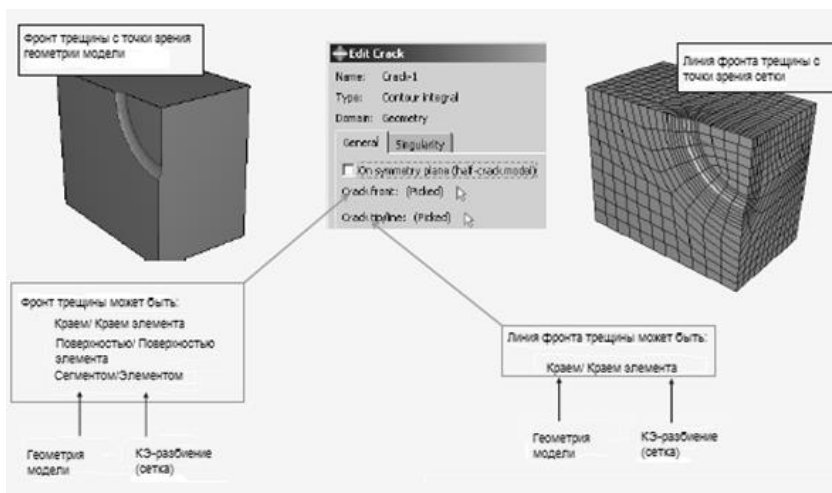


Рисунок 63 – Объяснение настроек в меню редактирования трещины

4.2. Моделирование сингулярности у кончика трещины в 3D

20-узловые и 27-узловые четырехугольные элементы с одной дегенерированной поверхностью могут использоваться для моделирования сингулярных полей (рис. 65).

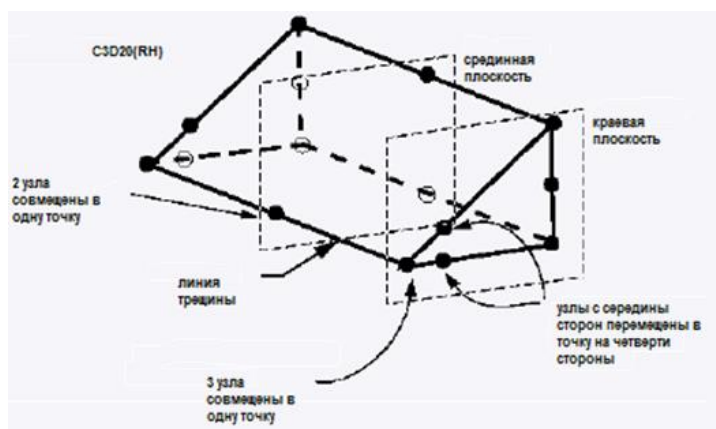


Рисунок 64 – Четырехугольный элемент с дегенерированной поверхностью

На рис. 66 показаны элементы в краевой плоскости.

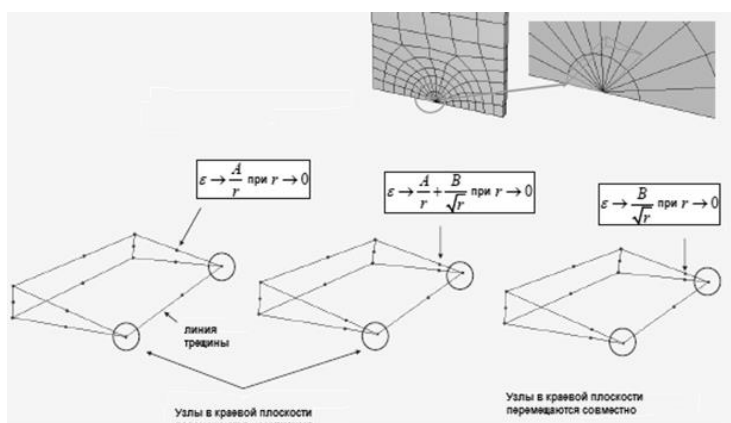


Рисунок 65 – Элементы в краевой плоскости

В срединной плоскости для 20-узловых четырехугольных элементов: если 2 узла на дегенерированной поверхности элемента в срединной плоскости могут перемещаться независимо друг от друга, $\varepsilon \propto r^{-1}$ в срединной плоскости.

Если на каждой поверхности только один узел вдоль линии трещины (рис. 67), сингулярности внутри элемента не будет. В каждом случае интерполяция в срединной плоскости и в концевой плоскости неодинакова. Это, в основном, является причиной локальных колебаний значений J -интеграла вдоль линии трещины.



Рисунок 66 – Элемент с одним узлом вдоль линии трещины

На рис. 68 показан 27-узловой четырехугольный элемент со всеми дополнительными узлами на поверхностях элемента в срединной плоскости.

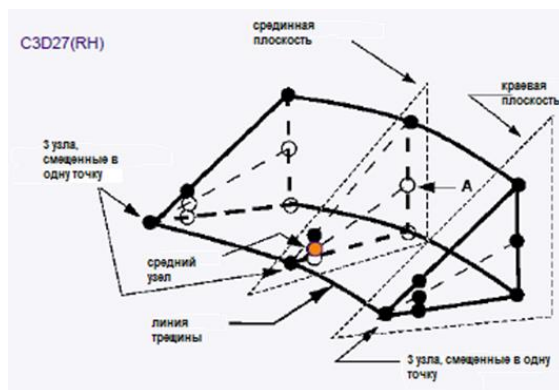


Рисунок 67 – Элемент с дополнительными узлами вдоль линии трещины

4.3. Задача о конической трещине в бесконечной полуплоскости

Рассмотрим задачу о конической трещине в бесконечной полуплоскости (рис. 69).

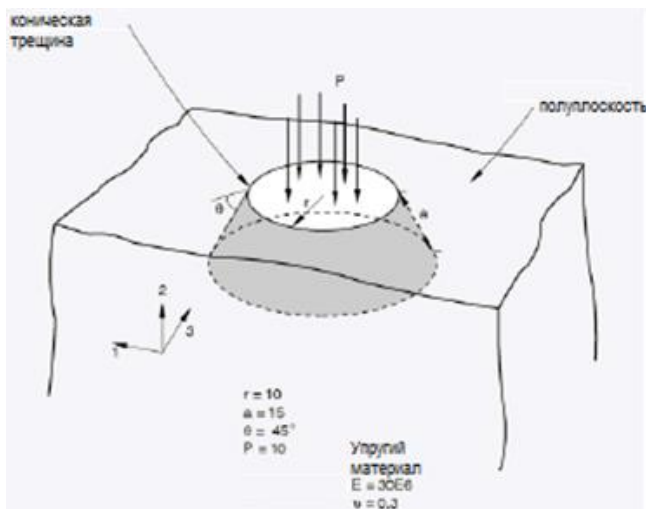


Рисунок 68 – Условие задачи

1. Моделировать достаточно $\frac{1}{4}$ часть полуплоскости, из-за симметрии задачи (в нашем случае получится куб).

2. Создайте 3D часть, деформируемую, твердую, способ моделирования «Extrusion» (рис. 69). Размер куба – 300 x 300 x 300, соответственно размер сетки для удобства задайте «300». Нажмите кнопку «Continue».

3. Нарисуйте эскиз, используя инструменты построения геометрии.

4. Создайте 3D модель поверхности трещины. Деформируемую оболочку, способ моделирования «Revolution» (рис. 70). Размер сетки для удобства соотносите с размером сетки, заданным при создании полуплоскости, так как далее будет необходимо объединить модели.

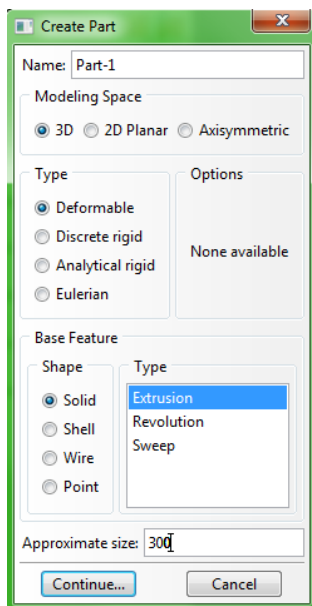


Рисунок 69 – Параметры построения полуплоскости

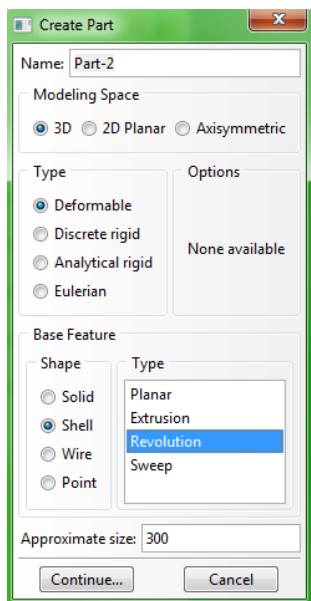


Рисунок 70 – Параметры построения трещины

5. Нарисуйте эскиз поверхности вращения, в нашей задаче представляющей трещину, используя инструменты построения геометрии (рис. 71). Нажмите «Done».

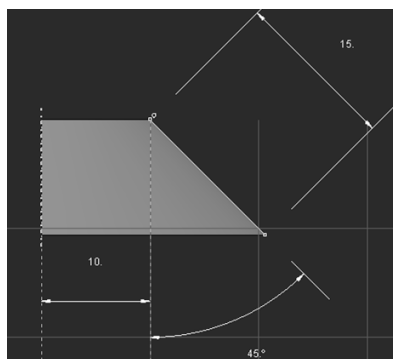


Рисунок 71 – Эскиз для создания трещины

6. В открывшемся окне «Edit Revolution» задайте угол вращения эскиза, нажмите кнопку «ОК» (рис. 72). Получившаяся модель представлена на рис. 73.

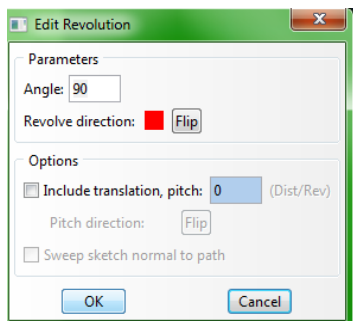


Рисунок 72 – Задание угла вращения эскиза

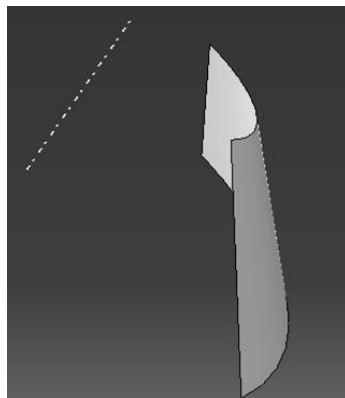


Рисунок 73 – Модель трещины

7. Создайте упругий материал («Elasticity» – «Elastic») для модели полуплоскости со свойствами: модуль Юнга – 30е6, коэффициент Пуассона – 0,3.

8. Создайте сечение модели (рис. 74). Присвойте сечение модели полуплоскости (рис. 75).

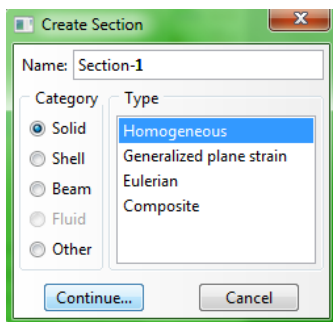


Рисунок 74 – Создание сечения

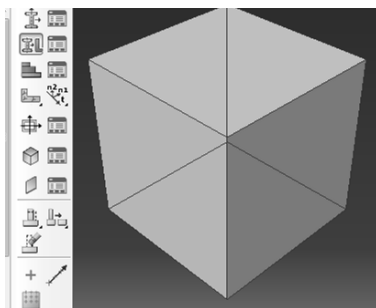


Рисунок 75 – Присвоение сечения геометрии модели

9. Перейдите в модуль «Assembly», нажмите кнопку «Create Instance» и в открывшемся окне выделите обе модели: полуплоскость и трещину, выберите тип «Independent» и нажмите «OK» (рис. 76).

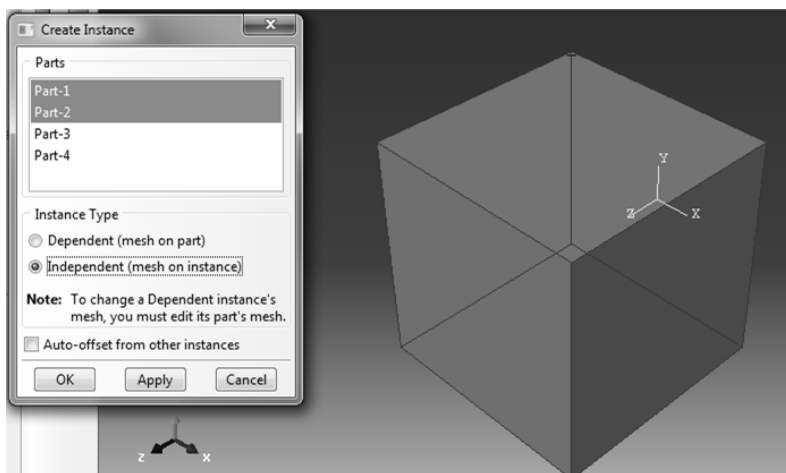


Рисунок 76 – Создание сборки

10. При помощи инструментов перемещения совместите модели трещины и полуплоскости, как показано на рис. 77.

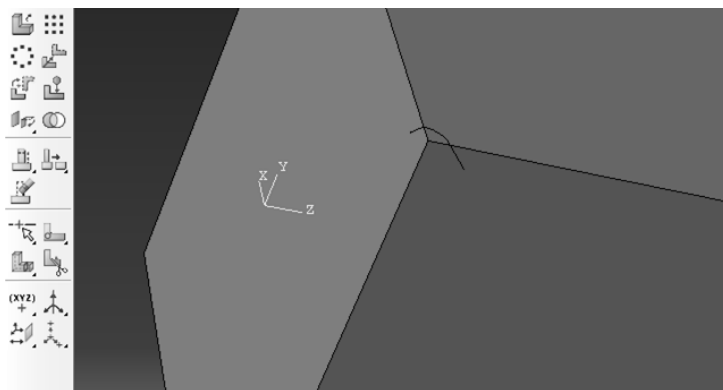


Рисунок 77 – Правильное расположение трещины в полуплоскости

11. Выберите инструмент «Merge/Cut Instances» (рис. 78), в открывшемся окне выберите в разделе «Operations»: «Merge» – «Geometry», в разделе «Options» – «Original Instances»: «Suppress»; «Options» – «Intersecting Boundaries»: «Retain». Нажмите кнопку «Continue».

12. В окне графического представления выделите обе модели и нажмите кнопку «Done» (рис. 80).

13. В дереве модели в модуле «Assembly» – «Instances» появится новая объединенная модель, а две другие аннулируются (рис. 81).

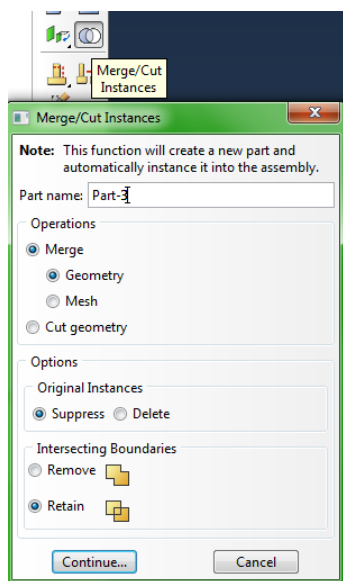


Рисунок 78 – Инструмент объединения моделей

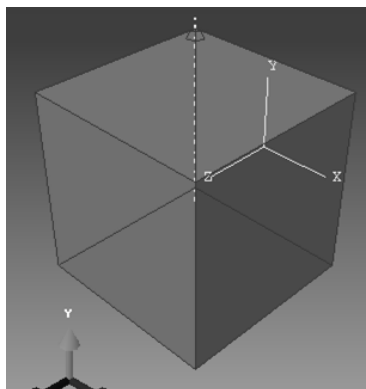


Рисунок 79 – Выбор объединяемой геометрии

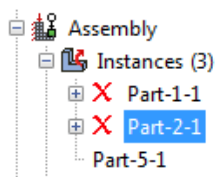


Рисунок 80 – Объединенная модель и аннулированные

14. Перейдите в модуль «Interaction» (рис. 81).
15. В файловом меню выберите «Special» – «Crack» – «Assign Seam» (рис. 82).

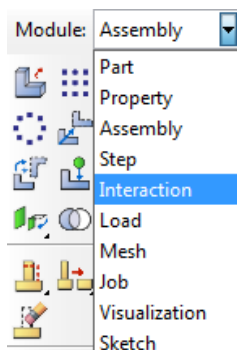


Рисунок 81 –
Переход в модуль
«Взаимодействия»

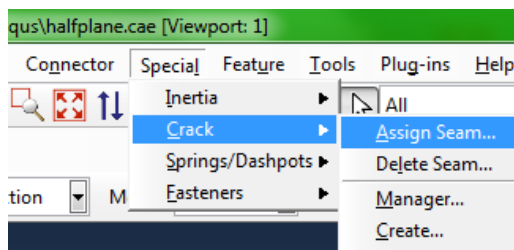


Рисунок 82 – Создание трещины типа «шов»

16. Выделите трещину в окне просмотра и нажмите «Done».
17. В случае появления ошибки (рис. 83) в разделе «Assembly» – «Instances» щелчком правой кнопки мыши по новой модели вызовите контекстное меню и выберите пункт «Make Independent» (рис. 84).

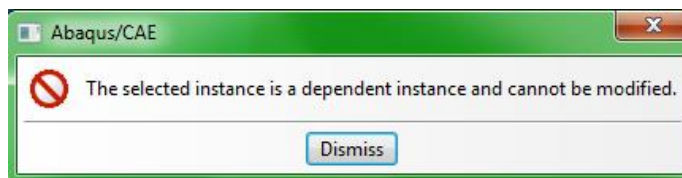


Рисунок 83 – Возможная ошибка

18. Повторите действия пунктов 16–17.
19. Для удобства дальнейшей работы с моделью переключите режим отображения на «Render Model Wireframe» (рис. 85).

20. В модуле «Assembly» – «Engineering Features» создайте трещину, нажав на «Cracks». В открывшемся окне «Create Crack» выберите тип трещины «Contour integral» и нажмите кнопку «Continue» (рис. 86).

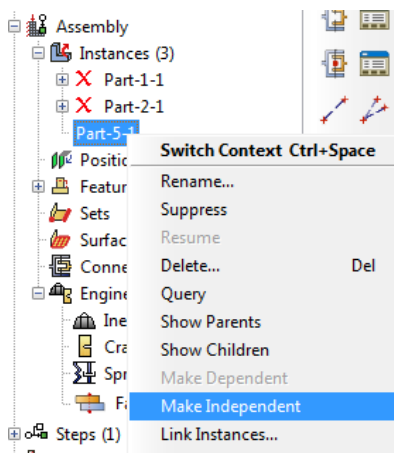


Рисунок 84 – Задание независимых свойств моделям

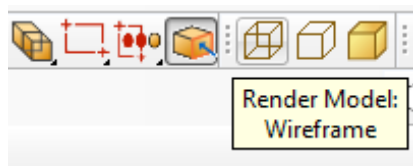


Рисунок 85 – Изменение вида

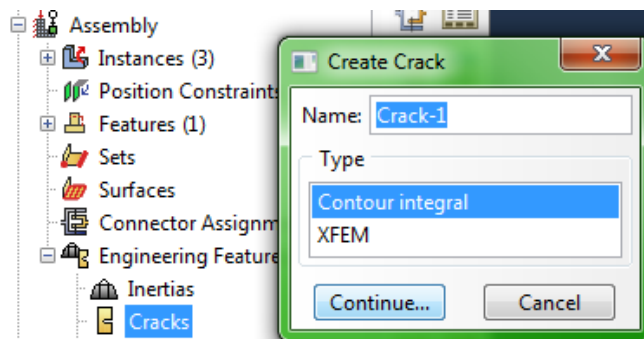


Рисунок 86 – Выбор типа создаваемой трещины

21. Укажите фронт трещины (рис. 87) и нажмите «Done».

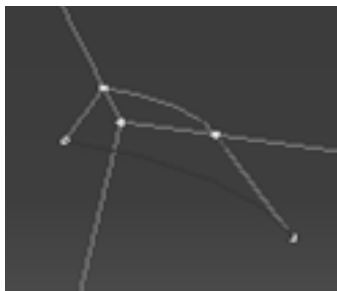


Рисунок 87 – Указание фронта трещины (темная линия)

22. Выберите, при помощи какого метода будете указывать направление распространения трещины: через нормаль к поверхности трещины, либо через q вектор. Для примера приведем указание направления через q вектор. Нажмите на текущей панели кнопку « q vectors» (рис. 88).

23. Укажите координаты начальной точки q вектора (рис. 89), нажмите клавишу «Enter».

24. Укажите координаты конечной точки q вектора (рис. 90), нажмите клавишу «Enter».

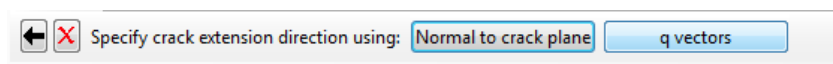


Рисунок 88 – Выбор инструмента определения направления трещины

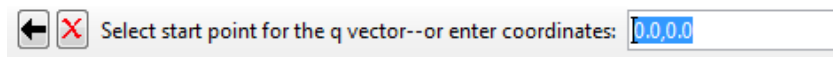


Рисунок 89 – Ввод начальной точки q вектора

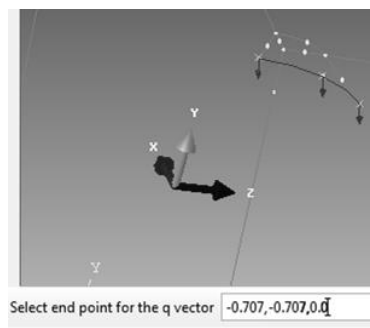


Рисунок 90 – Ввод конечной точки q вектора

Примечание: будьте внимательны с координатами конечной точки q вектора! Проверяйте направление получившегося вектора!

25. В открывшемся окне «Edit Crack» перейдите на вкладку «Singularity» и установите значение «Midside node parameter» – 0.27; и «Degenerate Element Control at Crack Tip/Line» – «Collapsed element side, single node». Нажмите кнопку «OK» (рис. 91).

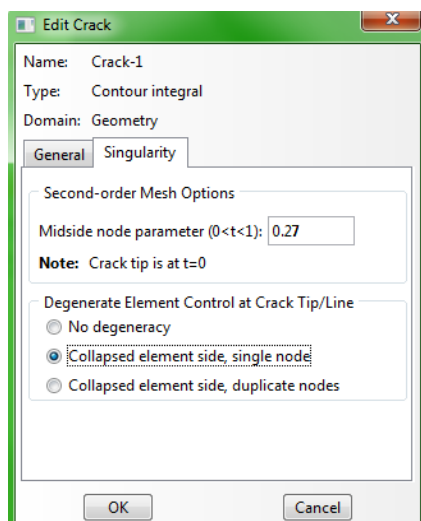


Рисунок 91 – Задание свойств трещины

Примечание: в связи с особенностями программы правильное направление q вектора только в левом конце фронта трещины (рис. 92). Поэтому, для задания правильного вектора во всех точках фронта трещины, можно или разбить модель на элементы, и после этого присвоить каждому узлу элемента на фронте трещины свой вектор, либо разработать файл исходных данных для Abaqus.

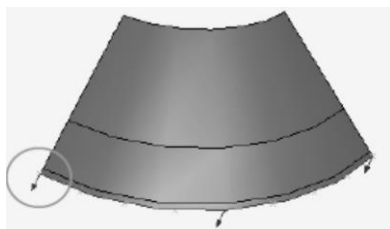


Рисунок 92 – Направление q вектора

26. Для того, чтобы правильно сгенерировать сетку в задаче, необходимо выполнить дополнительные геометрические построения в модели. Перейдите в модуль «Mesh» (рис. 93). В файловом меню выберите «Tools» – «Partition» (рис. 94).

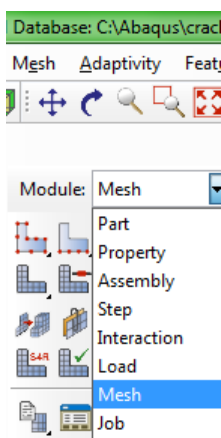


Рисунок 93 – Переход в модуль разбиения модели

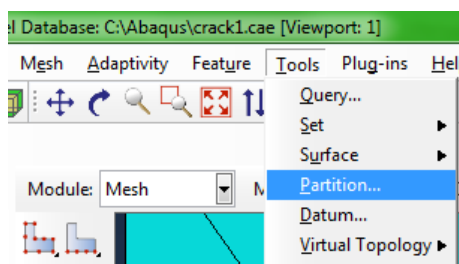


Рисунок 94 – Выбор инструмента «Partition»

27. В открывшемся окне «Create Partition» (рис. 95) выберите тип «Face», метод «Sketch», выбирайте в качестве поверхности эскиза грани куба и создайте дополнительное разбиение, как показано на рис. 96.

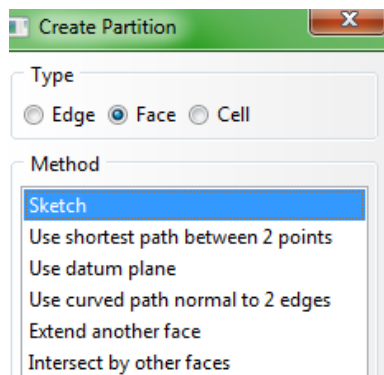


Рисунок 95 – Выбор типа и метода разбиения

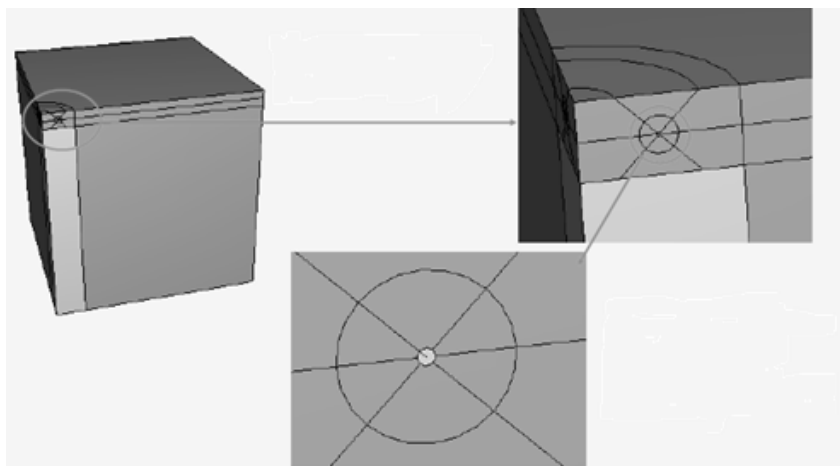


Рисунок 96 – Пример, как должно выглядеть дополнительное разбиение

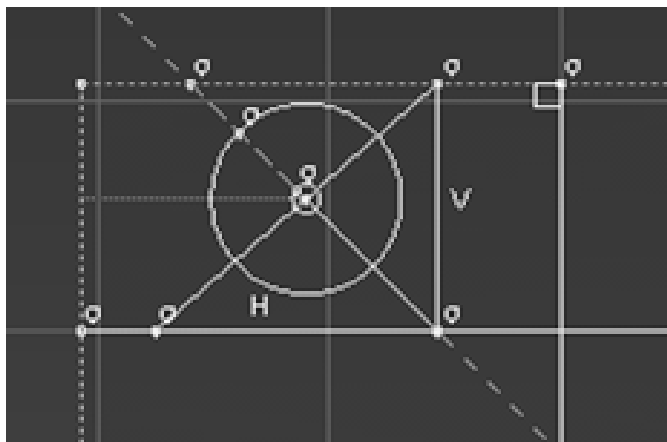


Рисунок 97 – Эскиз дополнительного разбиения

28. При помощи инструмента «Partition Cell: Extrude/Sweep Edges» (рис. 98) создайте разбиение.

29. Выделите все дополнительные построения модели, нажмите «Done» (рис. 99).

30. Выделите дополнительное построение, которое нужно протянуть (в данном случае окружность подсвечена фиолетовым) (рис. 100). Нажмите «Done».

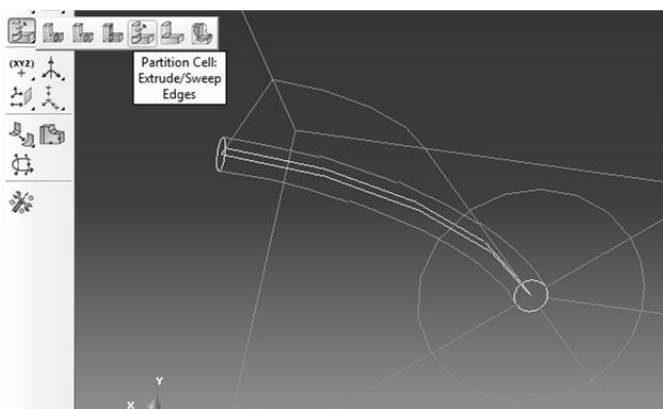


Рисунок 98 – Использование инструмента протягивания

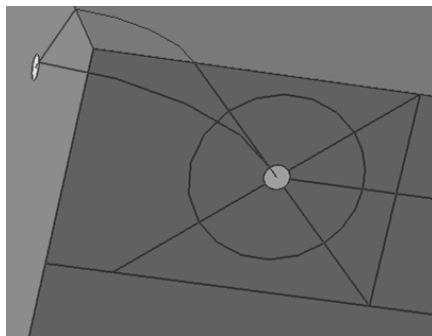


Рисунок 99 – Выделение всех дополнительных построений модели

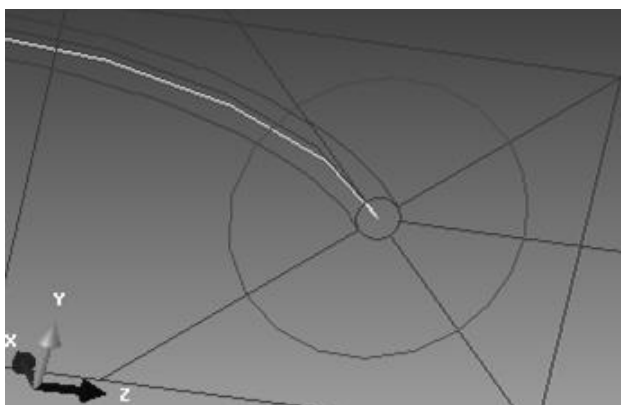


Рисунок 100 – Выделение окружности, которую нужно протянуть

31. Выберите способ протягивания «Sweep Along Edge» (рис. 101).

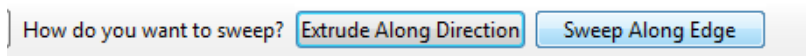


Рисунок 101 – Выбор способа протягивания геометрии

32. Укажите линию, вдоль которой будет осуществляться протягивание (в данной задаче это фронт трещины), и проверьте направление движения (рис. 102). Нажмите «Create Partition».

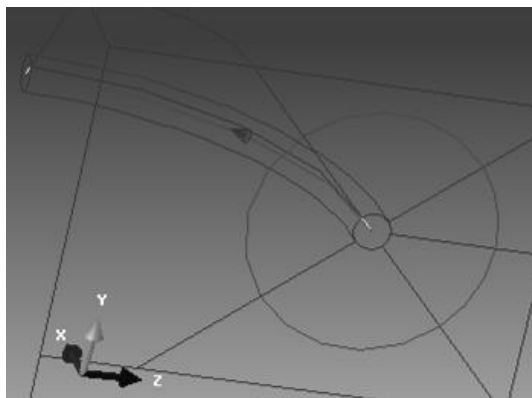


Рисунок 102 – Направление протягивания геометрии

33. Результат процедуры представлен на рис. 103.

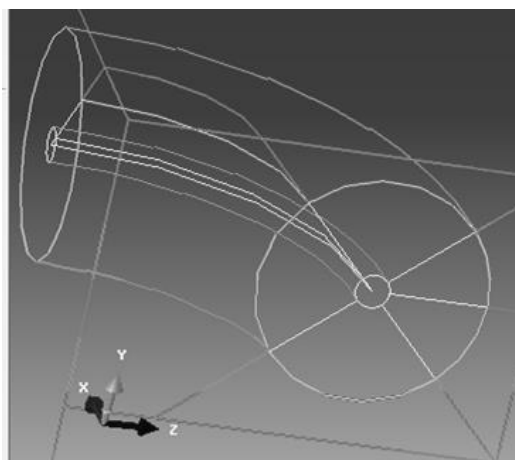


Рисунок 103 – Результат процедуры протягивания

34. Для разделения модели на части вдоль ровной линии в п. 31 выберите кнопку «Extrude Along Direction» (рис. 104). Для примера, на рис. 105 в окне просмотра линия, по которой будет разделена модель, подсвечена фиолетовым.

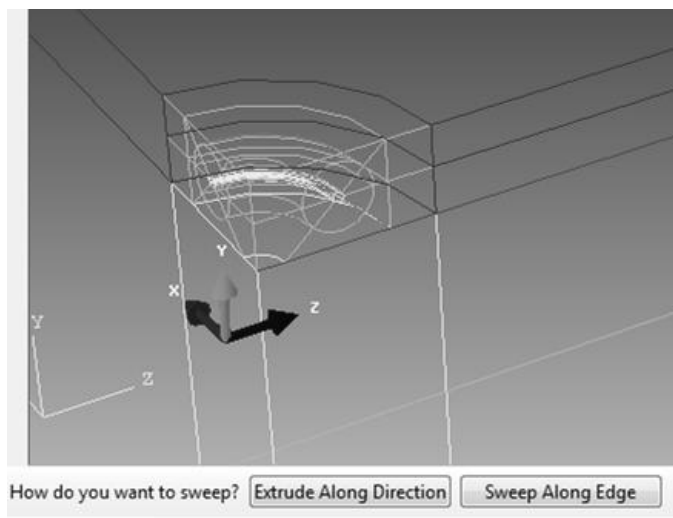


Рисунок 104 – Пример использования инструмента
«Extrude Along Direction»

35. Укажите линию или нормаль, вдоль которой будет выполнено разделение, проверьте направление выдавливания, нажмите «OK» (рис. 105) и «Create Partition» (рис. 106).

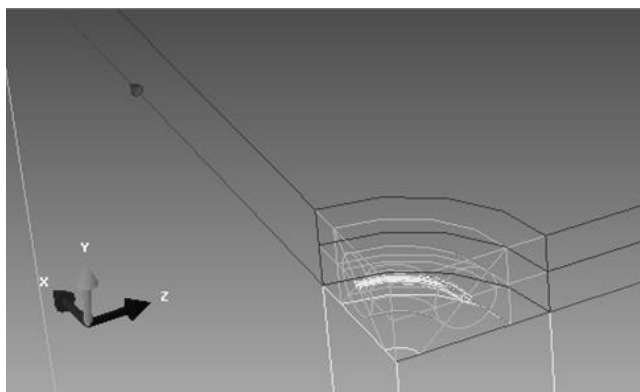


Рисунок 105 – Направление применения инструмента

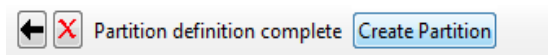


Рисунок 106 – Подтверждение готовности эскиза

36. Итоговый результат работы с инструментом «Partition» должен соответствовать представленному на рис. 107.

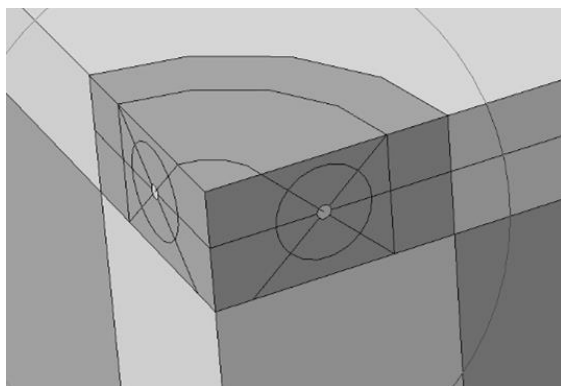


Рисунок 107 – Итоговый результат дополнительных разбиений модели

37. В файловом меню выберите «Mesh» – «Controls» (рис. 109). В области просмотра укажите трубу, содержащую фронт трещины, и нажмите «Done» (рис. 112). В открывшемся окне «Mesh Controls» выберите форму элемента «Wedge», технику разбиения «Sweep» и нажмите «OK» (рис. 111).

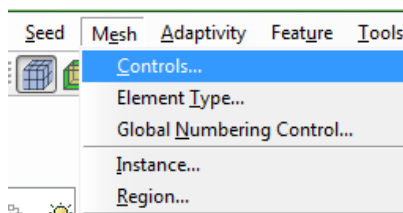


Рисунок 108 – Выбор пункта меню

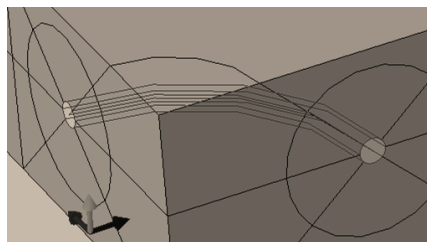


Рисунок 109 – Выбор геометрии

38. Для всех частей модели, выделенных зеленым, присвойте форму элемента «Гекс», технику разбиения «Structured» (рис. 111).

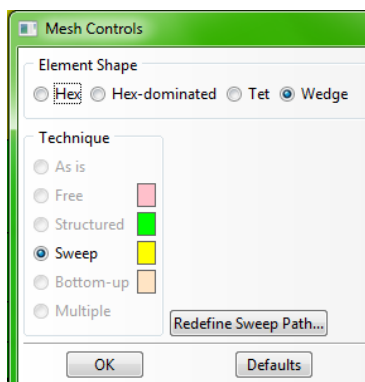


Рисунок 110 – Настройка параметров разбиения модели

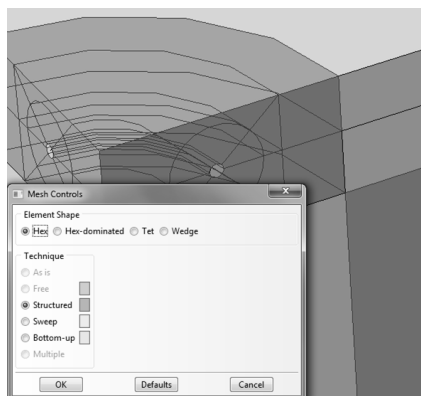


Рисунок 111 – Области, которым нужно присвоить параметры разбиения

39. Для всех частей модели, выделенных желтым (кроме трубки у фронта трещины), присвойте форму элемента «Гекс», технику разбиения «Sweep» (рис. 112).

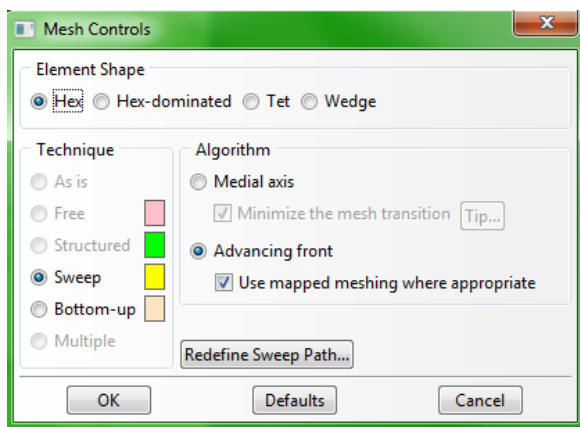


Рисунок 112 – Окно настроек разбиения модели

40. При помощи инструмента «Seed Edges» разбейте радиусы большой окружности (рис. 113) на 5–10 элементов. Для этого в окне «Local Seeds» укажите метод разбиения «By number», в строке «Number of elements» число элементов, и нажмите кнопку «OK» (рис. 114).

41. При помощи инструмента «Mesh Part Instance» (рис. 115) разбейте модель на элементы.

42. В итоге должно получиться разбиение, похожее на рис. 116. При необходимости повторите разбиение модели, для получения нужного результата.

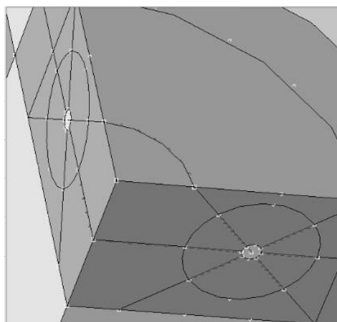


Рисунок 113 – Пример разбиения геометрии на элементы

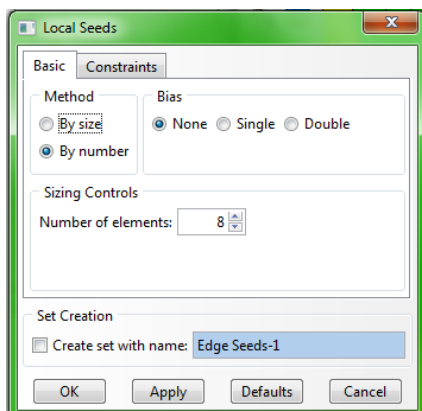


Рисунок 114 – Окно настройки количества элементов вдоль кривых

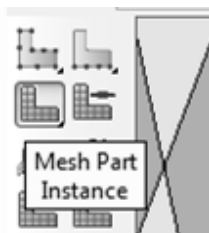


Рисунок 115 – Выбор инструмента разбиения модели

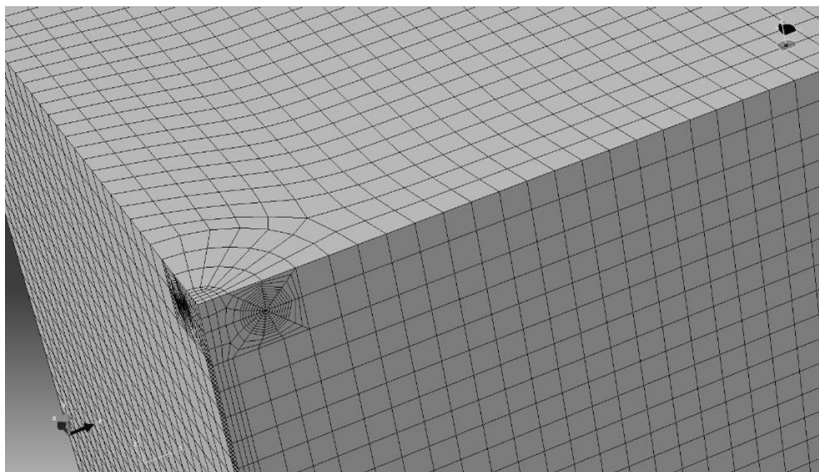


Рисунок 116 – Примерный вид разбиения модели

43. После всех разбиений свойства трещины остаются неизменными (рис. 117).

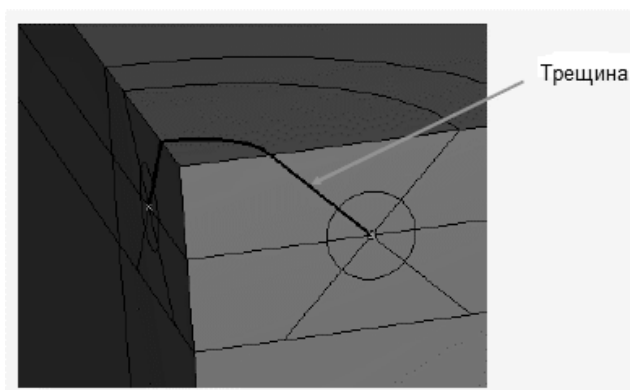


Рисунок 117 – Вид трещины на модели

44. Проверьте, применились ли настройки по смещению узлов у деградированных элементов у фронта трещины, воспользуйтесь командой файлового меню «Mesh» – «Edit» (рис. 118).

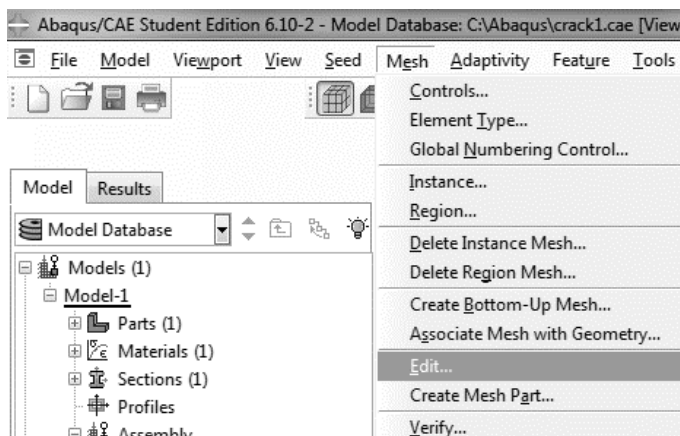


Рисунок 118 – Меню редактирования сетки разбиения

45. В открывшемся окне «Edit Mesh» выберите категорию «Node», метод «Edit» (рис. 119), узлы подсвечиваются зеленым цветом, и можно увидеть, что в элементах, прилегающих к фронту трещины узел смещен на $\frac{1}{4}$ стороны элемента (рис. 120).

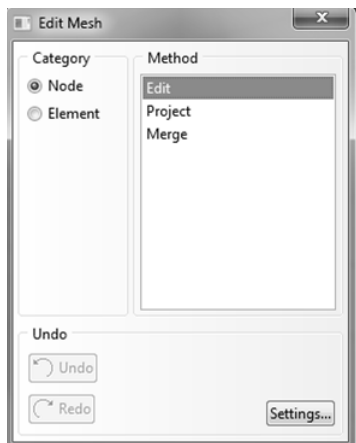


Рисунок 119 – Окно редактирования свойств сетки разбиения модели

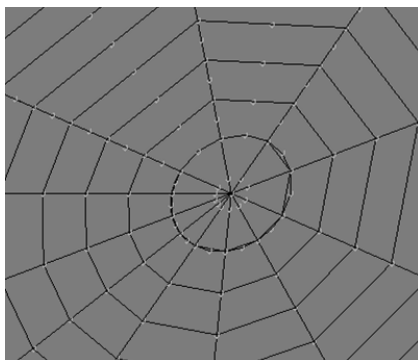


Рисунок 120 – Вид смещенных узлов в элементах вокруг вершины трещины

46. Как ранее было отмечено, стандартным методом в Abaqus можно задать только один q вектор для любой геометрии. Если в 2D задаче нам это подходило, при моделировании трещины в 3D нам необходимо присвоить свой q вектор для каждого узла фронта трещины. Как примерно это должно выглядеть, представлено на рис. 121.

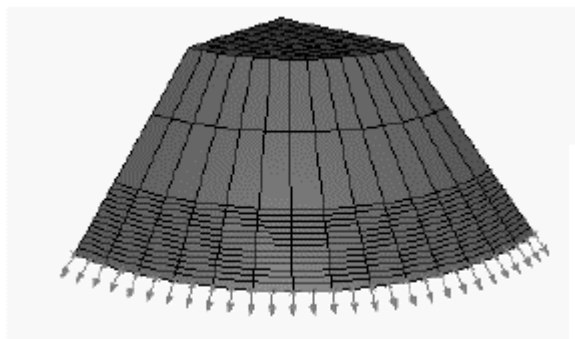


Рисунок 121 – Вид q векторов в каждом узле фронта трещины

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ТРЕЩИН

5.1. Моделирование открытых трещин в 2D

При моделировании трещин открытой геометрии сингулярные элементы обычно не используются.

Сетка разбиения должна быть достаточно подробной, чтобы смоделировать очень высокие градиенты деформаций в окрестности вершины трещины. Даже если необходимо вычислить только J -интеграл, деформация вокруг кончика трещины может преобладать в решении и область вершины трещины должна моделироваться тщательно, чтобы избежать вычислительных проблем.

Физически, при моделировании трещины открытой геометрии, кончик трещины не очень острый, и при таком моделировании достаточно сложно получить результаты. Мы моделируем кончик как

затупленный надрез с предполагаемым радиусом $\approx 10^{-3}r_p$, где r_p – размер пластической зоны.

Разрез должен быть достаточно малым, чтобы при приложенных нагрузках его деформированная форма не зависела от оригинальной геометрии. Обычно надрез должен быть скруглен более чем в 4 раза относительно изначального радиуса, чтобы моделирование было верным.

В 2D геометрия открытой трещины моделируется как разрез, имеющий значительную толщину (рис. 122 – рис. 123). Разбиение на элементы происходит по обычной схеме. Около вершины трещины необходима очень точная сетка (рис. 123). Этого можно достигнуть ручным разбиением вершины разреза на маленькие элементы.

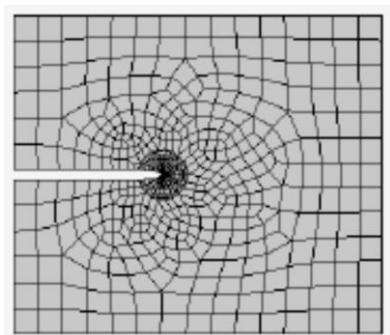


Рисунок 122 – Изображение кончика открытой трещины в модели

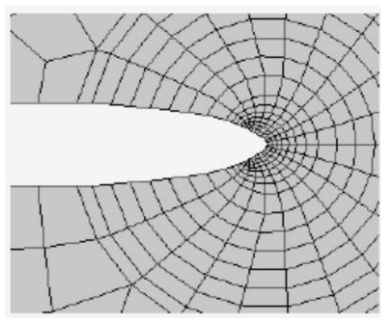


Рисунок 123 – Увеличенное изображение кончика открытой трещины в модели

5.2. Моделирование открытых трещин в 3D

3D открытые трещины могут создаваться в Abaqus/CAE двумя способами: добавлением свойства «Разрез» (Cut feature) в модуль части (Part module) или вычитанием геометрии из оригинальной детали при помощи инструмента «Boolean operation» в модуле «Assembly».

Создание подробной сетки у фронта трещины обычно требует большого количества разбиения модели (рис. 124).

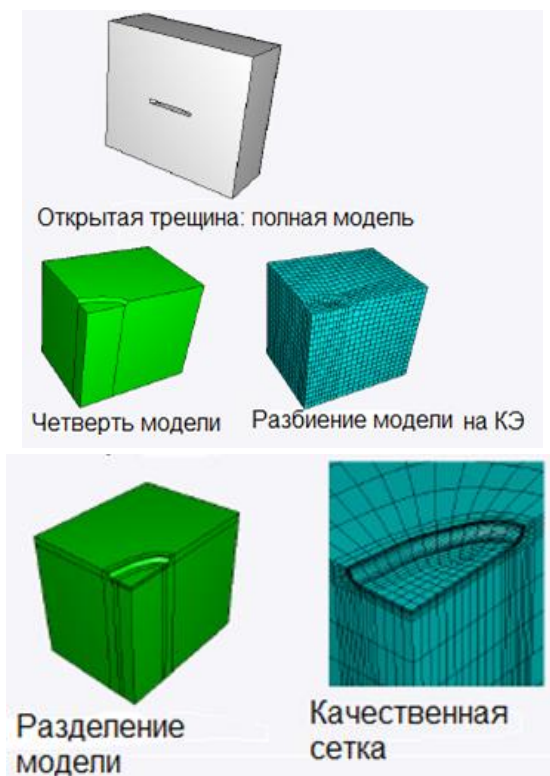


Рисунок 124 – Примеры реализации открытых трещин в модели в 3D

Размер элементов вокруг разреза должен иметь порядок $1/10$ радиуса кончика разреза (рис. 125). Скругление кончика трещины не должно быть слишком сильным (рис. 127).

Для вычисления J -интеграла затупленная область поверхности разреза должна быть указана в качестве фронта трещины (рис. 127). Для независимости J -интеграла от пути интегрирования поверхности трещины должны быть параллельны (или параллельны по-

верхности симметрии). Если в рассматриваемой задаче это условие не выполняется, Abaqus автоматически генерирует нормали к поверхности трещины.

Если радиус разреза уменьшается до нуля, все узлы, которые попадут в вершину трещины, должны быть включены в набор узлов (crack-tip node set).

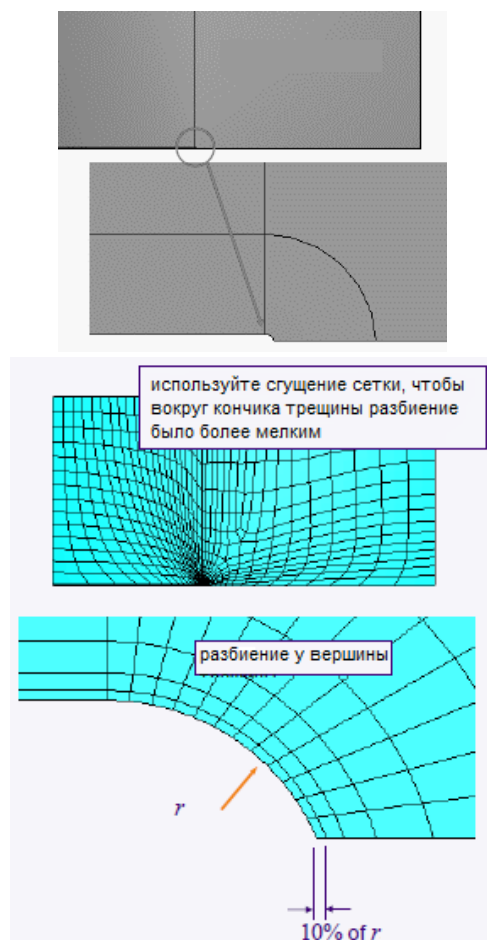


Рисунок 125 – Пример моделирования открытой трещины

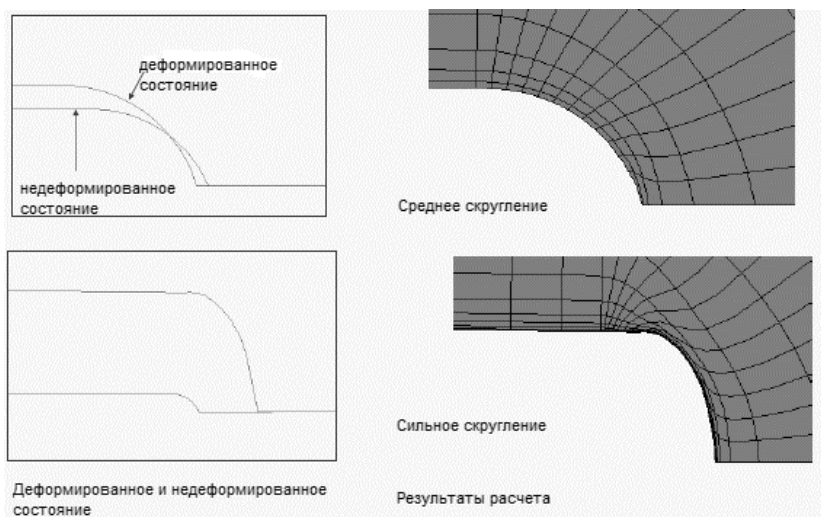


Рисунок 126 – Правильный и неправильный варианты скруглений кончиков открытых трещин в модели

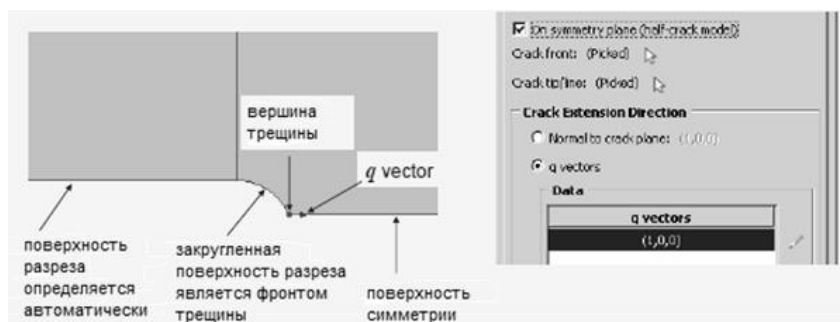


Рисунок 127 – Указание фронта открытой трещины

Если сетка настолько крупная, что ближайшие к вершине трещины точки интеграции (integration points) расположены далеко от вершины, большинство точных значений для напряжений и деформации в окрестности вершины трещины будет потеряно. В этом случае можно получить точные значения J -интеграла, если смоделировать трещину, как острую.

В ситуациях, включающих конечные вращения и малые деформации, таких как изгиб тонких конструкций, модель должна содержать небольшую ограниченную зону вокруг кончика трещины. Область, определяющая фронт трещины для контурного интеграла, состоит из области данной ограниченной зоны (рис. 128). Элементы не должны быть сингулярными.

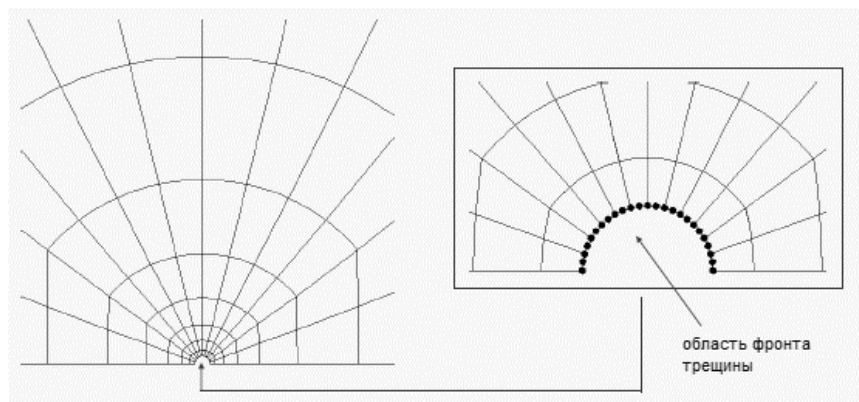


Рисунок 128 – Область фронта трещины

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Печатные ресурсы

1. ГОСТ Р 7.0.100-2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 124 с.

2. Устинов, А.А. Численное моделирование квазистатической критической и усталостной трещиностойкости конструкционных клеевых соединений с использованием модели когезионной зоны и её экспериментальных параметров: дис. ... канд. технич. наук: 05.16.09 / Устинов Андрей Анатольевич; науч. рук. Н.А. Козлов; МАИ. – Москва, 2020. – 116 с.

Электронные ресурсы

1. Abaqus. – URL: https://thesis.com.ru/cae_brands/abaqus (дата обращения: 08.11.2022).

2. Abaqus Documentation Collection. – URL: <http://wufengyun.com/v6.14/index.html> (дата обращения: 08.11.2022).

3. Abaqus Analysis User's Guide. – URL: <http://wufengyun.com/v6.14/books/> (дата обращения: 08.11.2022).

4. Abaqus/CAE User's Guide. – URL: <http://wufengyun.com/v6.14/books/usi/default.htm> (дата обращения: 08.11.2022).

5. Modeling Fracture with Abaqus. – URL: <https://www.4realsim.com/pdf/Modeling-Fracture-and-Failure-with-Abaqus.pdf> (дата обращения: 08.11.2022).