Abadus

Применение комплекса в инженерных задачах





Предисловие

Abaqus – программный комплекс мирового уровня в области конечно-элементных прочностных расчетов, с помощью которого можно получать точные и достоверные решения для самых сложных линейных и нелинейных инженерных проблем. Семейство продуктов Abaqus paspaбатывается и поддерживается компанией **Abaqus**, **Inc. (USA)** с 1978 года. С 2005 года Abaqus, Inc. входит в компанию **Dassault Systemes** (разработчик всемирно известной CAD системы **CATIA** и систем управления жизненным циклом изделий **PLM SmarTeam** и **Enovia**). В качестве стратегии дальнейшего развития компанией **Abaqus** было анонсировано создание совершенно новой универсальной среды моделирования **SIMULIA**, которая будет обобщать не только все решения компаний **Dassault Systemes** и **Abaqus**, **Inc**. в области прочностных расчетов, но и объединять лучшие решения третьих фирм для создания мощного инструментария для реалистичного проектирования и многодисциплинарного анализа конструкции.

SIMULIA будет позволять проводить реальное моделирование конструкций, находясь в общем жизненном цикле создания изделий, что позволит значительно улучшать потребительские качества создаваемого изделия, уменьшать число необходимых натурных экспериментов и способствовать внедрению инноваций.

Данное пособие создавалось с целью дать возможность новым пользователям ознакомится с отличительными особенностями конечно-элементного комплекса **SIMULIA/Abaqus** и научиться решать с его помощью различные прочностные задачи. В пособие охвачены такие типы прочностного анализа как статика, динамика, частотный анализ, анализ контактных взаимодействий, термический анализ, электростатика и тп.

В настоящей работе представлено практическое пособие по применению программного комплекса **SIMULIA/Abaqus** в инженерных задачах. Задачи рассматриваются в полном объеме от задания геометрии и свойств конструкции, построения сетки, граничных условий, условий контакта и нагружения вплоть до получения и предоставления результатов. Материал данного пособия адаптирован к бесплатной учебной версии **Abaqus Student Edition**, распространяемой компанией TEC/IC, но при этом не исключает возможность использования ее для освоения полной версии **SIMULIA Abaqus**. Примеры задач создавались для обучения работе с графической средой создание моделей **Abaqus/CAE**. Использование командной строки и импорта/экспорта геометрий рассматривались фрагментарно.

Abaqus Student Edition представляет собой полную версию SIMULIA/Abaqus, в которую было добавлено ограничение на количество узлов и элементов в сетке не более 1000. Во всём остальном Abaqus Student Edition не имеет отличий от полной версии. Так же комплект поставки Abaqus Student Edition входит полная документация на английском языке, а так же архив тестовых задач.

Подробнее о просмотре тестовых задач вы можете узнать в разделе Литература.

© ТЕСИС, 2010.

127083, Россия, Москва, ул. Юннатов, дом 18, 7-й этаж, к.705

Тел./факс: +7(495) 612-4422, 612-4262, info@tesis.com.ru

Оглавление:

Глава 1 – Введение

Глава 2 - Структура САЕ-интерфейса. Моделирование статической линейной задачи для двумерного объекта на примере консольно закрепленной балки.

Глава 3 - Моделирование статической линейной задачи для трехмерного объекта на примере изгиба консольно-закрепленной балки. Использование различных типов элементов. Изменение параметров сетки.

Глава 4 - Моделирование различных типов материалов (изотропные, ортотропные, слоистые, гиперэластичные) на примере изгиба консольно-закрепленной балки. Задание пределов пропорциональности и прочности, переход к нелинейной статической задаче Глава 5 - Моделирование динамической задачи на примере свободных колебаний консольно-закрепленной балки. Анализ частотных характеристик, запись результатов анализа в отчетные файлы.

Глава 6 - Моделирование контактной задачи на примере падения твердого шара на свободный конец консольно-закрепленной балки с различными начальными условиями.-Глава 7 - Моделирование контактной задачи на примере взаимодействия консольнозакрепленной балки и лежащего на ней упругого цилиндра, нагруженного поперечной силой. Запись результатов анализа в видеоклип.

Глава 8 - Моделирование статической линейной задачи на примере нагрева и охлаждения консольно закрепленной балки. Исследование возникающих температурных напряжений.

Глава 9 - Моделирование статической линейной задачи на примере электростатического взаимодействия консольно закрепленной балки с заряженными телами различной геометрической формы.

Глава 10 – Технология моделирования роста трещины - XFEM.

- Глава 11 Импортирование /экспорт геометрии и моделей
- Глава 12 Дополнительные методы создания и анализа моделей
- Глава 13 Создание скриптов в Abaqus/CAE
- Глава 14 Система единиц а SIMULIA Abaqus
- Глава 15 Литература

Глава 1: Введение

Конечно-элементный прочностной код SIMULIA/Abaqus - это универсальная программа общего назначения, предназначенная для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного прочностного анализа поведения сложных конструкций.

SIMULIA Abaqus широко применяется в различных отраслях промышленности, таких как:

- Производство энергии, (ABB, AEA Technology, SIEMENS, EPRI, Атомэнергопроект);
- Автомобилестроение (BMW, FORD, General Motors, Mercedes, Toyota, Volvo, Goodyear);
- Авиастроение/Оборона (General Dynamics, Lockheed Martin, US Navy, Boeing);
- Электроника (Intel, Hewlett-Packard, Motorola, IBM, Digital);
- Металлургия (British Steel, DuPont, Новокраматорский машиностроительный завод);
- Нефтедобыча и переработка (Exxon/Mobil, Shell, Dow);
- Производство товаров народного потребления (3M, Kodak, Gillette);

- Общая механика и геомеханика (GeoConsult, ISMES, Подземгазпром, ВНИИГ им.Веденеева).

Среди ВУЗов, использующих SIMULIA/Abaqus в научно-исследовательских и учебных целях, следует отметить СПбГПУ, МВТУ им.Баумана, МФТИ, ЮУрГУ, Пермский ГПУ, Южный Федеральный Университет и др.

Одним из серьезных преимуществ SIMULIA/Abaqus является возможность решения связанных задач мультифизики в области прочности конструкций для всех типов анализа, таких как:

- Тепло механика (последовательное или полностью сопряженное решение)
- Тепло электричество
- Поток в пористой среде механика
- Напряжения диффузия массы (последовательно сопряженное решение)
- Пьезоэлектрика
- Акустика вибрации

Программный комплекс SIMULIA/Abaqus позволяет учесть все нелинейности, как физические, так и геометрические, имеет большую библиотеку конечных элементов и позволяет исследовать всевозможные модели материалов, таких как металлы, бетон, грунты, эластомеры, композиты и т.д.

Программный комплекс SIMULIA/Abaqus разработан по модульному принципу. Он состоит из двух основных модулей – решателей (солверов) Abaqus/Standard и Abaqus/Explicit, пре-построцессора Abaqus/CAE и дополнительных модулей, учитывающих особенности специфических проблем (Abaqus/Aqua, Abaqus/Design, FE-Safe). Все модули удачно дополняют друг друга.



Рисунок 1: Моделирование случайного падения тепловыделяющей сборки водяного атомного реактора на жесткое основание

Abaqus/Standard – один из двух основных решателей программного комплекса SIMULIA /Abaqus, использующий неявную формулировку метода конечных элементов. Abaqus/Standard позволяет использовать различные методы анализа статики и динамики конструкций во временной и частотной области.

Abaqus/Explicit – решатель для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов, использующий явную схему интегрирования метода конечных элементов. На рис.1 представлено моделирование случайного падения тепловыделяющей сборки водяного атомного реактора на жесткое основание, выполненного в Национальной Инженерной Лаборатории в Айдахо, США.

Abaqus/Design - дополнительный модуль к Abaqus/Standard, позволяющий анализировать чувствительность к изменению параметров конструкции и проводить оптимизацию.

ABAQUS/Aqua – дополнительный модуль к Abaqus/Standard, позволяющий анализировать нагрузки на кабели, трубопроводы и другие конструкции, погруженные в воду.

FE/Safe – этот модуль использует результаты расчета SIMULIA/Abaqus для анализа усталостной прочности, долговечности, ресурсоемкости конструкций.

Abaqus/ADAMS – этот интерфейс позволяет экспортировать результаты из SIMULIA/Abaqus в ADAMS/Flex.

Abaqus for CATIA v5 – этот интерфейс позволяет готовить модели и просматривать результаты SIMULIA Abaqus непосредственно в CATIA.

Abaqus/MOLDFLOW – этот интерфейс транслирует информацию из MOLDFLOW для создания конечно-элементной модели SIMULIA/Abaqus.

Abaqus/CAE – графическая оболочка для моделирования, управления и мониторинга задач, а также для визуализации результатов расчета в SIMULIA/Abaqus.

VCCT (Crack Closure Technique) – модуль для проектирования и предсказания разрушения и потери несущей способности авиационных конструкций из ламинированных композитных материалов.

Глава 2: Структура САЕ-интерфейса. Моделирование статической линейной задачи для двумерного объекта на примере консольно закрепленной балки.

Запустите ABAQUS CAE. В появившемся диалоговом окне *Start Session*, показанном на рисунке 2.1, предлагаются 4 возможных действия:

Start Session	×
Abaqus	CAE
Ve	ersion 6.7
Studer	nt Edition
Create Model Database	
Open Database	
Run Script	
Start Tutorial	
2-	
PSIMULIA	
The Abaqus Software is a product of Dassault Système Simulia Corp., Providence, RI, USA. Abaqus, the 3DS Ic SIMULIA are trademarks or registered trademarks of E Systèmes or its subsidiaries in the US and/or other cou © Dassault Systèmes, 2007	s go, and Jassault htries.

Рисунок 2-1

Create Model DataBase - создание новой базы данных для модели;

Open DataBase - открытие существующей базы данных;

Run Script – запуск сценария с заранее записанными командами;

Start Tutorial – запуск программы с документацией по обучению и создание новой базы данных.

Выберите Create Model DataBase для начала работы.

Перед началом работы в **ABAQUS/CAE** необходимо понимать структуру графического интерфейса пользователя. Общий вид интерфейса представлен на рисунке 2.2



Рисунок 2-2. – рабочее окно Abaqus

Перед Вами – рабочее пространство ABAQUS 6.7. Верхняя панель – панель меню, ниже ее – панель инструментов, под ней – панель состояния. В центре – рабочее окно просмотра моделей **Viewport**, слева от него – текущая панель компонент модулей, под ним – панель инструкций и окно сообщений. Все это составляет графический интерфейс САЕ, который изображен на рисунке 2.2. Размеры окна **Viewport** могут меняться, но общий вид всех панелей и их расположение неизменно.



Одной из особенностей ABAQUS является использование модулей, каждый из которых содержит некоторый набор действий, близких по значению и необходимых для построения конечно-элементной модели и дальнейших операций с ней. Это упрощает и делает более наглядной работу в ABAQUS. Для выбора модуля в левой части панели основных компонент есть ниспадающий список *Module*, показанный на рисунке 2-3. В нем представлены следующие модули:

Рисунок 2-3

PART – модуль, предназначенный для создания деталей, задания их геометрии, опорных точек и систем координат;

PROPERTY – модуль, предназначенный для определения материалов и сечений, применяемых в модели, а также для задания их физических характеристик;

ASSEMBLY – модуль, предназначенный для задания взаимного расположения деталей и сборки их в единую модель;

STEP – модуль, предназначенный для создания шагов расчета и определения выходных данных по результатам;

INTERACTION – модуль, предназначенный для определения взаимодействий между деталями, контактных участков и их свойств;

LOAD – модуль, предназначенный для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий для нее;

MESH – модуль, предназначенный для построения сетки, фактически, в нем происходит преобразование геометрической модели в конечно-элементную;

JOB – модуль, предназначенный для создания файла выходных данных, проверки построенной модели, запуска вычислительного процесса и контроля над ним;

VISUALIZATION – модуль, предназначенный для просмотра результатов расчета и обработки полученных данных;

SKETCH – модуль, предназначенный для сохранения эскизов и чертежей полученной модели.

Так же для работы с модулями и наглядного представления элементов модели в Abaqus/CAE используется дерево. Каждый элемент в дереве отвечает за работу с конкретным модулем и создание элемента модели. Ниже обозначены наиболее часто используемые 'элементы:.



Рисунок 2-4 – дерево модели

2.1 Статический расчет консольной балки.

Рассмотрим консольно-заделанную упругую балку длиной 10 см, прямоугольного сечения 5,0*1,0 мм², изготовленную из дюралюминия Д16Т и подвергающуюся воздействию сосредоточенной силы величиной в 1 кН, приложенной к свободному концу. Ее общая схема представлена на рисунке 1.4. Теоретически, максимальный прогиб балки будет наблюдаться в точке приложения силы и составит $\delta = PL^3/3EI$, где $I = ab^3/12$,где а и b, соответственно, стороны сечения.



Рисунок 2-5. – Консольно-закрепленная балка

Для нашего случая $\delta = 1,4$ мм.

Согласно решению этой задачи в сопротивлении материалов эпюры перерезывающих сил Q_y и моментов M_z имеют вид, представленный на рисунке 1.5.



Рисунок 2-6 эпюра перерезывающих сил и изгибающего момента

Здесь $Q_o = P$, $M_o = PL$.

Откройте в списке Module модуль PART. Для создания детали нажмите кнопку Create Part. **Ш**, или дважды щёлкните на значке " Parts в дереве модели.

В процессе работы с модулями придется воспользоваться панелью инструкций (см. рисунок 2-7.). Панель предназначена для представления пользователю информации о текущей работе, о том, какие действия от него ожидаются, а также представлены кнопки отмены и окончания работы.





Также, альтернативно, вы можете воспользоваться командой **Part – Create** на панели меню. Как правило, команды, вызываемые посредством панели меню, продублированы кнопками на панели текущих компонент модулей. На рисунке 2-8 показано окно **Create Part**, возникающее в результате этой команды.

Построим двумерную модель балки. Для этого в окне **Create Part** зададим свойства так, как показано на рисунке, то есть создадим двумерную деформируемую кривую с максимальным размером области построения, равным 400 мм, и присвоим ей имя Beam-1.

Подтвердим так заданные свойства нажатием кнопки **Continue.** На экране появится сетка, сопровождающая построение модели. Ее шаг по умолчанию равен 10 мм. С ее помощью построим прямую линию длиной 100 мм. Для ее построения нажмем кнопку **Create Lines Connected**.

Рисунок 2-8

Теперь, двигаясь по узлам сетки, нарисуем линию требуемой длины. Можно также задать 2 точки в возникшем внизу окне, как это показано на **рисунке 2-9**, с координатами 0,0 и 100,0 и подтвердить свой выбор клавишей **Enter**. В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки **Cancel**. X



Рисунок 2-9

Чтобы завершить геометрические построения, нажмите **Cancel** или среднюю кнопку мыши, после чего нажмите появившуюся внизу на панели инструкций кнопку **Done.** Для возврата к предыдущему действию служит находящаяся слева от кнопки **Cancel** кнопка **Васk**.

Перейдите к следующему модулю **PROPERTY**. В модуле **PROPERTY** задается материал балки и свойства сечения. Для задания материалов можно воспользоваться либо элементом меню **Material -> Create** (см. рисунок 2-10), кнопкой

ABAQUS позволяет задавать различные типы материалов: металлы, чугун, резину, пластмассы, композиты, а также хрупкие и сыпучие материалы. Отклик материала может сильно нелинейным, учитывающий как упругие и нелинейно-упругие, так и упругопластические, упруговязкопластические закономерности, как для изотропных, так и для анизотропных материалов. Возможен учет ползучести.



Задайте материал балки, дважды щелкнув по значку Materials ն в дереве модели. Появится окно Edit Material, показанное на рисунке 2-10. Назовите материал Metal. В его верхней части указываются различные опции, из которых задайте только две: General – Density = 2600 (кг/ M^3) и Mechanical – Elasticity – Elastic: Young's Modulus = 5.6e+08 (Πa), Poisson's Ratio = 0.3. Подтвердите ввод нажатием кнопки ОК. Материал создан. Но это еще не значит, что балка приобрела его заданные свойства. Теперь необходимо создать сечение балки, присвоить ему заданный материал и только потом присвоить это сечение всей балке. Для этого дважды щелкните по иконке Bections в дереве модели, или нажмите кнопку [≟]Create Profile, либо командами меню Profile – Create. Появится окно Create Section, в котором нужно выбрать категорию и тип Beam. Назовите сечение Beam Section. Подтвердите выбор нажав кнопку Continue..., появится окно Edit Beam Sections.

В нем необходимо создать профиль сечения. Нажмите на кнопку **Create** рядом с полем **Profile name** В Abaqus/CAE есть набор уже готовых типов профилей. В появившемся окне **Create Profile** выберите **Rectangular** В окне **Edit Profile**, задайте размеры сторон сечения a = 1, b = 5. Подтвердите ввод кнопкой **OK**, после чего выберете созданный профиль в поле **Profile name**. После этого в поле *Material Name* выберете ранее созданный материал Metal, и завершите создание сечение нажатием на OK.

Теперь присвойте построенное сечение ранее созданной балке. Для этого раскройте элемент rts Parts в дереве модели, в нем раскройте Part-1 и дважды щелкните по элементу Section Assignments, или же используйте кнопку **LAssign Section** в текущей панели инструментов, либо команды меню **Assign – Section**. С помощью мыши укажите на балку, она будет выделена красным цветом. Нажмите Done. В появившемся окне выберите сечение и подтвердите выбор нажатием кнопки **OK**. Осталось только определить, как направлены сечения внутри балки. Для этого нажмите кнопку

Assign Section Orientation либо используйте команду меню Assign – Beam Section Orientation. С помощью мыши укажите на балку, она будет выделена красным цветом, и подтвердите выбор нажатием кнопки Done. На панели инструкций возникнет окно, в котором вам надо задать направление вектора вдоль оси «Х» (стороны *a*) сечения. Введите числа 0.0, 0.0, -1.0 и, убедившись в правильности направления сечений, нажмите кнопку **OK.

Перейдите к модулю **ASSEMBLY**. Как было сказано выше модуль **Assembly**, служит для создания привязок (ссылок на детали) и объединения деталей в сборки. Несмотря на то, что в данной модели всего одна деталь, сборку все равно необходимо сформировать. Поскольку в нашем случае деталь всего одна, достаточно нажать кнопку **Create Part Instance**, либо в дереве модели раскрыть элемент ^{Assembly} и в нем дважды кликнуть на ^{Istances}, либо воспользоваться командами меню **Instance – Create**. Появится окно со списком готовых деталей Parts. В нашем случае деталь всего одна, выберем ее – она будет выделена красным цветом, в разделе **Instance Type** укажите **Independent** и подтвердите выбор – цвет, обозначающий сборку, изменится на синий.

Если сборку создают две и более детали, то для их взаиморасположения используются элементы меню **Instance->Translate**, **Instance->Rotate**, и **Instance->Rotate**. В данной задаче одна деталь и эти опции не будут задействованы.

Следующая операция является очень важной при работе в **ABAQUS/CAE** - выбор шагов анализа. В модуле **Step** задаются шаги анализа, определяются тип анализа - основной анализ (*General*) или анализ линейных возмущений (*Linear Perturbation Step*) и тип решения (статика, динамика, теплопередача и т.п.).

Поскольку ABAQUS представляет собой пакет программ и использует разные решатели в зависимости от постановки задачи, необходимо определить, каким именно решателем мы будем пользоваться. Перейдите к модулю STEP и создайте шаг расчета с помощью кнопки Create Step •••••, или дважды кликните элемент ^{off} Steps (1) в дереве модели, либо с помощью команды меню Step – Create. Возникнет окно *Create Step*, в котором уже указан начальный шаг расчета *Initial.* Задайте следующий шаг *Static, General* и присвойте ему имя – Loading. Нажав на кнопку Continue, вызовите окно редакции шага расчета Edit Step, В графе Description укажите тип решаемой задачи - Console Beam.

Активируйте опцию нелинейного анализа, указав Nigeom=On, и нажмите OK.

В модуле STEP есть еще две важные функции, **Create Field Output** и **Create History Output**. Они позволяют задавать переменные, которые надо определить в ходе расчета – напряжения, энергии, деформации и т.п. Часть из них задается автоматически. Просмотреть заданные по умолчанию выходные параметры, а также внести изменения можно с помощью сопутствующих го менеджеров – они есть в каждом модуле и вызываются одинаковыми кнопками. Так же доступ к этим функциям можно получить через соответствующие элементы дерева модели, а доступ к их менеджерам – кликнув по названию правой кнопкой мыши и выбрав **Manager...**

Используйте менеджер для Field Output через соответствующую кнопку, либо с помошью команд меню Output – Field Requests – Manager. Появится окно Field Output Requests Manager. Нажмите кнопку Edit, чтобы выбрать необходимые выходные данные из списка. В этом менеджере, как и в любом другом, можно также создавать, изменять, копировать и удалять

соответствующие компоненты текущего модуля. Выход из менеджера осуществите кнопкой **Dismiss**.

В нашей задаче нет взаимодействий, поэтому модуль **INTERACTION** опустим. Перейдем сразу к модулю **LOAD**.

Задайте сосредоточенную силу, действующую на конец балки, дважды кликнув по элементу дерева меню 🗳 Loads, или с помощью кнопки Create Load 🖳, либо команд меню Load – Create. Укажите шаг, на котором действует нагрузка (Loading), присвойте имя, *Tip Load*, определите категорию Category нагрузки *Mechanica* и тип нагружения Types for Selected Step как сосредоточенная сила Concentrated Force.

Нажмите кнопку **Continue** и перейдите к следующему окну **Edit Load**. В нем укажите точку на конце балки, как показано на **рисунке 2-18** и задайте величину сосредоточенной силы *CF*2 = - 1000. Нажатием кнопки ОК подтвердите выбор. Нагрузка на балку задана.

Граничные условия задайте аналогично, закрепив неподвижно другой, ненагруженный конец. Для этого дважды щелкните по элементу ВС вдерева модели, или используйте кнопку Create BC либо команды меню *BC – Create*.

В появившемся окне Create Boundary Condition задайте на шаге Initial категорию граничного условия *Mechanical* и его тип Symmetry/Antisymetry/Encastre. Присвойте заделке имя BeamBound.Нажмите кнопку Continue. Укажите на свободный конец балки, подтвердите выбор и, нажав кнопку Done, перейдите к следующему окну Edit Boundary Condition. В нем выберите последнюю графу Encastre, то есть нулевые линейные и угловые перемещения в указанной точке, и нажмите OK.

Создание конечно-элементной сетки – является одним из важных этапов создания конечноэлементной модели. В **ABAQUS/CAE** для создания сетки и ассоциации свойств конечных элементов с заданными свойствами, предназначен модуль **Mesh**.

Перейдите в модуль **MESH**. Прежде, чем построить сетку, надо определить размеры элементов. С этой целью в **ABAQUS** используется опция **Seed**.

Нажмите на кнопку Seed Part Instance и продолжайте удерживать треугольную закладку в ее нижнем правом углу, пока не появится подменю, в котором выберите кнопку Seed Edge By Number либо воспользуйтесь командами меню Seed – Edge By Number. С помощью мыши выделите балку и в окне на панели инструкций задайте количество элементов вдоль нее - 10. Подтвердив ввод кнопкой Done, вы увидите на балке ряд окружностей, обозначающих предполагаемые положения узлов сетки. Можно также задать размер элемента другими способами, например, кнопками Seed Edge By Size или Seed Edge Biased.

Теперь необходимо определить, на основе каких элементов будет построена модель балки. После нажатия кнопки **Assign Mesh Controls** или вызова команд меню **Mesh – Controls** появляется окно, в котором надо указать категорию используемых элементов, для одномерных элементов это не нужно. Кнопка **Assign Element Type** или команды меню **Mesh – Element Туре** вызывает окно выбора типа элементов сетки

Выберите тип элемента В21Н, как это показано на рисунке, задав линейный порядок элемента, содержащегося в стандартной библиотеке, из разряда балочных, работающего на сдвиг в гибридной формулировке.

Теперь, когда все готово для построения сетки, нажмите кнопку **Mesh Part Instance** или используйте команды меню **Mesh – Part Instance – Create**. Нажмите **OK**, и балка покроется одномерной сеткой. Конечно-элементная модель готова.

Перейдите к модулю **JOB**. С помощью кнопки **Create Job** либо команд меню **Job – Create**, или дважды кликнув по элементу **Jobs** в дереве модели создайте файл данных с расширением **.odb*, из которого после окончания расчета можно считать результаты. В появившемся окне **Create Job**, присвойте этому файлу имя Beam2D-Bending. Имя надо задавать уникальным, это позволит избежать путаницы, когда у вас накопится много файлов **.odb*.

Для продолжения нажмите кнопку Continue и в окне Edit Job, задайте тип вычисления Full Analisys, очередность выполнения Background и время на подтверждение Immediately. Можете также указать описание выполняемой работы, *Bending static*, это особенно полезно, когда к модели прикладываются различные нагрузки, задаются разные граничные условия или есть несколько шагов расчета. Подтвердите ввод нажатием кнопки OK. Вычислительный процесс сформирован. Чтоб запустить его, раскройте элемент **Sub** дерева модели, кликните правой кнопкой по процессу Beam2D-Bending и выберите Submit, или же вызовите Job Manager соответствующей кнопкой либо командами меню Job –Manager и нажмите на кнопку Submit.

Надпись Running говорит о работе процесса, когда она сменится на Completed - нажимайте кнопку Results, чтобы просмотреть результаты расчета. Вы автоматически перейдете в модуль VISUALISATION. Кнопка Fast Plot Deformed показывает вид деформированной модели, кнопка Plot Undeformed возвращает исходную модель, кнопка Plot Contour отображает распределение по модели результирующей переменной, по умолчанию – напряжения по Мизесу, в виде цветовых градаций. Как обычно, все эти кнопки продублированы одноименными командами в меню Plot.

Можете заказать распределение любой переменной, используя команду меню **Result – Field Output**. В возникшем окне, укажите интересующую вас переменную. Там же можно заказать переменную, определяющую экранную деформацию модели – она вовсе не обязательно должна совпадать с физической деформацией. Обратите внимание, что некоторые переменные состоят из нескольких компонент, и в списке внизу вы можете определить именно ту, которая вам нужна, учитывая оригинальную систему координат ABAQUS: X, Y и Z нумеруются, соответственно, 1, 2 и 3. Теперь сравните максимальную величину прогиба всей балки с ее расчетным значением, выбрав **Results at nodes – U –U2**.

Глава статической линейной 3: Моделирование задачи для трехмерного объекта на примере изгиба консольно-закрепленной Изменение балки. Использование элементов. различных типов параметров сетки.

На этот раз продолжим рассмотрение консольно-заделанной балки из предыдущего занятия, но будем моделировать ее уже трехмерными элементами.

Создайте новую базу данных модели. Поскольку вы уже знакомы с некоторыми командами **ABAQUS**, не будем повторяться, описывая уже известные вам действия. Создайте деталь, присвойте ей имя 3DBeam и в окне **Create Part** задайте новый тип детали, а именно – трехмерное деформируемое твердое тело, путем определения *Modeling Space = 3D*, *Type = Deformable*, *Base Feature* задайте *Shape = Solid*, *Type = Extrusion*, то есть объемный объект, полученный выдавливанием (также его можно построить вращением или протягиванием вдоль кривой). Обратите внимание на то, что размер рабочего окна **Approximate Size** надо задать равным 20. Нажав кнопку **Continue**, подтвердите свой выбор и приступайте к геометрическим построениям.

На панели текущих инструментов модуля **PART** нажмите кнопку **Create Lines:Rectangle** либо воспользуйтесь командами меню **Add** – **Line** - **Rectangle**. Теперь можете строить сечение прямо на экране с помощью мыши или заданием углов прямоугольника -2.5, -0.5 и 2.5, 0.5. После нажатия клавиши **Enter** завершите построение сечения кнопкой **Done**, и в появившемся на панели инструкций окне задайте глубину выдавливания 100. В окне просмотра модели появится трехмерная балка в виде прямоугольного параллелепипеда. (Рисунок 3.1)



Рисунок 3-1

Используйте кнопки динамического вращения **C**View Rotate. динамического увеличения/уменьшения ↔View View панорамирования Zoom, Pan И шейдинга Display Hidden, Display Shaded и Display Wireframe для просмотра полученного объекта. Также могут быть полезны кнопки 🖾 View Fit, показывающая весь объект в центре окна просмотра модели, и кнопка 🦳 View Zoom Rectangle, позволяющая увеличивать часть объекта внутри выбираемой мышью прямоугольной области.

В модулях **PROPERTY**, **ASSEMBLY** и **STEP** действия ничем не отличаются от описанных в предыдущей главе, за исключением задания сечения. Во-первых, профиль задавать уже не надо. Во-вторых, при создании сечения в окне **Create Section** укажите категорию **Solid** и тип **Homogeneous**, то есть однородное твердотельное сечение. Выбрав в окне **Edit Section** созданный заранее материал, и толщину сдвига в собственной плоскости *Plane stress/strain thickness* = 1, подтвердите ввод кнопкой **OK**, после чего присвойте сечение балке дважды кликнув на элементе **Section Assignment** в дереве модели, или командой **Assign Section**, вызываемой из панели меню, либо с помощью соответствующей кнопки.

Перейдите к модулю LOAD. Необходимо так же, как и в предыдущей главе, приложить сосредоточенную силу к некоторой точке. Очевидно, она должна располагаться на оси жесткости балки, но точки для нее пока не созданы. Для преодоления подобных затруднений в ABAQUS есть семейство команд разбиения Partition. Вызываются они из панели меню Tools - Partition или кнопкой на текущей панели инструментов *Partition Sketch: Face*. В появившемся окне Create Partition укажите тип разбиения Face и метод Sketch. После нажатия кнопки OK на экране с помощью мыши выделите грань на свободном конце, к которой будет приложена нагрузка, и нажмите Done. В появившемся на панели инструкций окне выберите horizontal and on the top и выделите мышью соответствующее ребро грани, то есть верхнее горизонтальное. Используйте кнопку Create Lines Connected или команду меню Add – Connected Lines, чтобы построить на этой грани отрезок, разбивающий ее на две равные части. После нажатия кнопки Done вы увидите, что к грани добавилось новое ребро. Его тоже надо разбить пополам, чтоб получить точку точно в центре грани. Для этого нажмите кнопку Partition Edge By Parameter, или воспользуйтесь командами меню Tools – Partition - в окне Create Partition задайте тип разбиения Edge и метод Enter Parameter. Укажите мышью вновь созданное ребро и в появившемся на панели инструкций окне задайте параметр разбиения, обозначающий расстояние от начала ребра до точки разбиения в долях от длины ребра, равным 0.5 и нажмите кнопку Create Partition. Подтвердите создания разбиения кнопкой **Done**. Теперь модель готова к приложению нагрузки. Сама сосредоточенная сила задается так же, как и в случае двумерной балки, только точку ее приложения надо указать в центре торца балки. Граничное условие тоже задается аналогично случаю двумерной балки, на шаге Initial, с тем лишь различием, что закрепить надо не точку, а всю грань, противоположную той, к которой приложена нагрузка. Обратите внимание на то, что эта грань не должна быть скрытой, возможно, балку понадобится развернуть в окне просмотра с помощью кнопки View Rotate.

Перейдите к модулю MESH. Используйте команду меню Seed – Instance либо кнопку Seed Part Instance. Задайте минимальный размер элемента равным 1. Вдоль больших ребер балки возникло слишком много элементов, уменьшите их количество командами меню Seed – Edge By Size или нажмите кнопку Seed Edge By Size, находящуюся в подменю, возникающем при удерживании треугольной закладки на кнопке Seed Part Instance. Выделите все 4 образующие балки, удерживая клавишу Shift. В случае ошибки отмените выбор отдельной грани клавишей Ctrl. В появившемся на панели инструкций окне задайте размер элемента вдоль указанных ребер равным 20. Нажмите кнопку Done – теперь на балке находится всего 60 узлов предполагаемой сетки. С помощью команды Mesh – Controls или соответствующей кнопки задайте

гексаэдрическую форму элемента Shape = Hex и структурный способ построения сетки **Technique = Structured**. С помощью команды **Element Type** или соответствующей кнопки выберите тип элемента **C3D8H**, задав линейный порядок элемента, содержащегося в стандартной библиотеке, из разряда **3D Stress**, то есть работающего во всех трех направлениях по своему объему в гибридной формулировке. Создайте сетку командами меню **Mesh – Instance** или соответствующей кнопкой на текущей панели инструментов модуля **MESH**, подтверждая действие кнопкой **Done**.

Действия в модулях **JOB** и **VISUALISATION** идентичны тем, что имели место для двумерного случая. Не забывайте о том, что имя файла выходных данных должно быть уникальным, например, Beam3D-Bending.

Просмотр результатов стал более наглядным, поскольку теперь мы имеем дело с трехмерным объектом. Сравните их с результатами, полученными для двумерной балки. Для этого загрузите файл *Beam2D-Bending.odb*, созданный на предыдущем занятии. Саму модель загружать не обязательно. Создайте дополнительное окно просмотра модели с помощью команд меню **Viewport** – **Create**, в котором вы будете просматривать двумерную балку. Масштабируйте их так, как вам удобно. Чтоб перейти от окна к окну, надо сделать его активным, выбрав его в окне меню **Viewport**. Погрешность оцените самостоятельно.

Глава 4: Моделирование различных типов материалов (изотропные, ортотропные, слоистые, гиперэластичные) на консольно-закрепленной балки. Задание примере изгиба пропорциональности прочности, пределов И переход К нелинейной статической задаче.

На предыдущем занятии мы моделировали балку, сделанную из изотропного материала – дюрали, предположив, что деформация линейно зависит от напряжения. Но, как известно, в реальных материалах участок пропорциональности не бесконечен, и в общем случае диаграмма растяжения имеет вид, представленный на **рисунке 4.1**. На ней есть участок пластичности, характеризующийся тем, что значительные деформации сопровождаются небольшими изменениями напряжения. Таким образом, для любого моделируемого материала



Рисунок 4-1

статическая задача может стать нелинейной после перехода предела пропорциональности. Рассмотрим моделирование это явление в **ABAQUS**. Откройте файл, созданный во время работы с предыдущей главой и присвойте ему новое имя *Beam-Materials*. Менять геометрию, шаг расчета, нагрузку, граничные условия и сетку не будем, так что перейдем сразу в модуль **PROPERTY** и создадим в нем новый материал уже известным вам способом или путем нажатия кнопки **Create** в менеджере материалов. Задайте новые свойства описав медь: *Density* = 5400 (кг/м³), Young's Modulus = 4.3e+8, Poisson's Ratio = 0.28. Теперь в меню **Mechanical** выберите пункт **Plasticity – Plastic**. Появится таблица, по умолчанию состоящая из одной строки и двух столбцов: **Yield Stress** и **Plastic Strain**. В них, соответственно, задается напряжение и соответствующая ему пластическая деформация в табличном виде. Обратите внимание на то, что эта деформация отнулевая, поскольку так описываются не точки на диаграмме растяжения, а отклонение от прямой с углом наклона, равным арктангенсу модуля Юнга. Заполните таблицу так, как показано на **рисунке 4.2**. Заметим, что первое число в ней соответствует пределу пропорциональности, а последнее – пределу прочности материала.

Yield Stress	Plastic Strain
54e+4	0.0
58e+4	0.0006
63e+4	0.0008
69e+4	0.0013
74e+4	0.0018
78e+4	0.0023

Рисунок 4-2

Присвойте материалу новое имя - *Copper*. Далее известным вам методом задайте сечение балки на основе вновь созданного материала и присвойте его вашей модели. Перейдите в модуль **JOB** и создайте в нем новый вычислительный процесс с собственным именем, например, Beam3D-Plastic. Нажав кнопку **Submit**, начните вычисления и просмотрите результаты. Обратите внимание на то, как изменились напряжения – они существенно упали при попадании на участок пластичности. Деформации, тем не менее, изменились не так сильно – материал «потек».

Но медь – изотропный материал. Попробуем теперь задать материал ортотропный, например, фанеру. Для этого создайте в менеджере материалов новый материал с именем Plywood. Задайте плотность материала: Density = $1460 (\kappa r/m^3)$. В разделе Mechanical задайте свойство Elastic, в появившемся окне найдете поле **Туре** и переключите с его помощью тип материала с Isotropic на Orthotropic. Определите матрицу жесткости фанеры: D1111 = 2.3e+8 Па, D1122 = 3.8е+5 Па, D2222 = 4.3е+8 Па, D1133 = 5.6е+5 Па, D2233 = 1.4е+7 Па, D3333 = 1.8е+9 Па, D1212 = 2.7е+5 Па, D1313 = 1.6е+6 Па, D2323 = 4.3е+5 Па. Теперь надо задать ориентацию материала. Для этого сначала создайте локальную систему координат Datum Csys при помощи кнопки Create datum Plane: 3 Points или команд меню Tools – Datum, Type = Csys, Method = 3 points. В появившемся окне Create Datum Csys выберите Coordinate System Type как Rectangular и задайте новой системе имя, по умолчанию Datum csys-PlyWood. Нажав кнопку Continue, выберите точку начала координат в месте приложения силы, в центре свободного торца балки. Появятся новые координатные оси, выделенные красным цветом. Подтвердите ввод нажатием кнопки Create Datum. Нажмите на панели инструментов кнопку Assign Material orientation или используйте команды меню Assign – Material orientation. Укажите мышью на всю балку и нажмите кнопку Done. Теперь выделите мышью вновь созданную систему координат и нажмите на кнопку Axis-3 для ориентации усиленного волокна фанеры вдоль балки. Подтвердите нулевой угол отклонения от оси кнопкой Enter и завершите ориентацию материала кнопкой OK. Повторите все действия по созданию нового вычислительного процесса с именем Beam3D-Orthotropic и просмотрите полученные результаты.

Далее рассмотрим моделирование композитных материалов. Они состоят из ортотропных слоев, повернутых под разными углами друг относительно друга и склеенных в слоистый пакет. Для этого создайте новый материал с именем *Composite* и определите *Elastic* как *Engineering Constants*. Задайте следующие свойства: *Density* = 4850 (кг/м³), *Young's Modulus: E1* = 3.6e+8 Па, *E2* = 2.8e+7 Па, *E3* = 4.5e+7 Па, *Nu12* = 0.34, *Nu13* = 0.23, *Nu23* = 0.28, *G12* = 3.2e+7 Па, *G13* = 4.0e+7 Па, *G23* = 6.2e+7 Па. После этого нажмите кнопку **ОК**. Проведите вычислительный процесс с новым именем, например, Beam3D-Composite, не забыв, как и в предыдущем случае, после присвоения балке свойств сечения задать и ориентацию материала. Просматривая

результаты расчета, обратите внимание на распределение напряжений по слоям поперек балки, взяв в качестве переменной для вывода *Primary Variable* давление *Pressure*

Nominal Stress	Nominal Strain		
0	0		
0.3	0.8		
0.6	1.6		
0.9	2.5		
1.2	3.8		
1.5	5.0		
1.8	6.8		
2.1	8.3		
2.4	12		
Рисунок 4-3			

Наконец, научимся моделировать резину. Она относится к гиперэластичным материалам с обратной выпуклостью кривой растяжения – сжатия. Модуль Юнга для резины близок к 1/2, что говорит о малых объемных деформациях. Создайте новый материал с именем Rubber и определите Туре как Isotropic. Задайте плотность материала *Density*=1870 кг/м³ и выберите опцию Hyperelastic. Выберите Test data в качестве Input source. Эта опция требует ввода пробных данных, полученных на основании эксперимента, их можно задать в виде таблицы в препроцессоре САЕ, что производится по умолчанию, или через отдельный файл. Выберите полиномиальную модель, при помощи которой будете аппроксимировать потенциал энергии деформации материала, задав Strain energy potential как Polinomial и Moduli time scale (for viscoelasticity) как Long-term. а порядок полиномов Strain energy potential order установите равным 2. Теперь надо ввести сами пробные данные, то есть точки, по которым будет построена

диаграмма растяжения для резины. Для этого нажмите кнопку **Test Data** и выберите подопцию Uniaxial test data. Заполните появившуюся на экране таблицу Suboption Editor так, как показано на **рисунке 4.3**. Здесь Nominal Stress и Nominal Strain – номинальные напряжения и соответствующие им деформации. Подтвердите ввод, нажав **OK**. В **ABAQUS** есть разные модели для задания гиперэластичных материалов: полиномиальная, Муни-Ривлина, Марлоу, Арруды-Бойса и другие. Мы уже задали полиномиальную модель с N=2. Чтобы увидеть, насколько точно она соответствует экспериментальным данным, необходимо произвести оценку материала. Это можно сделать непосредственно в менеджере материалов, указав вновь созданный материал и нажав кнопку Evaluate, либо с помощью команд меню **Material – Evaluate – Rubbe***r*. Возникнет окно **Evaluate Material**.

В нем задайте Source как Test data, а в качестве тестов для модели материала Standard Tests выберите одноосное растяжение-сжатие Uniaxial и чистый сдвиг Planar. Для каждого из них задайте масштаб деформации Nominal Strain, то есть верхний предел деформаций в таблице пробных данных, в нашем случае 12. Откройте закладку Strain Energy Potentials и выберите модели, для которых будет проведено сравнение с пробными данными, например, Polynomial, Mooney-Rivlin и Odgen. Подтвердите ввод нажатием кнопки **OK**. Если все сделано правильно, на экране появятся графики, показывающие процессы нагружения пробного образца для эксперимента и заданных моделей потенциала энергии деформации. Обратите внимание на погрешность полиномиальной модели и закройте графики, а потом проведите известные действия по созданию нового вычислительного процесса с именем, например, Beam3D-Rubber. Ориентацию материала задавать на этот раз не надо. Просмотрите результаты расчета и определите различие деформаций медной и резиновой балки при идентичных условиях нагружения.

Глава 5: Моделирование динамической задачи на примере свободных колебаний консольно-закрепленной балки. Анализ частотных характеристик, запись результатов анализа в отчетные файлы.

Рассмотрим проведение расчета свободных колебаний балки, то есть колебаний, возбуждаемых в балке при мгновенном снятии ранее действовавших нагрузок. Используем результат предыдущего расчета, полученного при работе с главой 2, из которого в качестве исходных данных берутся деформации балки на последнем шаге. Откройте файл, содержащий модель трехмерной балки, и сохраните, присвоив ему новое имя.

Для проведения расчета необходимо создать копию модели, результаты расчета которой уже есть. Необходимо вызвать менеджер моделей, используя команду меню **Model – Copy Model** и скопировать **Model-1** в **Model-2**. Теперь все действия будут проводиться с новой моделью. Теперь создайте новый шаг анализа – линейный динамический расчет. Для этого вернитесь в модуль **STEP**. Дважды кликните по элементу **STEPS** в дереве модели, либо запустите в этом модуле менеджер, отвечающий за создание и редактирование шагов анализа **Step – Manager**, или создайте новый шаг, используя кнопку **Create**. Выберите **Procedure type = General**, метод анализа – **Dynamic**, **Implicit**. Назовите шаг *Dynamic Loading*.

В окне Edit Step задайте параметры по выбору шага. В Basic укажите описание Free Beam, и период времени Time Period, в течение которого будут рассматриваться колебания балки – 12 с. В Incrementation задайте тип – Fixed, максимальное число шагов – 200, постоянный шаг по времени Increment size – 0,1 с. В параметрах Other введите коэффициент численного демпфирования Numerical damping control parameter, равный -0.3 (знак «минус» обязателен) и нажмите кнопки OK и Dismiss.

Для задания опций вывода процессов **History Output** по времени необходимо определить точки, в которых будут записываться данные в зависимости от времени. Делается это следующим образом: запустите менеджер групп, выбрав элемент меню **Tools – Set – Manager**, в котором создается новая группа кнопкой **Create**. В эту группу будет входить одна точка – та, к которой на шаге *Loading* была приложена сила. По умолчанию расчетная группа точек геометрической модели носит имя **Set-1**, но ей можно присвоить и собственное имя при помощи кнопки **Rename**, что бывает особенно полезно при анализе комбинированных конструкций. Укажите заданную точку мышью и нажмите кнопки **Done**, а затем **Dismiss**. Запустите менеджер временн*ых* зависимостей результатов, кликнув правой кнопкой мыши по элементу дерева модели **History Output Requests** и выбрав пункт Manager, или же при помощи команд меню **Output – History Output Request – Manager** или соответствующей кнопки. В этом менеджере для шага *Dynamic Loading* задаются свои переменные для вывода, в частности перемещения, скорости и ускорения **Displacement/ Velocity/Acceleration** заданной выше группы **Set-1**, которую необходимо указать в окне **Domain**, выбрав раздел **Set**.

Задайте для этого шага условия нагружения через модуль **LOAD**. Так как на этом шаге рассматриваются свободные колебания балки, то необходимо убрать нагрузку, приложенную на предыдущем шаге. Для этого надо выделить ее в менеджере нагрузок и изменить состояние **Propagated** на состояние **Inactive** кнопкой **Deactivate**.

Следующее действие – это, собственно, организация файла выходных данных и запуск расчета с помощью модуля **JOB**. В этом модуле, используя менеджер заданий, создайте новый вычислительный процесс при помощи кнопки **Create**, после чего запустите его кнопкой **Submit**. Не забудьте присвоить этому процессу уникальное имя - Beam3D-Frequencies.

После окончания расчета откройте полученные результаты известным способом – нажатием кнопки *Results* в менеджере заданий или открытием в модуле **VISUALIZATION** соответствующего файла выходных данных с расширением **.odb*.

Для просмотра колебательного процесса по времени в ABAQUS/CAE необходимо воспользоваться командами меню Animate – Time History либо кнопкой Time History Animate Начнётся воспроизведения колебательного процесса. Для динамического отображения возникающих в балке напряжений воспользуйтесь кнопкой Allow Multiple Plot States и после ее нажатия – Plot Contours on Deformed Shape

Изменить параметры анимации можно, нажав на кнопку **Animation Options**, расположенную на панели инструкций. В частности, для того чтобы просмотреть колебательный процесс от начала до конца, один раз, без повторений необходимо в появившемся окне **Animation Options** задать параметр **Mode** в значение **Play once**.

Управление анимацией (запуск, остановка, пошаговый переход к следующему кадру) проводится с панели инструкций посредством набора кнопок **Animation Controls**. Для вывода графиков по времени необходимо воспользоваться элементом меню **Result – History output.** В появившемся окне выбирается переменная, по которой требуется построить график. Например, выберите переменную, отвечающую за вывод графика перемещения точки, к которой на шаге *Dynamic Loading* была приложена сила **Spatial Displacement**: *U1 at Node XX in NSET SET-1*. При нажатии на кнопку **Plot** на экран будет выведен график указанной переменной. Для изменения параметров выводимого графика служит кнопка **XY Curve Options**. При ее нажатии возникнет одноименное окно, дающее возможность изменить вид выводимой кривой: задать вид линии кривой, вид выводимых символов. Также может быть полезна кнопка **XY Plot Options**, при ее нажатии появится окно изменения параметров области построения, таких, как легенда и сетка.

Глава 6:. Моделирование контактной задачи на примере падения твердого шара на свободный конец консольнозакрепленной балки с различными начальными условиями.

Одной из характерных особенностей ABAQUS является большой набор средств, служащих для анализа взаимодействий. Рассмотрим простое взаимодействие упругого и абсолютно жесткого тел. Проведите известные вам действия, открыв файл с консольно-заделанной балкой и сохранив его под другим именем, и удалите нагрузку с помощью кнопки Delete так, что балка должна быть свободна уже на первом шаге расчета Loading. Теперь при помощи команд меню Create - Part либо одноименной кнопки создайте новую деталь, а именно – трехмерное абсолютно жесткое тело, путем определения Modeling Space = 3D, Type = Discrete Rigid, а в разделе Base Feature задайте Shape = Shell и Type = Revolution, то есть методом построения новой детали послужит вращение. Назовите модель Ball. Нажмите кнопку Continue и при помощи кнопки Create Arc: **Center and 2 Endpoints** Ha панели инструментов или команд меню *Add – Arc – Center/Endpoints* на плоском виде нарисуйте дугу окружности в центре с точкой (0.0, 0.0), началом в точке (0.0, 5.0) и концом в точке (0.0, -5.0). Будьте внимательны! Сначала задается верхняя точка, потом нижняя так, чтобы вся дуга лежала справа от центральной пунктирной линии CenterLine. Затем замкните дугу отрезком при помощи кнопки Create Lines Connected или команд меню Add – Line – Connected Lines. Завершите геометрические построения кнопкой Cancel и подтвердите ввод кнопкой Done. Теперь появится окно Edit Revolution, в котором надо указать угол вращения Angle = 360.0 и еще раз подтвердить ввод. Последнее, что необходимо сделать, это добавить опорную точку при помощи команд меню **Tools – Reference Point** в точке (0.0, 0.0, 0.0) и подтвердить ввод клавишей Enter. Шар готов. На этом определение геометрических характеристик деталей закончено. Если потребуется изменить характеристики деталей, то это можно сделать с помощью элемента меню Feature – Edit или кнопки Edit Feature, выбрав в панели состояния требуемую деталь при помощи мыши.

Для задания физических свойств деталей необходимо перейти в модуль **PROPERTY**. В окне **Edit Material** создайте материал *Plastic Metal* при помощи известных команд меню **Material – Create**, у которого следующие упругие характеристики: *Density* ρ =7850 (кг/мм³), *Young's Modulus* E=2e+7 МПа, *Poisson's Ratiov*=0.3. Пластические характеристики материала задаются, используя закладки **Mechanical – Plasticity – Plastic** так, как показано на **рисунке 6-1**.

Yield	Plastic		
3000	0		
3400	0.03		
4000	0.07		
4500	0.1		
4800	0.15		
5100	0.2		
5300	0.25		
5400	0.3		
5350	0.35		
5200	0.4		
5000	0.45		

Далее создайте однородное сечение для твердотельных элементов, используя элемент меню **Section – Create** или соответствующую кнопку. Перед тем как присвоить созданные свойства балке, необходимо убедится, что она в панели состояния является активной деталью.

Один из самых важных этапов это создание сборки деталей посредством их пространственных привязок. Перейдите в модуль **ASSEMBLY**. В сборке участвуют две детали, *Beam* и Ball, то есть шар и балка. Включение привязок в сборку осуществляется двойным кликом по элементу *Instances* дерева модели, или с помощью команд меню **Instance – Create** или кнопки **Instance Part**, как во второй главе. Теперь необходимо отцентрировать балку относительно шара. Надо переместить деталь против направления оси «Y» на 5.5 мм и против направления оси «Z» на 50 мм, воспользовавшись элементом меню

Instance - Translate или кнопкой **Translate Instance**. Укажите мышью на балку, она выделится красным цветом, и нажмите кнопку **Done**. Внизу, в окне на панели управления сначала задается начальная координата вектора переноса, а затем конечная. Совсем не обязательно, чтобы это были точки, принадлежащие деталям.

Например, введите пару точек (0.0, 5.5, 50.0) и (0.0, 0.0, 0.0). После задания последней координаты деталь переносится в требуемое положение, которое надо подтвердить, нажав кнопку **ОК**.

В модуле **STEP** включите опцию нелинейного анализа *NIGeom* = *On* и создайте еще один шаг расчета, аналогичный имеющемуся, по умолчанию – Step-2. Описание его укажите как *Motion*.

Модуль INTERACTION еще не рассматривался подробно в данном руководстве. Как было сказано ранее, этот модуль служит для определения взаимодействий деталей в сборке, а также задания свойств этих взаимодействий. Новое взаимодействие задается двойным кликом по элементу Interactions в дереве модели, или командами меню Interaction – Create, либо кнопкой Create Interaction. Появляется окно Create Interaction (рисунок 6.2), в котором укажите для первого шага расчета Loading, *Types for selected step* как поверхностный контакт *Surface-to-surface contact (Standard)*. После выбора опций кнопкой Continue на экране задаются контактные зоны, главная (master) и подчиненная (slave). Сначала выбирается главная поверхность. Из двух контактных поверхностей главная поверхность должна быть более жесткой, в данной задаче это шар. На экране выбранная поверхность становиться красной.

Name: Int-1 Step: Loading Procedure: Static, General Types for Selected Step Surface-to-surface contact (Standard) Self-contact (Standard) Acoustic impedance
Step: Loading Procedure: Static, General Types for Selected Step Surface-to-surface contact (Standard) Self-contact (Standard) Acoustic impedance
Procedure: Static, General Types for Selected Step Surface-to-surface contact (Standard) Self-contact (Standard) Acoustic impedance
Types for Selected Step Surface-to-surface contact (Standard) Self-contact (Standard) Acoustic impedance
Surface-to-surface contact (Standard) Self-contact (Standard) Acoustic impedance
Continue Cancel

Если выбранная поверхность определяется плоскими элементами, или является абсолютно жесткой поверхностью, то необходимо определить, какая ее сторона будет находиться в контакте. После нажатия Done поверхности кнопки окрашиваются в фиолетовый (Purple) и коричневый (Brown) цвета. Необходимо выбрать одну из них, в данном примере фиолетовую, нажав на кнопку Purple на панели инструкций. Подчиненная зона может быть задана как поверхностью, так и группой **УЗЛОВ**. В данном случае подчинённая зона определяется поверхностью, и в панели инструкций надо нажать на кнопку Surface. Если на текущем требуемую виде в окне Viewport сторону поверхности выделить невозможно, так она перекрыта контактирующей стороной, не то

необходимо развернуть деталь так, чтобы была видна верхняя сторона балки, и выбрать ее выступающую часть. Развернуть сборку можно, используя панель видов, которая вызывается при использовании команд меню View – Views Toolbox... F8.

После выбора подчиненной поверхности кнопкой **Done** в окне *Edit Interaction* (рисунок 6.3) необходимо задать другие свойства соединения. Немаловажное значение имеет задание параметров подгонки узлов, которая необходима при проникновении главной поверхности в подчиненную поверхность. В секции **Slave Node Adjustment** требуется выбрать опцию **Adjust only to remove overclosure** (подгонять только проникающие узлы). Формулировку проскальзывания (*Sliding Formulation*) задайте конечное проскальзывание - *Finite Sliding*.

Edit Interaction
Name: Int-1
Type: Surface-to-surface contact (Standard)
Step: Loading (Static, General)
Master surface: (Picked)
Slave surface: (Picked)
Sliding formulation: 💿 Finite sliding 🔿 Small sliding
Discretization method: Node to surface
Exclude shell/membrane element thickness
Degree of smoothing for master surface: 0.2
Use supplementary contact points:
Constraint position: 6 Node centered C Face centered
Contact tracking: $lacksquare$ Single configuration (state) $lacksquare$ Two configurations (path)
Slave Node/Surface Adjustment Clearance
C No adjustment
Adjust only to remove overclosure
C Specify tolerance for adjustment zone: 0
C Adjust slave nodes in set:
Tie adjusted surfaces
Note: Slave surface will be adjusted to be precisely in contact with the master surface at the beginning of the analysis.
Contact interaction property: Create
Options: Interference Fit
Contact controls: (Default)
ок Рисунок 6-3 Сапсе

Эти свойства задаются при использовании команд меню Mechanical _ Tangential **Behavior** Mechanical – Normal Behavior, соответственно. Для Tangential Behavior задайте формулировку Friction Formulation как Penalty, укажите направленность Directionality Isotropic изотропной И введите коэффициент трения Friction Coefficient = 0.05. Для Normal Behavior оставьте настройки, используемые по умолчанию. Закройте все окна нажатием кнопок OK.

В модуле **LOAD** шар необходимо закрепить по всем степеням свободы, применив граничное условие *Encastre*. Это условие должно присутствовать на

Для задания механических свойств соединения необходимо в окне Edit Interaction нажать кнопку **Create** или кнопку **[†]Create** Interaction Property. Появляется одноименное окно, в котором задается тип взаимодействия – контакт Contact. После задания типа взаимодействия, необходимо определить свойства контактного взаимодействия в Contact Property (Рисунок окне Edit 6.4). возникающем по нажатию кнопки **Continue**. В данной задаче достаточно определить касательное взаимодействие и нормальное.

Edit Contact Property
Contact Property Options
Tangential Behavior
Normal Behavior
Mechanical Thermal Delete
Tangential Behavior
Friction formulation: Penalty
Friction Shear Stress Elastic Slip
Directionality: 💿 Isotropic 🔘 Anisotropic (Standard only)
Use slip-rate-dependent data
Use contact-pressure-dependent data
Use temperature-dependent data
Number of field variables: 0 📩
Friction Coeff 0.05
ок Сапсе Сапсе

начальном шаге (*Initial*) и распространяться на все остальные шаги интегрирования. Условие задаётся, используя опцию **Create** в **Boundary Condition Manager.** Тип граничного условия для всех шагов *Symmetry/Antysymmetry/Encastre*. В качестве области применения граничного условия, необходимо использовать не весь шар, а только его опорную точку *Reference Point*.

В качестве воздействия – имитации падения шара – задается перемещение грани балки вдоль оси "Y". Для этого также используйте **Boundary Condition Manager**, в котором на шаге Motion на боковом свободном торце балки задайте граничное условие типа *Displacement/Rotation* – перемещение по оси «Y» на 10 мм, то есть U2 = 10. Помимо воздействия необходимо закрепить боковые грани балки от перемещений вдоль оси «Z» и вращения вокруг оси «X» и «Y». Для этого на шаг *Initial* задайте граничное условие *Symmetry/Antysymmetry/Encastre* типа ZSYMM, которое распространяется на все шаги анализа. Всего должно быть 4 граничных условия, включая заделку торца балки. Она наследуется из файла, полученного ранее, однако объект, к которому она приложена, уже удален. Выделите BC-1 в менеджере граничных условий и нажмите кнопку *Edit.* ABAQUS выдаст предупреждение и предложит вам заново задать граничное условие, для

чего нажмите кнопку Yes. В появившемся окне Edit Boundary Condition нажмите кнопку Edit Region, после чего выберите для заделки удаленный от шара торец балки.

Перейдите в модуль **MESH**. От разбиения сетки в контактных задачах очень сильно зависит сходимость решения. Правильно созданная сетка может значительно сократить время решения. Сначала проводится разбиение главной поверхности. Сетка здесь должно быть более крупной, чем на подчиненной поверхности. Используя команды меню **Seed – Instance** или кнопку **Seed Part Instance** задайте размер элемента по периметру шара равным 2 мм. Далее с помощью кнопки **Assign Mesh Controls** или вызова команд меню **Mesh – Controls** измените тип объемных элементов на треугольники *TRI*. Создание сетки по шару произведите обычным образом, используя команды меню **Mesh – Instance**.

В свою очередь, сетка балки в зоне контакта должна быть более мелкой. Для того, чтобы измельчить новую сетку, необходимо разбить ее посредине на две подобласти. Эта операция проводится в три этапа. Сначала создается вспомогательная плоскость, направляющая для разбиения, потом проводится разбиение на подобласти, после чего можно строить конечноэлементную сетку. Построение направляющей плоскости осуществляется с помощью команд меню **Tools – Datum**. В появившемся окне **Create Datum** задайте тип направляющей как плоскость **Plane** и метод ее построения **Point and Normal**. Выбранный метод требует задать точку и нормаль и может быть вызван при использовании кнопки **Create Datum**: **Plane by Edge**. Точка выбирается посредине балки, а в качестве нормали одно из ее длинных ребер. На экране плоскость будет отображена желтой прерывистой линией. Используя вспомогательную плоскость, можно провести разбиение балки на две половины. Для этого необходимо снова воспользоваться элементом меню **Tools – Partition**. Выбирается тип разбиваемого объекта – *Cell* и метод - *Use datum plane*. Тот же результат можно получить, нажав на кнопку **Partition Cell**: **Use Datum Plane**.

На экране выбирается созданная вспомогательная плоскость, после нажатия кнопки **Create Partition** она автоматически разбивает балку – единственный деформируемый объемный объект.

Не забудьте нажимать кнопку **Cancel** для завершения каждой операции! После разбития на подобласти на балке можно создавать сетку. Для начала задается предварительное разбиение модели. Глобальное разбиение проведите с помощью опции **Seed – Instance**. Необходимо на экране указать на разбиваемую деталь и задать приблизительный размер элемента – 0.25 мм. Этот размер выбирается из условия размещения 4 элементов по толщине пластины, 2 элементов недостаточно для достижения сходимости. Такая сетка слишком густая, и достаточно иметь подробное разбиение только в зоне контакта. Для того чтобы загрубить сетку в зонах, отдаленных от зон контакта, необходимо воспользоваться опцией по направленному сгущению сетки. Вызывается эта опция с помощью элемента меню **Seed – Edge biased** или кнопки **Seed edge: Biased.** На экране выбираются продольные ребра балки (8 ребер). На ребра надо указать в области, близкой к середине детали, там, где будет производиться сгущение сетки. В панели инструкций вводится соотношение между максимальной и минимальной длиной элементов на ребре, а также количество элементов. Соотношение между длинами задается равным 4, количество элементов 40.

Можно также загрубить сетку по ширине пластины. На экране необходимо выбрать 8 ребер на торцах. Изменить разбиение с помощью элемента меню **Seed - Edge By Number** или соответствующей кнопки. В окне инструкций задайте количество элементов, равное 4.



Если вы пользуетесь **Abaqus Student Edition**, Вам следует помнить про ограничение количества узлов, в данном случае измените размеры элемента, тем самым изменив количество узлов.

Прежде чем приступить непосредственно к генерации сетки, необходимо определить тип элементов, которые будут участвовать в ее создании. Для этого используется команды меню Mesh – Element Type или кнопки Assign Element Type. На экране выберите с помощью мыши подобласти, для которых надо определить тип элементов – обе части балки. А в окне Element Туре определите характеристики элементов следующим образом: библиотека Standard, семейство 3Dstress, порядок элементов Linear, тип НЕХ. Так заданный элемент классифицируется как СЗD8I. При этом необходимо обратить внимание, что в задачах контакта с изгибом лучше всего использовать элементы типа Incompatible modes.

Создание сетки для балки следует производить по каждой ее половине отдельно, используя элемент меню **Mesh – Region** или кнопку **Mesh Region**.

Создание вычислительного процесса и запуск расчета произведите известным вам способом. Как всегда, имя файла задания и его описание должно быть уникальными. Например, Beam3D&Ball и *Roquelle* соответственно. Во время расчета можно просмотреть процесс его выполнения (отчет, записываемый в **.sta*-файл): записанные шаги и изменение шага, погрешности и так далее. А также, нажав на кнопку **Results**, можно автоматически загрузить уже рассчитанные результаты для просмотра.

На этом занятии мы рассмотрели особенности представления результатов в контактных задачах. По умолчанию в САЕ для контактных задач задается вывод контактных напряжений, а также зазора между контактными поверхностями.

Для вывода поля контактных напряжений необходимо воспользоваться опцией **Result – Field Output**, в поле переменных *Primary Variables* выбирается переменная *CPRESS Contact pressure at surface nodes*. После выбора данной функции необходимо развернуть деталь так чтобы была видна область контакта. Используя элемент меню **Animate – Time History** можно получить анимированную картину деформирования пластины по шагам интегрирования.

Расстояние между контактирующими поверхностями можно вывести в виде поля, также используя элемент меню **Result – Field Output**, в котором в качестве **Primary Variables**, задается *COPEN – Contact opening at nodes*.

Глава 7: Моделирование контактной задачи на примере взаимодействия консольно-закрепленной балки и лежащего на ней упругого цилиндра, нагруженного поперечной силой. Запись результатов анализа в видеоклип.

На этот раз будем решать контактную динамическую задачу. Откройте все тот же файл с балкой и сохраните его, как всегда, под новым именем. Положим на нее цилиндр и посмотрим, что произойдет, когда к нем будет приложена нагрузка. На этот раз цилиндр будет не абсолютно жестким телом, а упругим, но намного более жестким по сравнению с балкой. Итак, имеется модель консольно заделанной упругой балки, на которую действует перерезывающая сила, и статический шаг расчета. До начала действия силы необходимо задать контакт балки с лежащим на ней цилиндром, на который действует поперечная сила. После воздействия силы тип шага расчета надо поменять на динамический, так как необходимо проследить движение цилиндра во времени.

В модуле **PART** при помощи описанных ранее действий создайте новую деталь путем выдавливания Extrusion из окружности цилиндра. Все действия такие же, как и при создании балки, с тем лишь отличием, что в качестве шаблона для выдавливания надо задать окружность

радиусом 5 и с центром в начале координат при помощи команд меню Add – Circle или кнопки **Create Circle: Center and Radius**. Для удобства приложения силы задайте окружность так, чтобы нажатие кнопки мыши, задающее ее радиус, приходилось на самую верхнюю точку окружности. Также можно задать окружность путем ввода координат центра (0.0,0.0) и точки на ее периметре (0.0, 5.0). Высота цилиндра (глубина выдавливания *Extrusion Depth*) равна 10, то есть вдвое шире грани балки.

В модуле **PROPERTY** задайте новый материал Alloyed Steel (легированная сталь) со свойствами Young's Modulus E = 9.9e+10, Poisson's Ratio v = 0.25, Density $\rho = 7800 \text{кг/м}^3$, создайте соответствующее сечение и присвойте его цилиндру.

В модуле **ASSEMBLY** создайте сборку из балки и цилиндра. Поскольку балка уже включена в сборку, выделите только цилиндр, по умолчанию – Part-2, и нажмите **OK**. Альтернативно, можно было создать новую сборку из двух деталей, а затем удалить старую, как это делалось в предыдущей главе. Обратите внимание на то, что цилиндр должен лежать на балке, для этого его надо повернуть на 90° относительно оси «Y» и сдвинуть по этой оси на 5.5 мм вверх, на 5 мм вперед вдоль оси «X» и на 20 мм вдоль балки по оси «Z». Делается это при



помощи команд меню Part – Instance – Rotate и Part – Instance – Translate соответственно. Также можно использовать кнопки 🗳 Rotate Part Instance и 🖆 Translate Part Instance.

Чтобы повернуть цилиндр, сначала задайте ось вращения – единичный орт «Y» путем ввода координат (0.0,0.0,0.0) и (0.0,1.0,0.0), а затем укажите угол поворота *Angle of rotation* = 90. Подтвердите новое положение *Position of Instance* нажатием кнопки **OK**. Чтоб переместить его, введите координаты вектора переноса (0.0,0.0,0.0) и (-5.0,5.5,20.0), и также подтвердите новое положение нажатием **OK**.

В модуле **STEP** должен быть изменен шаг расчета – статический (по умолчанию – Step-1, он уже наследован из предыдущей базы данных) удалите кнопкой **Delete** в соответствующем менеджере **Step Manager**, и на его месте назначьте новый динамический шаг расчета *Dynamic, Implicit*, с соответствующим описанием, *Rolling*. Время расчета *Time Perriod* задайте равным 24 с. Нажмите закладку **Incrementation** и задайте *Type* как *Fixed*, после чего введите *Increment Size* = 0.1, и *Maximum Number of Increments* = 400.

Перейдите в модуль **INTERACTION**. Подобно тому, как это делалось на предыдущем занятии, задайте контакт между балкой и цилиндром, с формулировкой трения *Friction Formulation* без проскальзывания *Frictionless* на шаге Initial. Не забудьте, что главной является внешняя поверхность цилиндра! Верхняя поверхность балки – подчиненная, несмотря на ее закрепление, поскольку он менее жесткая.

В модуле LOAD уже имеется одно граничное условие для балки. Теперь добавьте граничное условие Create Boundary Condition на шаге Initial, чтобы ограничить перемещения цилиндра относительно поверхности контакта. Для этого выберите тип *Symmetry/Antisymmetry/ Encastre* и укажите мышью, удерживая клавишу Shift, две боковых грани цилиндра, потом нажмите кнопку Done и задайте граничное условие как *Xsymm*. Затем надо задать нагрузки. На динамическом шаге расчета приложите силу к цилиндру при помощи кнопки Create Load или соответствующих команд меню. В окне Create Load укажите тип нагружения *Types for Selected Step* как *Concentrated Force* из категории *Category* механических нагрузок *Mechanical*, при помощи мыши выберите, удерживая клавишу Shift, две верхних точки цилиндра и подтвердите ввод кнопкой Done, а в окне *Edit Load* задайте ее величину *CF2* = -200 (H), *CF3* = 100000 (H).

В модуле MESH надо измельчить верхнюю поверхность балки. Однако, на балке уже имеется старая сетка, ее надо стереть, использовав команд меню Mesh – Delete Instance Mesh или кнопку Melete Instance Mesh. Затем выделите всю балку при помощи мыши и нажмите кнопки Done, а потом ОК. Когда сетка исчезнет, при помощи команд меню Seed - Instance или кнопки Seed Part Instance задайте глобальный размер элемента на всей балке равным 1 мм, а затем команды меню Seed – Edge by Size или используйте соответствующую кнопку **Seed Edge By Size**, затем, удерживая клавишу **Shift**, выделите мышью 4 длинных ребра балки. Подтвердив выбор, введите размер элемента вдоль этих ребер равным 5 и снова подтвердите ваш выбор. После команды Mesh Part Instance вы увидите, как изменилась сетка на балке. Теперь аналогично постройте сетку для цилиндра, на этот раз использовав команду Seed – Edge by Number или соответствующую кнопку 👫 Seed Edge By Number, после чего выделите мышью задающие цилиндр окружности, удерживая клавишу Shift, и задайте количество элементов вдоль них равным 24. Далее сетка достраивается известным уже вам способом.

В модуле **JOB** создайте новый вычислительный процесс с уникальным именем Beam&Cyl-1. Запустите его кнопкой **Submit** и пронаблюдайте полученные результаты в режиме анимации, нажав кнопку **Animate Scale Factor** или при помощи команд меню **Animate – Scale Factor**.

Полученный процесс можно переписать из модуля **VISUALIZATION** в видеоклип, что бывает особенно удобно при демонстрации результатов полученных расчетов, когда нет возможности воспользоваться пакетом **ABAQUS** непосредственно. Для этого используйте команды меню **Animate – Save as**. Укажите область захвата *Capture* как видимое окно *Current viewport*. Присвойте ожидаемому файлу уникальное имя Rolling Cyl, и задайте его расширение как *.*avi*, после чего нажмите кнопку OK. Теперь можно выйти из ABAQUS/CAE и открыть результат расчета в любой подходящей программой.

Глава 8: Моделирование статической линейной задачи на примере нагрева и охлаждения консольно закрепленной балки. Исследование возникающих температурных напряжений.

Рассмотрим такой вид статического нагружения, как тепловое воздействие. При теплопередаче температура U изменяется в зависимости от времени пропорционально теплопроводности материала: $U_t = Q - c \cdot \Delta U$. Здесь с – теплопроводность, Δ – оператор Лапласа, Q – тепловой поток.

Произведите те же действия, что и в начале пятого занятия так, чтобы модель состояла из консольно заделанной балки без каких-либо нагрузок. В модуле **PROPERTY** войдите в менеджер свойств, выберите имеющийся материал и нажмите кнопку **Edit.** Необходимо добавить дюрали новые свойства. В **ABAQUS** теплопроводность, строго говоря, отличается от си задается на единицу длины (для сечения). Помимо того, **ABAQUS** для определения величины с объемного тела требует задания теплового параметра $q = W_U$, где W - внутренняя энергия на единицу объема. Выберите закладку**Thermal**и определите теплопроводность*Conductivity*= 3750 Дж/°С*м*с, а также тепловой параметр*Specific Heat*= 0.15 Дж/°С*м³. Подтвердите выбор кнопкой**OK**и выйдите из менеджера свойств.

В модуле **STEP** удалите имеющийся шаг расчета и замените его теплопереносом *Heat transfer*. Время расчета *Time Period* задайте равным 4 с. Нажмите закладку **Incrimination** и задайте *Type* как *Fixed*, после чего введите *Increment Size* = 0.15, и *Maximum Number of Increments* = 100. Можно также изменить описание *Description* на, например, *Thermal Load*. Затем войдите в менеджер выходных данных *Field Output Manager* и выделите в нем существующее поле переменных, по умолчанию – F-Output-1. После нажатия кнопки **Edit** выберите в появившемся окне в качестве расчетных переменных, помимо уже имеющихся, температуру TEMP в точках интегрирования из раздела **Thermal**. Подтвердите выбор кнопкой **OK** и выйдите из менеджера.

Перейдите в модуль LOAD и известным вам способом создайте новую нагрузку. В появившемся окне Create Load выберите категорию нагрузки Category – Thermal и тип Type for Selected Step - Surface heat flux. При помощи мыши укажите область нагрева – свободный торец балки и снова подтвердите выбор. В окне Edit Load задайте Distribution как Uniform, то есть однородное распределение теплового потока. Укажите величину этого потока Magnitude равным 12000 Дж/с*м³. Подтвердите выбор нажатием **OK**.

В модуле **MESH** удалите имеющуюся сетку для балки. Нажмите кнопку **Assign Element Type** или используйте команды меню **Mesh – Element Type**, и в появившемся окне задайте семейство *Family* элементов как *Heat transfer*, а тип *Element Type* – как конвективно-диффузионный *Convection/Diffusion*. Теперь заново постройте сетку для всей балки, оставляя уже имеющееся разбиение.

В модуле **JOB** создайте новый вычислительный процесс с уникальным именем, например, *Beam3D-Heat*, и запустите его при помощи описанных ранее действий.

Теперь снова войдите в модуль **LOAD**. В менеджере нагрузок выберите имеющуюся нагрузку, по умолчанию – Load-1, и нажмите кнопку **Edit**. Измените знак потока – пусть балка охлаждается. Для этого задайте его величину *Magnitude* равной -1000 Дж/с*м³. Подтвердите ввод и создайте новый вычислительный процесс, например, *Beam3D-Freeze*. В модуле **VISUALIZATION** сравните изменения температур нагретой и охлажденной балок. Видно, что ближе к заделке элементы практически не меняют свою температуру. При помощи команд **Result – Field Output** выберите температуру TEMP в качестве первичной переменной *Primary Variable* и нажмите **OK**. Откройте в другом окне результат предыдущего вычислительного процесса и сравните их.

Глава 9: Моделирование статической линейной задачи на примере электростатического взаимодействия консольно закрепленной балки с заряженными телами различной геометрической формы.

Рассмотрим еще один вид взаимодействий – электростатические силы. Как известно, на заряд q в поле E действует сила Кулона $F=q^*E$, где $E=Q/4\epsilon\epsilon_0 r^2$. Сообщим балке заряд и, поместив ее в поле, пронаблюдаем за ее поведением. В **ABAQUS** для восстановления напряжений необходима модель на основе материала с пьезоэлектрическими свойствами. Поле будем для простоты создавать наведенным в диэлектрическом образце.

Откройте файл с трехмерной моделью балки, сохраните его под новым именем и отредактируйте так же, как и на предыдущей главе, сняв все нагрузки. Создайте новую деталь в модуле **PART**, так же, как вы строили балку, с единственным отличием – это должен быть куб 20*20.

В модуле **PROPERTY** задайте те же свойства, что и для балки. Можно непосредственно присвоить кубу имеющееся сечение, созданное ранее, по умолчанию *Section-1*. Теперь необходимо отредактировать сам материал, сделав его диэлектриком. Для этого откройте окно **Edit Materia**/ для уже имеющегося материала, нажмите закладку Other, выберите *Electric* и добавьте ему следующие свойства: *Piezoelectric* – симметричный трехмерный тензор 3*3*3 задается компонентами коэффициентов пропорциональности между напряженностью и напряжением в элементе $e_{ijk} = 12, 0, 0, 2, 4, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0;$ *Dielectric*– задается величиной диэлектрической проницаемости = 6.

Перейдите в модуль **ASSEMBLY** и создайте новую сборку из имеющихся деталей, просто добавив куб. Перенесите его вдоль оси «Z» на 50 мм и вдоль оси «Y» на 80 мм, удалив от балки, при помощи команд меню *Part – Instance – Translate* или соответствующей кнопки. Вектор переноса задайте, например, как (0.0,30.0,90.0).

В модуле **INTERACTION** определите взаимодействие типа *Surface-to-Surface contact (Stanard)* известным вам способом. В качестве главной поверхности возьмите внешнюю грань куба, ближайшую к балке, в качестве подчиненной – внешний торец балки, ближайший к кубу. В окне Edit Interaction в разделе *Slave Node Adjustment* выберите отказ от взаимной подгонки узлов *Do not adjust Slave Nodes*. Проскальзывание задайте как *Small Sliding*, коэффициент трения в формулировке *Penalty* введите равным 0.12, а в опциях проникающего взаимодействия *Normal Behavior* укажите Use augmented Lagrange.

Затем перейдите в модуль LOAD и закрепите куб, приложив граничное условие Symmetry/Antisimmetry/ Encastre к его верхней грани, а в качестве нагрузки задайте электростатическое взаимодействие, сообщив балке заряд 1 мКл. Для этого создайте новую нагрузку и в окне Create Load выберите категорию нагружения Category как Electrical, а тип ее *Type for Selected Step* как Concentrated Charge. В окне Edit Load выберите при помощи мыши верхнюю точку посередине свободного торца балки – на ребре, построенном на втором занятии для получения точки приложения механической силы, с подтверждением ввода кнопкой Done. Затем введите соответствующую величину заряда Magnitude = 1e-6 и подтвердите ввод кнопкой OK.

В модуле **MESH** удалите имеющуюся сетку для балки. Затем постройте новые сетки. В качестве опции определения размера элемента выберите *Seed Edge By Number*, задав по 4 элемента вдоль ребра куба и 16 элементов вдоль длинных ребер балки. Тип элементов возьмите C3D8E, задав семейство *Family* элементов для куба и балки как *Piezoelectric*.

Перейдите в модуль **JOB**, в котором создайте новый вычислительный процесс с уникальным именем, например, Charge-1. Запустите его кнопкой *Submit* и проследите за возникающими

деформациями и напряжениями в обеих деталях, перейдя в модуль VISUALIZATION при помощи нажатия кнопки **Results**. Куб остается на месте, и напряжений в нем практически не возникает, что объясняется его поперечным размером относительно балки, которая, находясь в его наведенном находящимся на ней зарядом поле, начинает притягиваться к кубу.

А теперь сохраните вновь построенную базу данных по модели, повторите все произведенные действия с той лишь разницей, что в качестве куба постройте шар так, как это было описано на пятом занятии, радиусом 5 мм, и главной поверхностью при взаимодействии сделайте всю внешнюю поверхность шара. При построении сетки для шара возьмите размер элемента по периметру равным единице и не забудьте использовать пьезоэлектрические элементы типа HEX. Присвойте новому вычислительному процессу уникальное имя, например, Charge-2, и сравните полученные для шара и куба результаты, открыв в соседних окнах соответствующие *.odb-файлы. Обратите внимание на то, что напряжения, возникающие в балке, не линейны, в отличие от аналогичного нагружения перерезывающей силой.

Глава 10: Технология моделирования роста трещины - XFEM.

В данной главе описываются основные этапы работы с технологией XFEM. Рассматривается задача о статическом нагружении пластины с начальной краевой



трещиной. Геометрическая модель в сборке представлена на рисунке 5.1. На правую грань заданы ограничения по перемещениям, а к верхней и нижней приложено растягивающее усилие. Краевая трещина расположена горизонтально и начинается на левой грани пластины.

Была выбрана линейно-упругая модель материала, качестве a В критерия распространения трещины – условие превышения заданного уровня напряжений (силовой критерий).

Рис. 5.1

1. Построение геометрической модели.

1.1 Геометрическая модель пластины:

Создадим новую деталь. Для этого используем инструмент Create Part **5**. В появившемся окне Create Part (рис. 5.2) дайте детали имя *Plate*, и примите следующие установки: **2D** (двухмерного), **Deformable** (деформируемого) тела и **Shell** (оболочка) в качестве базового свойства. В поле **Approximate size** введите 1. Щелкните **Continue**, для перехода к созданию чертежа.



В появившемся рабочем поле, воспользовавшись инструментом , создаём квадрат со стороной 1 м (рис. 5.3). Завершите создание чертежа в режиме Эскиз, нажав кнопку **Done** в панели ввода.



Рис. 5.3

1.2 Геометрическая модель трещины:

Зададим геометрию трещины. Для этого используем инструмент Create Part **1**. В появившемся окне Create Part (рис. 5.4) дайте детали имя Crack, и примите следующие установки: 2D (двухмерного), Deformable (деформируемого) тела и Wire в качестве базового свойства. В поле Approximate size введите 1. Щелкните Continue для перехода к созданию чертежа.



В появившемся рабочем поле построим прямую горизонтальную линию длиной 0.1 м, которая будет представлять собой геометрию трещины. Для этого используем инструмент **Create Lines Connected.** Теперь необходимо задать координаты двух точек в поле ввода, появившемся в панели ввода - (-0,5; 0) и (-0,4; 0). После выполнения всех геометрических построений нажмите кнопку **Done.**

2. Присвоение свойств материала и сечения к геометрии пластины.

Создадим материал с именем *Metal*, с модулем упругости 70 GPa и коэффициент Пуассона 0.3. В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру *Materials*, чтобы

создать новый материал. В появившемся окне Edit Material, задайте имя материала *Metal*, в выпадающем меню выберите Mechanical->Elasticity->Elastic и введите в соответствующих полях: 70Е9 и 0.3.

Затем зададим критическое напряжение при достижении, которого трещина начинает расти. Для этого в окне Edit Material выберите Damage for Separation Laws=> Traction Maxps Damage и введите в соответствующем поле значение критического напряжения - 500 MPa. Шелкните OK. чтобы подтвердить создание материала (рис. 5.5).

ал. В	🔲 Edit Ma	terial					
Edit	Name: Meta	al					
ериала	Description:						
меню							Edit
anical-	Material Be	haviors					
дите в	Elastic						
70Е9 и	Maxps Dam	nage					
ueckoe							
	<u>G</u> eneral	<u>M</u> echanical	<u>T</u> hermal	<u>O</u> ther			Delete
жении,	C Maxos Dar	Elasticity		•			
чинает	T-L	Plasticity	ior Ductilo M	Motola N			
e Edit	Tolerance:	Damage I	or D <u>o</u> ctile r	Separation Laws	l Ouade Da	mage	options
ige for	Use ter	Damage I	or Fiber-Re	einforced Composites 🕨	<u>M</u> axe Dam	nage	
aws=>	Number of	Damage I	or Elastom	ers 🕨	Q <u>u</u> ads Dai	mage	
ците в	Data —	De <u>f</u> ormat	ion Plasticit	ÿ	M <u>a</u> xs Dam	iage	
ачение	Ma	Expansio	n		Maxp <u>e</u> Da Maxos Dai	mage mage	
ı - 500	1	<u>B</u> rittle Cr	acking				
чтобы					-		
епиала							
opnana							
Рис. 5.5		ОК			Cancel)	

Теперь перейдём к определению сечения. В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Sections, чтобы создать новое сечение. В диалоговом окне Create Section создайте сечение с именем *Plate*, типа Solid, Homogoneous и щелкните Continue. Появится окно свойств сечения Edit Section (рис.5.6). В качестве материала выберите *Metal*. Установите флажок для Plane stress/strain thickness,

Edit S	iection		
Name: Pl. Type: Sc	ate Ilid, Homogene	eous	
Material:	Metal	~	Create
Plane :	stress/strain th	nickness: 0.01	
	ок	Car	icel

введите значение толщины пластины 0.01 и нажмите ОК.

Присвойте созданное сечение детали *Plate* <u>пластине</u>, воспользовавшись клавишей Assign Section **21**.

Рис. 5.6
3. Сборка модели.

В Дереве Модели раскройте контейнер Assembly. Затем дважды щелкните по контейнеру Instances. Появится диалоговое окно Create Instance (рис. 5.7), содержащее список всех деталей в текущей модели. В нём для добавления в сборку выберите Crack, Plate и щелкните Apply.



4. Задание шага анализа.

В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Step. В окне Create Step задайте имя нового шага анализа – Static. Примите тип Static, General и щелкните Continue (рис. 5.8). В появившемся окне Edit Step, оставьте все настройки решателя без изменений и нажмите Ок.

		5	
Name:	Static		
Insert	new step	after	
Initial	-		
Static			
Proced	ure type:	General	V
	d temp-d	icolacement	
Couple	va comp a	spiacement	
Couple	nic, Implici	t.	
Couple Dynam Geosta	nic, Implici atic	t	
Couple Dynam Geosta Soils	nic, Implici atic	t.	
Couple Dynam Geosta Soils Static,	nic, Implici atic General	t	
Couple Dynam Geosta Soils Static, Static,	nic, Implici atic General Riks	t.	

Сформируем запрос на вывод данных. Для этого нужно воспользоваться контейнером Field Output Output Requests в Дереве Модели. В появившемся окне нужно к выходным переменным по умолчанию добавить переменную PHILSM (Failure/Fracture => PHILSM) (функция расстояния, для описания поверхности трещины).

Рис. 5.8

5. Задание трещины и контактных взаимодействий.

Перейдите в модуль Interaction. Используя главное меню (рис. 5.9), откройте окно Create Crack (рис. 5.10) для задания трещины. Выберите тип создаваемой трещины XFEM. Нажмите Continue.



Рис. 5.9



Теперь нужно выбрать область, в которой находится трещина (рис. 5.11):



В появившемся окне **Edit Crack** (рис. 5.12). выберите расположение трещины. Нажмите **Select.**

ск (рис.	🗖 Edit Crack 🛛 🛛 🔀
ещины.	Name: Crack-1
	Type: XFEM
	Region: (Picked) 📕 Edit)
	Allow crack growth
	Crack location:
	🔿 None 💿 Specify: 📑 Select
	Specify contact property:
Рис. 5.12	OK Cancel

Теперь нужно выбрать заданную ранее начальную краевую трещину (рис. 5.13):



Нажните кнопку Done.

Рис. 5.13

После определения трещины необходимо задать взаимодействия в модели. В Модели дважды щелкните Дереве по контейнеру Interaction. В появившемся окне Create Interaction, на начальном шаге Initial выберите XFEM crack growth и нажмите **Continue** (рис. 5.14).

🗖 Cre	ate Interaction	×
Name:	Int-1	
Step:	Initial 💌	
Procedu	ure:	
Type:	s for Selected Step	
Gener Surfa Self-c	rai contact (Standard) ce-to-surface contact (Standard) :ontact (Standard)	
XFEM	crack growth	
Elasti	: symmetry (Standard) c foundation	
Actua	itor/sensor	
Acous	stic impedance	
	Continue Cancel	

Ρ	ис.	5	•	4

В появившемся окне Edit Interaction нажмите Ok (рис. 5.15).

Рис. 5.15

🔲 Edit In	teraction	×
Name: Int-	i	
Type: XFE	M crack growth	
Step: Initi	al	
XFEM crack:	Crack-1	*
💽 Allow cra	ack growth in this step	
ОК	Cancel	

6. Задание граничных условий и нагрузок.

На правую грань пластины накладываются ограничения по перемещениям. Для

моделирования данного ГУ нужно в окне Create Boundary Condition выбрать тип Displacement/Rotation и нажать Continue (рис. 5.16).



Теперь щелкните по правой грани пластины и в появившемся окне Edit Boundary

Name: Fix	ed	
Type: Dis	placement/Rotation	
Step: Sta	tic (Static, General)	
Region: (Pid	:ked)	
CSYS: (GI	obal) Edit Create	
Distribution:	Uniform	Create
🗹 U1:	0]
🕑 U2:	0	
UR3:	3	radians
Amplitude:	(Ramp)	Create
Note: The main	displacement value will be tained in subsequent steps	a Creatern
Note: The main	displacement value will be tained in subsequent steps	ancel

Condition зафиксируйте все степени свободы (рис. 5.17).

Рис. 5.17

Для моделирования растягивающих усилий нужно в окне **Create Load** выбрать тип **Pressure** и нажать **Continue** (рис. 5.18)



Рис. 5.18

Кликните по верхней и нижней грани пластины и нажмите Done. После этого в окне Edit Load введите численное значение усилия задаваемого как давление -1Е+008 Па (рис 5.19).

Name: Loa Type: Pre Step: Sta Region: (Pic	d-1 ssure tic (Static, General) ked) Edit Region		
Distribution: Magnitude:	Uniform -1E+008	*	Creat
Amplitude:	(Ramp)	*	Creat

Рис. 5.19

Общий вид модели с приложенной нагрузкой и граничными условиями



представлен на рисунке 5.20:

Рис. 5.20

7. Создание конечно-элементной модели.

Перейдём к модулю Mesh. С учетом ограничения на количество конечных элементов, в Global Seeds введите размер элемента – 0.035 (рис. 5.21).

🗖 Global Seeds	
Sizing Controls	
Approximate global size: 0.035	
Curvature control	_
Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1	
(Approximate number of elements per circle: 8)	_
Minimum size factor (as a fraction of global size):	
Use default (0.1) O Specify (0.0 < min < 1.0) 0	.1
OK Apply Defaults Can	cel

Произведите разбиение пластины на конечные элементы (рис. 5.22):



Рис. 5.22

8. Создание и инициализация задания.

Чтобы создать задание на расчёт в *Дереве Модели* дважды щелкните по контейнеру **Jobs**. Появится диалоговое окно **Create Job**. Назовите задание - *Crack*, и щелкните **Continue** (рис. 5.23).



Рис. 5.23

Появится окно свойств задания. Щелкните **ОК**, чтобы принять все установки по умолчанию. При помощи инструмента **Job Manager III** откройте окно **Job**

Job Manage	er				×
Name	Mode	1	Туре	Status	Write Input
Crack	Model	1	Full Analysis	None	Data Check
					Submit
					Continue
					Monitor
					Results
					Kill

откройте окно Job Manager. И в появившемся окне выберите Submit (рис. 5.24), чтобы запустить задание на расчёт. После завершения расчёта, вы сможете просмотреть результаты с помощью модуля Visualization. В Job Manager щелкните по кнопке Results, и Abaqus/CAE откроет результаты расчёта в модуле Visualization и выведет на экран недеформированную форму модели.

9. Визуализация результатов расчёта.

Распределение напряжений по Мизесу:



Поле перемещений



Как видно из рисунка 5.25, для данного расчетного случаю напряжения в вершине трещины не достигают критического значения, поэтому распространения трещины не происходит. Для прослеживания пути распространения краевой трещины необходимо либо увеличивать нагрузку, действующую на модель, либо уменьшать значение критического напряжения в свойствах материала.

Данная задача является учебной, и даёт Вам возможность варьирования исходных параметров модели:

- 1. Геометрия модели.
- 2. Геометрия трещины и их число.
- 3. Модель материала и критерий распространения трещины.
- 4. Задание специфичных свойств контакта в области распространения трещины.
- 5. Изменение граничных условий и нагрузок, действующих на модель.
- 6. Изменение качества и плотности КЭ сетки



Путь распространения трещины:

Рис. 5.27

На рисунке 5.27 показан путь распространения начальной краевой трещины при следующих изменениях в исходной модели:

- 1. Начальная краевая трещина повёрнута на угол 30.
- 2. Значение критического напряжения: 100 МРа.

Глава 11: Импортирование/экспорт геометрии и моделей

Импортирование детали в Abaqus/CAE из CAD программы проектирования - не всегда простой процесс. Возможности успешного импортирования возрастут, если помнить об ограничениях возникающих при представлении геометрии в файл. Ниже перечислены типы файлов, которые могут быть импортированы в Abaqus/CAE и экспортированы из него:

3D XML (file_name.3dxml)

3D XML это формат разработанный Dassault Systèmes на базе языка XML для кодирования трехмерных изображений и данных. Этот формат является открытым и расширяемым, позволяет легко распространять через сеть и встраивать в существующие приложения трехмерные графические объекты. 3D XML позволяет многократно уменьшить размер файла по сравнению с традиционными базами данных. Для просмотра и интеграции файлов 3D XML вам потребуется 3D XML плеер от Dassault Systèmes. Так же вы можете просмотреть файлы 3D XML в CATIA V5. Вы можете экспортировать данные из зоны просмотра Abaqus/CAE в этот формат.

ACIS (file_name.sat)

ACIS - библиотека твердых тел моделируемых функциями Spatial, большинство продуктов автоматизированного проектирования поддерживает ACIS-формат. Вы можете импортировать и экспортировать модели ACIS-формата, кроме того, вы можете импортировать и экспортировать эскиз из файла с ACIS расширением.

AutoCAD (file_name.dxf)

Двухмерные профили, сохраненные в AutoCad (.dxf) файлах могут быть импортированы как автономные эскизы. Однако, Abaqus/CAE поддерживает только ограниченное число объектов AutoCad, и вы должны использовать этот формат, только если никакие другие форматы не доступны.

CATIA V4 (file_name.model, file_name.catdata, or file_name.exp)

CATIA - пакет программ автоматизированного проектирования разработанный IBM и Dassault Systems. Вы можете импортировать детали из CATIA-файлов, однако, вы не можете экспортировать детали из ABAQUS/CAE в формат CATIA.

CATIA V5 Elysium Neutral File или Elysium Neutral Assembly File (*file_name*.enf_abq or .eaf_abq)

Для переноса геометрий и сборок из CATIA V5 существует плагин генерирующий файлы геометрий и сборок в формате Elysium Neutral File (.enf) и Elysium Neutral Assembly File (.eaf) соответственно. Вы можете использовать это формат для переноса деталей и сборок из CATIA V5 в Abaqus/CAE.

CATIA V5 parts and assemblies (file_name.CATPart or .CATProduct)

С помощью опциональной надстройки CATIA V5 Associative Interface add-on для Abaqus/CAE вы можете импортировать файлы и сборки в формате CATIA V5.

I-DEAS Elysium Neutral File (file_name.enf_abq)

В Abaqus/CAE доступен plug-in который строит геометрию в формате I-Deas. Вы не можете экспортировать из ABAQUS/CAE в формат I-Deas.

IGES (file_name.igs)

IGES - нейтральный формат данных, разработанный для графического обмена между автоматизированным системами проектирования. Вы можете импортировать и экспортировать модели Iges-формата, кроме того, вы можете импортировать и экспортировать эскиз из файла с Iges расширением.

Parasolid (file_name.x_t, file_name.x_b, file_name.xmt_txt, or file_name.xmt_bin)

Parasolid - библиотека твердых тел моделируемых функциями разработанными «Unigraphics Solutions». Вы можете импортировать файлы данного формата ,но не можете экспортировать из Abaqus. CAD - программы поддерживающие данный формат: Unigraphics, SolidWorks, Solid Edge, FEMAP, и MSC.Patran.

STEP (file_name.stp)

СТАНДАРТ для обмена данными модели, (Международная Организация по Стандартизации 10303-1) который пытается преодолевать некоторые из недостатков IGES. ISO AP203 стандарт разработан(предназначен), чтобы обеспечить представление механического изделия всюду по его циклу жизни, независимому от любой специфической системы.

VDA-FS (*file_name*.vda)

Verband der Automobilindustrie Flachлn Schnittstelle (VDA-ФС) формат родившийся благодаря немецкой авто индустрии. VDA-FC и IGES файлы содержат математическое представление модели в формате ASCII; однако, стандарт VDA-FC концентрируется на информации по геометрии. Дополнительная информация, закрытая по IGES стандарту, типа измерений, текста, и цветов, не запасена в файле VDA-FC.

VRML (file_name.wrl)

"Язык Моделирования Виртуального мира " (VRML) - стандарт Международной Организации по Стандартизации, для трехмерных изображений в web-браузере или автономном VRML клиенте. Это - открытый, независимый, трехмерный язык моделирования на основе вектора, который кодирует машинно-генерируемую графику. Файлы VRML-ФОРМАТА могут быть во много раз меньшими чем типичные файлы базы данных. VRML файлы открываются программами CORTONA и COSMO.

Output database (output_database_ name.odb), ABAQUS/Standard and ABAQUS/Explicit input

files- форматы пакета Abaqus.

Когда вы импортируете твердую деталь, ABAQUS/CAE пробует создавать аналогичную твердую деталь. Точно так же, когда вы импортируете оболочную деталь, ABAQUS/CAE пробует создавать связанную оболочную деталь. Если деталь импортирована успешно, деталь считают действительной и точной. Однако, если точность первоначальной детали - меньше чем точность, используемой ABAQUS/CAE, деталь может быть неточна или недействительна. В большинстве случаев вы можете продолжить работать с неточной деталью; однако, вы не можете работать с недействительной деталью.

Вы можете импортировать деталь и впоследствии использовать набор инструментов в модуле **Part**, чтобы "отремонтировать" деталь и устранить неточности возникшие в следствие импорта в Abaqus/CAE. Альтернативно, вы можете импортировать деталь и восстановить ее в течение процесса импорта.

Во время процесса импорта ABAQUS/CAE выводит окно в котором вы можете изменить следующие параметры :

Name Repair Options Convert to analytical representation Stitch gaps Convert to precise representation (Название детали) (Опции восстановления) (Аналитическое представление) (Сшивание разрывов) (Преобразовать к четкому виду)

В большинстве случаев установки по умолчанию приводят к наилучшему результату. Приведем пример импортирования трехмерной балки рассмотренной в предыдущих главах. Для начала создадим трехмерную балку в одной из CAD программе поддерживающей вышеперечисленные форматы, пусть это будет SolidWorks.(Рисунок 10.1)



Рисунок 10-1

Сохраним балку в формате пригодном для импортирования в Abaqus (см. рис. 10.2).



Рисунок 10-2



Вернемся к Abaqus. В панели меню выберите FILE -> Import->Part в появившемся окне выберете файл с балкой и нажмите OK. Появиться окно изменения(восстановления) параметров детали(Рисунок 10.3), в нашем случае деталь простая поэтому не могло возникнуть неточностей в следствии импорта, нажмите OK, деталь импортирована. В нижнем окне сообщений вы увидите информацию о результатах импортирования, если возникнет ошибка или сообщение о невозможности импорта следует вернуться к окну изменения параметров детали и воспользоваться опциями изменения параметров детали.

Рисунок 10-3

Глава 12. Дополнительные методы создания и анализа моделей:

В данной главе создадим и рассмотрим более сложную модель.

11.1 Обзор



Рисунок 11-1

В этой главе вы создадите составную деталь из двух проушин, соединенных болтом. Финальная сборка детали представлена на рис.11-1

Создание модели состоит из следующих этапов:

"Создание первой проушины," 11.2

" Назначение свойств секции проушины петли," 11.3

"Создание и модификация второй проушины" 11.4

"Создание болта,"11.5

"Сборка модели,"11.6

"Определение шагов анализа,"11.7

"Создание поверхностей для использования в контактных взаимодействиях,"11.8

"Определения контакта между поверхностями модели, "11.9

" Приложение граничных условий и нагрузок к сборке " 11.10

" Построение сетки для сборки." 11.11

"Выполнение расчета ." 11.12.

11.2 Создание первой части проушины

Чтобы в начале создании модели, вы создадите первую часть — половину петли. Модель Abaqus/CAE состоит из геометрических элементов, вы создаете деталь, объединяя эти элементы. Данная часть петли состоит из следующих базовых элементов:

- а) Куб базовый элемент, так как он является первым элементом детали.
- b) Фланец, который вытягивается из куба. Он также включает отверстие большого диаметра, через которое вставляется штифт.
- с) Небольшое отверстие для смазки в одном из углов фланца.

11.2.1 Создание куба

Чтобы создать куб (базовый элемент), вы создадите твердотельную, трехмерную выдавленную деталь и дадите ей имя. Затем вы создадите эскиз ее профиля (0.04 м×0.04 м) и выдавите этот профиль на заданное расстояние (0.04 м), чтобы создать базовый элемент первой части петли. Желаемый куб показан на рисунке 11-2.



Рисунок 11-2 Модель, используемая для учебного примера с поворотной петлей.

Чтобы создать куб:

- 1. Запустите Abaqus/CAE и создайте новую базу данных модели.
- В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру Parts, чтобы создать новую деталь.
 Появится диалоговое окно Create Part.
- 3. Дайте детали имя Hinge-hole. Примите следующие установки по умолчанию:
 - d) Three-dimensional (трехмерное) deformable (деформируемое) твердое тело.
 - e) Solid extrusion (твердотельное выдавливание) базового элемента.
- 4. В текстовом поле **Appropriate size** наберите 0.2. Вы будете моделировать петлю, используя в качестве единицы длины метры, и ее общая длина составит 0.14 м; поэтому величина 0.2 метра является достаточной для примерного размера детали. Кликните **Continue**, чтобы создать деталь.
- 5. Из палитры инструментов эскиза выберите инструмент прямоугольника 🗔.

- 6. Нарисуйте произвольный прямоугольник и кликните 2-й кнопкой мыши где-нибудь в графическом окне, чтобы выйти из этого инструмента.
- 7. С помощью инструмента **Add Dimension** обозначьте размеры верхнего и левого ребра равными 0.04 м.
 - Важно: Чтобы успешно завершить урок, важно, чтобы вы использовали установленные размеры и не отклонялись от приведенного примера; в противном случае вы столкнетесь с трудностями при сборке модели.
- 8. Кликните по кнопке **Done** в панели инструкция, чтобы выйти из эскиза. Abaqus/CAE откроет диалоговое окно **Edit Base Extrusion**.
- 9. В появившемся окне введите значение 0.04 для **Depth** и нажмите **Continue**.

11.2.2 Добавление фланца к базовому элементу

Теперь вы добавите твердотельный элемент — фланец — к базовому элементу. Вы выберите одну грань куба, чтобы определить плоскость эскиза и выдавите нарисованный профиль на половину глубины куба. Куб с фланцем показаны на рисунке 11-3.



Рисунок 11-3 К базовому элементу добавлен фланец.

Чтобы добавить фланец к базовому элементу:

- 1. В главном меню выберите Shape—>Solid—>Extrude.
- 2. Выберите грань для определения плоскости рисования эскиза. Выберите переднюю грань куба, как показано на рисунке 11-4.



Рисунок 11-4 Выберите отмеченную сеткой грань для определения плоскости эскиза. Выберите указанное ребро для правильного позиционирования эскиза.

3. Выберите ребро, которое видно как вертикальное в правой части эскиза, как показано на рисунке 11-4.



Рисунок 11-5 Используйте средство Эскиза для построения профиля фланца.

- 4. С помощью инструментов **Magnify View** и **⊕Pan View** настройте вид области, в которой будет размещаться фланец:
- 5. Как и раньше, будет сначала нарисована примерная форма нового геометрического элемента. Из палитры инструментов Эскиза выберите инструмент связанной линии 44.
- 6. Постройте прямоугольную часть фланца, нарисовав три линии следующим образом:
 - а. Начните в любой точке справа от куба, соедините линию с верхней правой вершиной куба.
 - b. Протяните следующую линию к нежней правой вершине куба. Этой линии автоматически будет присвоено вертикальное ограничение.
 - с. Заключительная линия протягивается от правой нижней вершины куба до произвольной точки справа от него.

Совет: Если вы допустили ошибку в процессе рисования, используйте в Эскизе инструменты отката **1** или стирания **2**.

- 7. Кликните 2-й кнопкой мыши в графическом окне, чтобы выйти из инструмента «соединительной линии».
- 8. Уточните рисунок, определив следующие ограничения и размеры: Используйте инструмент ограничительных связей 🖾, чтобы наложить ограничение на верхнюю и нижнюю линию эскиза, так чтобы каждая из них была горизонтальной.
 - a. Присвойте ограничение равной длины этим двум линиям (используйте [Shift]+Click, чтобы выделить обе линии).
 - b. Проставьте размеры линии, так чтобы ее длина была равна 0.02 м. Появится эскиз, как показано на рисунке 11-6.



Рисунок 11-6 Нарисуйте прямоугольную часть фланца.

- 9. Замкните профиль, добавив дугу полуокружности, используя инструмент «окружность через 3 точки» . Выберите две вершины на открытых концах прямоугольника в качестве концевых отточек дуги, начиная с верхней точки. Выберите любую точку справа от эскиза в качестве точки, через которую будет проходить дуга.
 - а. Определите ограничение касания между концами дуги и горизонтальными линиями, чтобы уточнить чертеж.
- 10. Кликните 2-й кнопкой мыши в графическом окне, чтобы выйти из инструмента «окружность через 3 точки». Результирующая дуга показана на рисунке 11-7.



Рисунок 11-7 Добавьте криволинейную часть фланца.

- 11. Из палитры Эскиза выберите инструмент «окружность с центром и точкой на периметре» , чтобы нарисовать отверстие фланца. Центр круга должен совпадать с центром только что созданной дуги. Точка периметра должна быть расположена справа от центральной точки.
 - а. Используйте инструмент «размер» 之, чтобы изменить значение радиуса на 0.01 м.
 - b. Установите размер вертикального расстояния между центром окружности и точкой периметра. Отредактируйте этот размер, чтобы расстояние стало равно 0. (Если

расстояние уже равно 0, вы не можете добавить вертикальный размер). Это подгонит расположение точки на периметре таким образом, что она будет в той же горизонтальной плоскости, как и центральная точка.

Замечание: Когда вы строите сетку детали, Abaqus/CAE размещает узлы всегда там, где появляются вершины вдоль ребер; поэтому расположение вершин на окружности круга влияет на результирующую сетку. Размещение их в той же горизонтальной плоскости, что и центр круга приведет к сетке высокого качества.



12. Окончательный чертеж показан на рисунке 11-8.

Рисунок 11-8 Окончательный эскиз.

- 13. Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы выйти из режима Эскиз.Abaqus/CAE изобразит деталь в изометрическом виде, показав выдавленный базовый элемент - ваш нарисованный профиль, и стрелку, указывающую направление выдавливания. Выдавливание по умолчанию для твердого тела всегда направлено во вне твердого тела. Abaqus/CAE также покажет диалоговое окно Edit Extrusion.
- 14. В диалоговом окне Edit Extrusion: Примите установленный по умолчанию Type как Build, чтобы указать, что вы предоставите глубину выдавливания.
 - а. В поле **Depth** введите глубину выдавливания 0.02.
 - b. Кликните Flip, чтобы перевернуть направление выдавливания, как показано на рисунке 11-9.



Рисунок 11-9 Законченный эскиз фланца, показывающий направление выдавливания.

- с. Включите опцию **Keep internal boundaries**. Когда вы включаете эту опцию, Abaqus/CAE сохраняет грань, которая создана между выдавленным базовым элементом и остальной частью детали. В результате выдавленный фланец сохраняется как вторичная часть и не сливается с кубом.
- d. Кликните OK, чтобы создать выдавливание в твердое тело. Abaqus/CAE покажет на экране деталь, состоящую из куба и фланца.

11.2.3 Модификация геометрического элемента

Каждая деталь определяется набором геометрических элементов, и каждый элемент определяется набором параметров. Например, базовый элемент (куб) и вторичный элемент (фланец) оба определяются профилем эскиза и глубиной выдавливания. Далее изменим деталь, модифицируя параметры, которые определяют его элементы. Для примера с проушиной вы измените радиус отверстия в эскизе фланца с 0.01 на 0.012 м.

Чтобы модифицировать элемент:

- В Дереве Модели раскройте элемент Hinge-hole в контейнере Parts. Затем раскройте появившийся контейнер Features. Появится список, показывающий имя Name каждого элемента. В данном примере вы создали два твердотельных выдавливания: базовый элемент (куб), Solid extrude-1, и фланец, Solid extrude-2.
- 2. Кликните 3-й кнопкой мыши по **Solid extrude-2** (фланец) в списке. Abaqus/CAE подсветит в графическом окне выбранный элемент.
- 3. В появившемся меню выберите Edit. Abaqus/CAE откроет редактор свойств элемента. Для выдавленного твердого тела вы можете изменить глубину выдавливания, скручивание (twist) и конусность (draft) (если они были определены при создании элемента), а также профиль эскиза.
- 4. В редакторе свойств элемента кликните по Edit Section Sketch. Abaqus/CAE покажет эскиз второго элемента, и появится редактор его свойств.
- 5. Из палитры инструментов Эскиза выберите инструмент «редактирование размера» 🛱.

- 6. Выберите радиальный размер круга (0.010).
- 7. В диалоговом окне Edit Dimension наберите новый радиус 0.012 и кликните OK. Abaqus/CAE закроет диалоговое окно и изменить радиус круга только в эскизе.
- 8. Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы выйти из инструмента редактирования размера. Кликните **Done** чтобы выйти из Эскиза.
- 9. Кликните **ОК**, чтобы обновить фланец с измененным радиусом и выйти из редактора элементов. Отверстие фланца увеличится до нового размера.

Замечание: При некоторых обстоятельствах обновление элемента приводит к разрушению зависимых элементов. В таком случае Abaqus/CAE запрашивает, хотите ли вы сохранить и подавить элемент, которое не удалось регенерировать, или вы хотите вернуться к неизмененному элементу и потерять все изменения.

11.2.4 Модификация геометрического элемента

Фланец имеет небольшое отверстие для смазки, как показано на рисунке 11-10.



Рисунок 11-10 Изометрический теневой вид петли с отверстием для смазки.

Создание отверстие в нужном положении требует подходящей базовой плоскости для построения профиля для выдавливаемого выреза, как показано на рисунке 11-11.



Рисунок 11-11 Двумерный вид положения базовой плоскости относительно части петли.

Создадим эскиз окружности на базовой плоскости, которая касается фланца, и Abaqus/CAE выдавит окружность по нормали к базовой плоскости и по нормали к фланцу, чтобы создать отверстие для смазки. Создание базовой плоскости состоит из трех операций:

- f) Создание базовой точки на периферии фланца.
- g) Создание базовой оси, проходящей через две базовые точки.
- h) Создание базовой плоскости, через базовую точку на окружности и нормальной базовой оси.

Чтобы создать базовую плоскость:

- 1. В главном меню выберите Tools—>Datum.
- 2. Создайте базовую точку вдоль криволинейного ребра фланца, через которую будет проходить базовая плоскость. В диалоговом окне Create Datum выберите тип базового элемента Point.
- 3. Из списка методов выберите Enter Parameter.
- 4. Выберите криволинейное ребро, как показано на рисунке С-2. Обратите внимание на направление стрелки, указывающей возрастание параметра вдоль ребра от 0.0 до 1.0. Вы не можете изменить направление этой стрелки.



Рисунок 11-12 Создание базовой точки вдоль криволинейного ребра фланца.

- 5. В текстовом поле в области инструкций введите нормализованный параметр по длине ребра и нажмите [Enter]. Если направление стрелки такое же, как и на рисунке С-12, введите 0.75 для нормализованного параметра, если же стрелка указывает в противоположном направлении, введите для параметра ребра значение 0.25. Abaqus/CAE создаст базовую точку на выделенном ребре.
- 6. Создайте базовую ось, которая будет определять нормаль к базовой плоскости. В диалоговом окне Create Datum выберите тип Axis. Кликните по методу 2 points. Abaqus/CAE подсветит точки, которые могут быть использованы для создания базовой оси.

7. Выберите точку в центре отверстия (созданную, когда вы рисовали эскиз отверстия) и опорную точку на криволинейном ребре. Abaqus/CAE изобразит опорную ось, проходящую через две точки, как показано на рисунке 11-13.



Рисунок 11-13 Создание опорной оси, определяемой двумя точками.

- 8. Заключительным шагом является создание базовой плоскости, нормальной к опорной прямой. В диалоговом окне Create Datum выберите тип Plane. Кликните по методу Point and normal.
- 9. Выберите опорную точку на криволинейном ребре в качестве точки, через которую будет проходить опорная плоскость.
- 10. Выберите опорную ось в качестве ребра, которое будет нормально опорной плоскости. Abaqus/CAE создаст опорную плоскость, как показано на рисунке 11-14.



Рисунок 11-14 Создание опорной плоскости, нормальной к опорной оси.

11.2.5 создание отверстия для смазки

Следующая операция создаст отверстие во фланце, выдавливанием круга из опорной плоскости, которую вы только что создали. Сначала вам необходимо создать базовую точку на фланце, которая будет указывать центр отверстия, Как показано на рисунке 11-15.



Рисунок 11-15 Базовая точка, указывающая центр отверстия для смазки.

Чтобы создать базовую точку в центре отверстия для смазки:

- 1. Выведите на экран диалоговое окно Create Datum, выбрав в основном меню Tools—>Datum.
- 2. Создайте базовую точку вдоль второго криволинейного ребра фланца. В диалоговом окне Create Datum выберите тип Point.
- 3. В списке методов выберите Enter Parameter.
- 4. Выберите второе криволинейное ребро фланца, как показано на рисунке 11-16.



Рисунок 11-16 Выберите второе криволинейное ребро.

- 5. Обратите внимание на направление стрелки, указывающей возрастание параметра от 0.0 до 1.0. Введите нормализованное значение параметра 0.75 (или 0.25, если направление стрелки противоположно показанному на рисунке 11-16) и нажмите [Enter]. Abaqus/CAE создаст базовую точку вдоль криволинейного ребра.
- 6. В списке методов диалогового окна Create Datum выберите Midway between 2 points.
- 7. Выберите опорную точку на первом криволинейном ребре.
- 8. Выберите опорную точку на втором криволинейном ребре. Abaqus/CAE создаст базовую точку в середине фланца..
- 9. Закройте диалоговое окно Create Datum.

Чтобы создать эскиз отверстия для смазки:

- 1. В главном меню выберите Shape—>Cut—>Extrude.
- 2. Кликните по границе опорной плоскости, чтобы выбрать ее в качестве плоскости для создания эскиза.
- 3. Выберите верхнюю заднюю грань куба в качестве ребра, которое появится вертикальным и справа от эскиза, как показано на рисунке 11-17.



Рисунок 11-17 Выберите указанное для правильного позиционирования сетки эскиза.

Запустится средство Эскиз с вершинами, опорными элементами и ребрами детали, спроецированными на плоскость эскиза в качестве опорной геометрии.

- 4. В палитре инструментов Эскиз, выберите инструмент окружности 0.
- 5. Выберите опорную точку в центре фланца, чтобы обозначить центр окружности.
- 6. Выберите любую другую точку и кликните 1-й кнопкой мыши.
- 7. Определите размер радиуса отверстия. Он должен быть изменен на значение 0.003 м.
- 8. Задайте размер вертикального расстояния между центром окружности и точкой на его периметре. Установите это значение равным нулю. Как отмечалось ранее, это улучшит качество сетки.
- 9. Выйдите из режима Эскиз. Abaqus/CAE изобразит петлю в изометрическом виде, показав базовую деталь и фланец, созданный вами эскиз отверстия и стрелку, указывающую направления выдавливаемого выреза. Он откроет также диалоговое окно Edit Cut Extrusion.
- 10. Из меню Туре диалогового окна Edit Cut Extrusion выберите Up to Face и кликните OK.
- 11. Выберите внутреннюю цилиндрическую поверхность отверстия детали, чтобы указать грань, до которой следует произвести вырез, как показано на рисунке 11-18. (Поскольку вы можете выбирать самое большее одну грань, Abaqus/CAE не будет вас запрашивать об окончании операции выбора). Abaqus/CAE произведет выдавливание эскиза от опорной плоскости, чтобы создать отверстие во фланце.



Рисунок 11-18 Выберите грань, до которой следует выполнить вырез.

12. Если необходимо из палитры инструментов **Render Style** выберите инструмент теневой заливки , и используйте инструмент вращения , чтобы увидеть, как ориентированы деталь и ее элементы, как показано на рисунке 11-19. (для ясности опорная геометрия удалены из вида рисунка 11-19).



Рисунок 11-19 Изометрический вид первой петли.

- 13. Теперь, когда вы создали первую часть модели, сохраните ее в базе данных модели:
 - а. Из главного меню выберите File—>Save. Появится диалоговое окно Save Model Database As.
 - b. Введите имя базы данных новой модели в поле File Name, и кликните OK. Abaqus/CAE сохранит базу данных модели в новом файле и вернется в модуль Part. Имя базы данных модели появится в заголовке главного окна.
- 14. Если вы сочтете нужным прервать урок, то можете сохранить базу данных модели в любой момент и выйти из Abaqus/CAE. Позже вы можете запустить ceanc Abaqus/CAE и открыть сохраненную базу данных, выбрав Open Database из диалогового окна Start Session. База данных модели будет содержать любые детали, материалы, нагрузки и т.п., которые вы создали, и вы сможете продолжить упражнение.

11.3 Присваивание свойств сечения детали петли

- i) Процесс присваивания свойств сечения детали подразделяется на три задачи:
- ј) Создание материала.
- k) Создание сечения, которое содержит ссылку на материал.
- I) Присваивание сечения детали или области детали.

11.3.1 Создание материала

Вы создадите материал с именем Steel, который имеет модуль Юнга 209 GPa и коэффициент Пуассона, равный 0.3.

Чтобы определить материал:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру Materials, чтобы создать новый материал. Появится диалоговое окно Edit Material.
- 2. Дайте материалу имя Steel.
- 3. В меню редактора выберите Mechanical—>Elasticity—>Elastic.
- 4. Abaqus/CAE откроет форму Elastic.
- 5. В соответствующих полях формы **Elastic** введите 209Е9 для модуля Юнга и значение 0.3 для коэффициента Пуассона.
- 6. Кликните **ОК**, чтобы выйти из редактора материала.

11.3.2 Определение сечения

Далее вы создадите сечение, которое включает ссылку на материал Steel.

Чтобы определить сечение:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру Sections, чтобы создать новое сечение. Появится диалоговое окно Create Section.
- 2. В этом диалоговом окне:
 - a. Дайте сечению имя SolidSection.
 - b. В списке Category примите выбор по умолчанию Solid.
 - с. В списке **Туре** примите Homogoneous в качестве выбора по умолчанию, и кликните **Continue**. Появится редактор сечения.
- 3. В редакторе:
 - a. В качестве выбора материала примите Steel. Если вы определили другие материалы, то можете щелкнуть по стрелке рядом с текстовым полем Material, чтобы увидеть список доступных материалов и выбрать нужный материал.
 - b. Примите значение по умолчанию для Plane stress/strain thickness и кликните OK.

11.3.3 Присваивание сечения

Теперь присвойте сечение Solid Section детали петли.

Чтобы присвоить сечение детали петли:

- 1. В Дереве Модели раскройте элемент **Hinge-Hole** в контейнере Parts и в появившемся списке дважды кликните по Section **Assignment**.
- 2. Протащите мышкой прямоугольник вокруг детали петли, чтобы выбрать всю деталь. Abaqus/CAE подсветит всю деталь.
- Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы указать, что вы завершили выделение областей, которым будет выполняться присваивание. Появится диалоговое окно Edit Section Assignment, содержащее список существующих сечений. По умолчанию выбрано сечение SolidSection, так как в данный момент нет других сечений.
- 4. В диалоговом окне примите выбор **SolidSection** по умолчанию и кликните **OK**. Abaqus/CAE присвоит сечение детали и раскрасит ее аквамариновым цветов, чтобы указать, что области присвоено сечение.

11.4 Создание и модификация второй проушины

Модель содержит вторую проушину, аналогичную первой, за исключением того, что в ней отсутствует отверстие для смазки. Создадим копию первой петли и удалите элемент, который образует это отверстие.

11.4.1 Копирование петли

Сначала вы создадите точную копию навесной петли.

- 1. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по Hinge-hole в контейнере Parts и в появившемся меню выберите Сору. Появится диалоговое окно Part Copy.
- 2. В текстовом поле диалогового окна наберите Hunge-solid и кликните OK. Abaqus/CAE создаст копию навесной петли и даст ей имя Hinge-solid. Эта копия включает сечение из исходной детали.

11.4.2 Модифицирование копии проушины

Теперь создадим часть проушины, удалив элемент, который образует отверстие для смазки.

Чтобы модифицировать петлю:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по **Hunge-solid**, под контейнером **Parts**, чтобы сделать его текущим. Abaqus/CAE отобразит деталь в текущем графическом окне. Посмотрите на панель заголовка окна, чтобы убедиться, какая из деталей отображается в окне.
- 2. Раскройте контейнер Feature под Hinge-solid.
- 3. Кликните 3-й кнопкой мыши по **Datum pt-1** в списке элементов детали. Abaqus/CAE подсветит опорную точку, как показано на рисунке 11-20.



Рисунок 11-20 Удалите опорную точку и подчиненные элементы.

4. В появившемся меню выберите Delete. Когда вы удаляете выделенный элемент, запрос Abaqus/CAE относительного того, действительно ли вы хотите его удалить, зависит от удаляемого элемента. Удаляемый элемент имеет признак «родитель» и его зависимые элементы называются «потомками». Abaqus/CAE подсвечивает все элементы, которые будут удалены, если удаляется родительский элемент. Среди кнопок в области инструкций кликните Yes, чтобы удалить опорную точку и всех ее потомков. Abaqus/CAE удалит опорную точку. Поскольку имеются зависимые от нее элементы, то он удалит также опорную ось и опорную плоскость, а также и отверстие для смазки.

Важно: Вы не можете восстановить удаленные элементы, но временно удалить элемент, отключив его – кликнув в дереве модели по элементу правой кнопкой мыши и выбрав **Suppress**.

11.5 Создание штифта

Окончательная сборка состоит из двух проушины, которые свободно вращаются вокруг штифта. Вы будете моделировать штифт как трехмерную аналитическую поверхность вращения. Сначала создадим штифт и присвоим опорную точку жесткого тела; затем создадим ограничение на штифт, наложив ограничение на эту опорную точку типа жесткого тела.

11.5.1 Модифицирование копии петли

Теперь создадим соединительный штифт — трехмерную аналитическую жесткую поверхность вращения.

Чтобы создать штифт:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру **Parts**, чтобы создать новую деталь. Появится диалоговое окно **Create Part**.
- 2. Дайте ему имя Pin. Выберите, как и ранее, трехмерное тело, но измените тип на Analitical rigid, и базовое свойство формы на Revolved shell.
- 3. Примите приближенное значение 0.2 и кликните **ОК**. Запустится Эскиз и покажет ось вращения в виде зеленой пунктирной линии с ограничением фиксированности положения; вы не можете пересекать эту ось.
- 4. Из палитры инструментов Эскиза выберите «соединительную линию» 🏄. Нарисуйте вертикальную линию справа от оси.
- 5. Установите размер для горизонтального расстояния от ос до линии, и измените расстояние на значение 0.12.
- 6. Постройте размер для вертикальной линии и измените длину на значение 0.06.

7. Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы выйти из Эскиза. Эскиз и результирующая залитая тенью деталь штифта показана на рисунке 11-21.



Рисунок 11-21 Создайте штифт вращением аналитической жесткой поверхности вокруг оси.

11.5.2 Присваивание опорной точке свойства жесткого тела

Вам необходимо присвоить штифту опорную точку типа жесткого тела. Поскольку вы не присваиваете ему массу или вращательный момент инерции, то опорная жесткая точка может быть размещена в любой точке графического окна. Для наложения ограничения на опорную жесткую точку или определения вращения вы используете модуль Load. Движение или ограничение жесткости, приложенное к опорной точке, применяется ко всей жесткой поверхности.

Вы можете либо выбрать опорную точку на детали в графическом окне, или можете ввести ее координаты. Для этого примера выберите ее в графическом окне, как показано на рисунке 11-22.



Рисунок 11-22 Создайте жесткую опорную точку на штифте.

Чтобы присвоить опорную точку:

- 1. В главном меню выберите Tools->Reference Point.
- 2. Выберите одну из вершин на периферии штифта.

11.6 Сборка модели

Следующей задачей является создание сборки из деталей. В данном разделе вы добавите в сборку проушину с отверстием для смазки и передвинете относительно нее вторую проушину и штифт. Сборка состоит из своеобразных ссылок на ранее созданные детали. В случае если геометрия детали обновится, обновится и ее представление в сборке.

11.6.1 Занесение деталей в сборку

Сначала вам необходимо занести в сборку следующие детали:

- m) Проушину с отверстием для смазки Hinge-hole.
- n) Проушину без отверстия Hinge-solid.
- о) Штифт.

Чтобы занести проушину с отверстием для смазки в сборку:

- 1. В Дереве Модели раскройте элемент Assembly. Затем дважды кликните по Instances в появившемся списке, чтобы занести деталь в сборку. Появится диалоговое окно Create Instance, содержащее список всех деталей в текущей модели в данном примере две проушины и штифт
- 2. В этом диалоговом окне выберите Hinge-hole. Abaqus/CAE покажет временное изображение выделенной детали.
- В диалоговом окне кликните Apply. Abaqus/CAE создаст зависимый экземпляр части петли и покажет рисунок, указывающий начало и ориентацию глобальной системы координат. Abaqus/CAE присвоит созданному ярлыку имя эHinge-hole-1, чтобы указать, что это первый экземпляр детали с именем Hinge-hole.

11.6.2 Занесение в сборку проушины без отверстия

Теперь занесем в сборку проушину без отверстия. Чтобы отделить сплошную часть от проушины с отверстием, зададим в Abaqus/CAE смещение проушины без отверстия вдоль оси Х.

Чтобы занести сплошную проушину:

- 4. В диалоговом окне Create Instance включите опцию Auto-offset from other instances. Функция авто смещения предотвратит перекрытие существующих деталей.
- 5. В диалоговом окне выберите Hinge-solid и кликните OK. Abaqus/CAE закроет диалоговое окно, и занесет деталь со смещением вдоль оси X, чтобы отделить две проушины, как показано на рисунке 11-23 (для наглядности изображения опорная геометрия на этом и последующих рисунках убрана из затененного вида с помощью выбора опции.



Рисунок 11-23

11.6.3 Позиционирование экземпляра сплошной проушины

Кроме процедур простого перемещения и вращения в модуле Assembly предоставлены инструменты, позволяющие позиционировать выбранную деталь, определяя взаимосвязь между выделенными гранями, ребрами, осями и опорными точками.

Parallel face (параллельная грань)

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока выделенные грани не станут параллельными.

Face to Face (грань к грани)

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока две выделенные грани не станут параллельными и между ними не будет установлен определенный зазор.

Parallel Edge (параллельные ребра)

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока два выделенных ребра не станут параллельными

Edge to Edge (ребро к ребру)

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока два выделенных ребра не станут параллельными и расположатся на заданном расстоянии друг от друга.

Coaxial (коаксиальные)

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока две выделенные грани не станут коаксиальными.

Coincident (совмещение)

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока две выделенные точки не совместятся.

Parallel CSYS

Перемещаемая деталь двигается до тех пор, пока две выделенные опорные системы координат не станут параллельными.

Abaqus/CAE хранит взаимосвязи как характеристики сборки: их можно редактировать, удалять и подавлять. В отличие от этого, перемещения и вращения не запоминаются и не появляются в списке характеристик. Хотя ограничения на взаимосвязи хранятся как характеристики, они независимы, и как следствие новое ограничение на положение может перекрыть предыдущее ограничение.

В данном разделе будем перемещать сплошную часть проушины, пока проушина с отверстием будет оставаться неподвижной. Применим три типа ограничения на связи положения, что правильно разместить эти две части петли.

Чтобы расположить сплошную проушину:

- 1. Сначала наложите ограничение на сплошную проушину, так чтобы две грани фланцев были обращены друг к другу. Из основного меню выберите Constraint—>Face To Face.
- 2. В подвижном экземпляре детали выделите грань сплошной части петли, показанную на рисунке 11-24.



Рисунок 11-24 Выделите грань подвижной части петли.

3. В фиксированной части проушины с отверстием выделите грань, показанную на рисунке 11-25. Abaqus/CAE подсветит грань на подвижной части красным цветом, а грань на фиксированной части малиновым цветом.



Рисунок 11-25 Проследите, чтобы векторы были сонаправлены

Abaqus/CAE покажет красные стрелки на каждой выделенной грани; перемещаемая часть будет расположена так, что стрелка указывает в том же направлении. Если необходимо, вы можете изменить направление стрелки на перемещаемой части.

- 4. В области инструкций кликните по **Flip**, чтобы изменить направления стрелки. Кликните OK, когда стрелки будут направлены друг на друга.
- 5. В текстовом поле, которое появится в области инструкций, наберите значение зазора (0.04), который останется между двумя деталями, измеренный по нормали к выделенной грани фиксированной детали, и нажмите [Enter].

Abaqus/CAE повернет сплошную часть петли так, чтобы выделенные грани стали параллельными друг другу и расположились на расстоянии 0.04 друг от друга, как показано на рисунке 11-26.



Рисунок 11-26 Положение 1: Наложенное ограничение на фланец сплошной проушины относительно грани фланца детали с отверстием для смазки.

Две части перекрываются, поскольку положение сплошной части петли наложенными ограничениями еще определено не полностью. Наложим еще два ограничения на взаимное расположение, чтобы получить нужное положение деталей.

- 6. Теперь выровняем два отверстия во фланцах. В главном меню выберите Constraint—>Coaxial.
- 7. Выделите отверстие во фланце сплошной части петли, как показано на рисунке 11-27



Рисунок 11-27 Выделите цилиндрическую грань перемещаемой детали.

8. Выделите отверстие во фланце проушины с отверстием , как показано на рисунке 11-28.

Abaqus/CAE покажет стрелки на каждой выделенной грани.



Рисунок С-28 Выделите цилиндрическую грань фиксированной детали

- 9. В области инструкций кликните **Flip**, чтобы изменить направление стрелки на подвижном экземпляре детали. Кликните **OK**, когда стрелка будет указывать вниз. Abaqus/CAE расположит две части петли так, чтобы отверстия во фланцах стали коаксиальными.
- 10. Используй инструмент поворота (, чтобы посмотреть сверху на две детали. Обратите внимание, что два фланца теперь не перекрываются, как показано на рисунке 11-29.



Рисунок 11-29 Положение 2: Ограничение на отверстия во фланцах, располагающее их вдоль одной оси.

- 11. В заключении добавим ограничение, убирающее перекрытие двух фланцев. В главном меню выберите Constraint—>Edge to Edge.
- 12. Выделите прямолинейное ребро на сплошной части петли, показанное на рисунке 11-30.



Рисунок 11-30 Выделите прямолинейное ребро на перемещаемом экземпляре.

13. Выберите соответствующее ребро на фиксированном экземпляре, как показано на рисунке 11-31.



Рисунок 11-31 Выделите прямолинейное ребро на фиксированном экземпляре
14. Если необходимо переверните стрелку, чтобы она указывала в том же направлении; затем кликните ОК, чтобы применить ограничения. Abaqus/CAE расположит две части петли так, что выделенные ребра станут коллинеарными, как показано на рисунке 11-32.



Рисунок 11-32 Окончательное положение: Ограничение на ребра каждой части, располагающее их вдоль одной линии.

11.6.4 Создание и позиционирование экземпляра штифта

Теперь занесем штифт в сборку и расположим его симметрично в отверстиях фланцев, используя ограничения на векторы перемещения. Чтобы определить вектор перемещения, можно выбрать вершины в сборке или ввести координаты. Также можете определить вектор перемещения, используя инструмент Query.

Чтобы разместить штифт:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по Instances в контейнере Assembly.
- 2. В диалоговом окне Create Instance выключите опцию Auto-offset from other instances и создайте экземпляр штифта.
- 3. Наложите ограничение, чтобы штифт располагался вдоль той де оси, что и отверстия во фланцах. Используйте меню Constraint—>Coaxial, как вы делали, когда выравнивали отверстия во фланцах в предыдущем разделе. (Вы можете либо выбрать любое из отверстий во фланцах в качестве цилиндрической поверхности фиксированной части, а направление стрелки не имеет значения). Abaqus/CAE расположит штифт, как показано на рисунке 11-33.



Рисунок 11-33 Расположите штифт коаксиально с отверстиями во фланцах.

- 4. В главном меню выберите **Tools—>Query**.
- 5. В списке General Queries выберите Distance.
- Требование Distance позволяет вам задать размеры Х-, Y- и Z-компонент вектора, соединяющего две выделенные точки. Вам необходимо определить расстояние между концом штифта и петли, содержащей отверстие для смазки; две точки, которые надо выбрать, показаны на рисунке 11-34.



Рисунок 11-34 Определение положения штифта.

- a. Чтобы определить один из концов вектора, выберите точку на окружности отверстия во фланце, содержащем отверстие для смазки.
- b. Чтобы определить другой конец вектора, выберите вершину на штифте, которая находится внутри проушины с отверстием. Abaqus/CAE покажет в области инструкций вектор расстояния между двумя выбранными т очками вместе с Х-, Y- и Z-компонентами. Вы передвинете штифт вдоль Х-, Y- и Z-компонент на расстояние 0.01 м. Вы хотите расположить штифт симметрично между двумя петлями, так что переместите его на 0.02 м.
- 7. В главном меню выберите Instance—>Translate.
- 8. Выберите штифт в качестве перемещаемой детали и кликните **Done**, чтобы указать, что вы закончили выделение детали для перемещения.

9. В текстовом поле в области инструкций введите стартовую точку 0,0,0 для вектора перемещения и конечную точку 0,0,0.02. Abaqus/CAE переместит штифт на расстояние 0.02 вдоль оси Z и покажет временное изображение его нового положения.

Замечание: Если положение временного изображения окажется неправильным, вы можете использовать кнопки в области инструкций, чтобы исправит возникшие проблемы. Кликните либо по кнопке Cancel (X), чтобы отменить последнюю процедуру, либо по кнопке **Previous** (←), чтобы откатиться в процедуре на один шаг.

10. В области инструкций кликните **ОК**. Окончательная сборка показана на рисунке 11-35.



Рисунок 11-35 Затененный вид окончательной сборки.

11. Прежде, чем продолжать, преобразуйте все ограничения на расположение в абсолютное положение. В главном меню выберите Instance—>Convert Constraint. Выделите все экземпляры деталей и кликните Done в области инструкций.

11.7 Определение шагов анализа

Прежде, чем вы приложите в модели нагрузки или граничные условия или определите контакты внутри нее, вы должны определить шаги анализа. Как только шаги созданы, вы можете задать в каждом из них нагрузки, граничные условия и взаимодействия.

11.7.1 Создание и позиционирование экземпляра штифта

Анализ, который вы выполните с моделью проушины, будет состоять из начального шага и двух общих шагов:

- р) На начальном шаге вы наложите граничные условия на области модели и определите контакт между ее областями.
- q) На первом общем шаге анализа вы позволите задействовать контакт.
- r) На втором шаге вы измените два граничных условия, приложенных в модели, и приложете нагрузки в виде давления к одной из частей петли.

Abaqus/CAE создает начальный шаг по умолчанию, последующие два задаются в ручную.

Чтобы создать шаги анализа:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по элементу **Steps**, чтобы создать новый шаг. Появится диалоговое окно **Create Step**.
- 2. В этом диалоговом окне:
 - а. Дайте шагу имя Contact.
 - b. Примите установленный по умолчанию тип (Static, General) и кликните Continue. Появится редактор шагов.
- 3. В поле Description наберите Establish contact.
- 4. Кликните по закладке Incrementation, и удалите значение 1, которое появилось в текстовом поле Initial. Введите значение 0.1 для размера начального приращения.
- 5. Кликните **ОК**, чтобы создать шаг и выйти из редактора. В контейнере **Steps** Дерева Модели появится шаг **Contact**.
- 6. Используйте тот же прием, чтобы создать второй общий (general, static) шаг с именем Load. В поле описания введите Apply Load и значение 0.1 для начального приращения. В контейнере Steps Дерева Модели появится шаг Load.

11.7.2 Запрос на вывод данных

Вы используете field output requests (запрос на вывод полей переменных), чтобы сформировать запрос на вывод переменных, которые следует записать с заданной частотой в выходную базу данных из всей модели или из ее большой части. Вывод переменных поля используется для генерирования графиков деформированной формы, контурных графиков и анимаций по полученным в анализе данным. Abaqus/CAE записывает каждую компоненту переменных в выходную базу данных с выбранной частотой.

Для записи в выходную базу данных переменных с высокой частотой из небольшой части модели, например смещение в единичном узле, вы используете history output requests (хронологическую последовательность данных). Эти данные используются для построения X-Y графиков и отчетов по результатам анализа. Когда вы создаете запрос history output, вы должны выбрать отдельные компоненты переменных, которые должны быть записаны в выходную базу данных.

По умолчанию выходные переменные для шагов Contact и Load включают следующее:

- s) **S** (компоненты напряжений)
- t) РЕ (Компоненты пластической деформации)
- u) **РЕЕQ** (Эквивалентные пластические деформации)
- v) **РЕМАБ** (Величину пластической деформации)
- w) LE (компоненты логарифмической деформации)
- x) U (смещения и вращения)
- y) **RF** (Силы и моменты реакций)
- z) **СF** (сосредоточенные силы и моменты)
- aa) **CSTRESS** (контактные напряжения)
- bb) **CDISP** (Контактные перемещения)

По умолчанию Abaqus/CAE записывает переменные по умолчанию из процедуры static, general в выходную базу данных после каждого приращения шага. Ниже вы измените частоты вывода данных в процессе шага Contact, так чтоб данные будут записываться в базу данных один раз —

на последнем приращении шага. Кроме того, вы удалите из запроса на вывод данных в процессе шага Load переменную CDISP, поскольку она не нужна для постпроцессорной обработки.

Чтобы отредактировать запросы на вывод данных и задать частоты вывода в процессе шага Load:

- 1. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по элементу Field Output Requests и в появившемся меню выберите Manager. Появится менеджер Field Output Requests Manager.
- 2. B Field **Output Requests Manager** выберите запрос **F-Oyput-1** в шаге **Contact** и кликните Edit. Появится редактор **Edit Output Requests** для шага **Contact**.
- 3. В качестве частоты (output frequency) выберите Last increment, чтобы сгенерировать вывод только в процессе последнего приращения шага.
- 4. Кликните **ОК**, чтобы модифицировать запрос на вывод данных.
- 5. В Field Output Requests Manager выберите запрос F-Output-1 в шаге Load. Среди кнопок справа в правой части менеджера кликните по Edit. Появится редактор Edit Field Output Requests для шага Load.
- 6. Установите частоту вывод равной 1, чтобы сгенерировать вывод для каждого приращения шага.
- 7. В списке категорий выводимых данных кликните по стрелке слева от **Contact**. Появится список доступных переменных вывода вместе с описанием каждой из них.
- 8. Кликните по поле CDISP, чтобы деактивировать эту переменную.
- 9. Кликните **OK**, чтобы модифицировать запрос на вывод данных. В Field **Output Requests Manager** статус запроса для шага Load изменится на Modified.
- 10. В нижней части Field Output Requests Manager кликните кнопкой Dismiss, чтобы закрыть диалоговое окно.

11.7.3 Выбор степеней свободы для мониторинга

Вы можете определить конкретные наборы элементов или узлов, которые содержат только выбранные части вашей модели. Создав такой набор, вы можете его использовать для выполнения следующих задач:

- сс) Присвоить свойства сечения в модуле **Property**.
- dd) Создать контактные пары с набором контактных узлов и поверхностей в модуле Interaction.
- ee) Определить нагрузки и граничные условия в модуле Load.
 - ff) Создать запрос на вывод данных либо в выходную базу данных или в файл состояний из заданных областей модели в модуле **Step**. Вывод в файл состояний также отражается в модуле Job в виде постоянно обновляемых X-Y графиков.

В данном разделе определим набор узлов, состоящий из единственного узла. Затем вы сможете организовать мониторинг результатов для одной степени свободы в этом узле, когда вы позже инициализируете задание для анализа.

Чтобы создать набор и мониторинг конкретной степени свободы:

- 1. В Дереве Модели раскройте элемент Assembly и дважды кликните по элементу Sets. Появится диалоговое окно Create Set.
- 2. Дайте набору имя Monitor и кликните Continue.
- 3. Выберите вершину сплошно части петли, показанную на рисунке 11-36.



Рисунок 11-36 Контроль степени свободы на сплошной части петли.

- 4. Кликните Done, чтобы указать, что вы закончили выбор геометрии для набора. Abaqus/CAE создаст набор узлов с именем Monitor, который содержит выбранный узел.
- 5. В главном меню модуля Step выберите Output—>DOF Monitor.

Появится диалоговое окно DOF Monitor.

- 6. Включите опцию Monitor a degree of freedom throughout the analysis.
- 7. Кликните Edit, затем кликните Points в области инструкций и выберите набор узлов Monitor в диалоговом окне Region Selection.

11.8 Создание поверхностей для использования в контактных взаимодействиях

Теперь определим контакт между областями модели. Имеется два подхода, которые можно использовать для определения контактных взаимодействий. Первый является ручным способом, который требует, чтобы вы указали, какие поверхности будут формировать часть контактных взаимодействий, и определить отдельные конкретные контактные пары. Альтернативным способом является позволить самому Abaqus/CAE автоматически идентифицировать и определить все потенциальные контактные пары. Последний подход желателен для сложных моделей, содержащих много контактных взаимодействий. Заметим, что опция автоматического определения контактов доступна только для трехмерных моделей в Abaqus/CAE.

При ручном определении контактных взаимодействий первый шаг состоит в создании поверхностей, которые, которые позже вы будете включать во взаимодействия. Нет необходимости всегда заранее создавать поверхности; если модель проста или поверхности легко выбирать, вы можете указывать основную (master) и подчиненную (slave) поверхности непосредственно в графическом окне при создании взаимодействий. Однако, в данном примере легче определить поверхности отдельно и затем ссылаться на их имена при создании взаимодействий. Определим следующие поверхности:

- gg) Поверхность с именем Pin, которая включает внешнюю сторону штифта.
- hh) Две поверхности с именами Flange-h и Flange-s из граней фланцев, которые контактируют друг с другом.
- ii) Две поверхности с именами Inside-h и Inside-s из внутренних поверхностей фланцев, которые находятся в контакте со штифтом.

11.8.1 Выбор поверхности штифта

В этом разделе вы определите внешнюю поверхность штифта. Вы найдете полезным отображать одновременно на экране только одну деталь в то время, как вы выбираете поверхности, которые должны быть определены.

Чтобы отобразить только один экземпляр детали сборки:

- 1. В главном меню выберите View—>Assembly Display Options.
- 2. Кликните по закладке Instance.
- 3. Кликните в столбце Visible рядом с Hinge-hole-1 и Hinge-solid-1, и кликните Apply. Части петли исчезнут с экрана.

Чтобы определить поверхность штифта:

- 1. В Дереве Модели раскройте контейнер Assembly и дважды кликните по элементу Surfaces.
- 2. В этом диалоговом окне дайте поверхности имя Pin и кликните Continue.
- 3. В графическом окне выберите штифт.
- 4. Кликните 2-й кнопкой мыши в графическом окне, чтобы указать, что вы закончили выбор областей для поверхности. Каждая сторона полого цилиндра, представляющего штифт, имеет разный цвет, ассоциированный с ней. На рисунке 11-37 внешняя сторона штифта окрашена коричневым цветом, а внутренняя сторона – лиловым. В вашей модели цвета могут быть обратными, в зависимости от того, как вы создавали исходный эскиз штифта.



Рисунок 11-37 Выберите область для определения поверхности Pin.

5. Вы должны выбрать либо внутреннюю, либо внешнюю часть цилиндра. Внешняя часть контактирует с двумя петлями, и именно ее следует выбрать. Среди кнопок в области инструкций кликните по цвету (Brown или Purple), ассоциированному с внешней поверхностью. Abaqus/CAE создаст нужную поверхность с именем Pin и покажет ее под элементом Surfaces в Дереве Модели.

11.8.2 Определение поверхностей на частях петли

В этом разделе вы определите поверхности частей петли, необходимые для определения контактов между двумя частями петли и между частями петли и штифтом.

Чтобы определить поверхности на частях петли:

- 1. В диалоговом окне Assembly Display Options измените установки видимости, так чтобы стала видимой только Hinge-hole-1.
- 2. В Дереве Модели дважды кликните по Surfaces под контейнером Assembly.
- 3. В этом диалоговом окне дайте имя Flange-h и кликните Continue.
- 4. На экземпляре с отверстием выберите грань фланца, которая контактирует с другим фланцем, как показано на рисунке 11-38.



Рисунок С-38 Выберите область для определения поверхности Flange-h.

- 5. Когда выберите нужную грань, кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы подтвердить свой выбор.
- 6. Создайте поверхность Inside-h, которая включает внутреннюю цилиндрическую поверхность части петли с отверстием для смазки, как показано на рисунке 11-39.



Рисунок 11-39 Выберите область для определения поверхности Inside-h.

- 7. Измените установки видимости, чтобы была видима только Hinge-solid-1.
- 8. Используйте аналогичный прием, чтобы создать поверхность с именем Flange-s, которая содержит соответствующую грань сплошной части петли.

- 9. В заключение создайте поверхность с именем Inside-s, которая включает внутреннюю цилиндрическую поверхность сплошной части петли.
- 10. Закройте диалоговое окно Assembly Display Options.

11.9 Определение контакта между областями модели

Взаимодействия (interactions) являются объектами, которые создаются для моделирования механических взаимосвязей между контактирующими или плотно примыкающими поверхностями. Только чисто физической близости двух поверхностей в сборке недостаточно для указания какого-либо взаимодействия между ними.

Определим следующие взаимодействия:

- jj) Взаимодействие с именем HingePin-hole, которое определяет контакт между экземпляром детали Hinge-hole-1 и штифтом.
- kk) Взаимодействие с именем HingePin-solid, которое определяет контакт между экземпляром детали Hinge-solid-1 и штифтом.
- II) Взаимодействие с именем Flange, которое определяет контакт между двумя фланцами.

Каждое из трех взаимодействий требует ссылку на свойство взаимодействия. В этих свойствах собрана информация, которая полезна вам для определения конкретных типов взаимодействий. Создадим свойство механического взаимодействия, которое описывает тангенциальное и нормальное поведение между всеми поверхностями, в виде отсутствия трения. Вы дадите имя этому свойству NoFric и используете его во всех трех взаимодействиях.

11.9.1 Создание свойства взаимодействия

В этом разделе вы создадите свойство механического взаимодействия.

Чтобы создать свойство взаимодействия:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по элементу Interaction Properties, чтобы создать контактное свойство.
- 2. В этом диалоговом окне:
 - а. Дайте имя свойству NoFric.
 - b. В списке **Туре** примите выбор по умолчанию **Contact**.
 - с. Кликните Continue.
- 3. Из меню диалогового окна выберите Mechanical—>Tangential Behavior и примите для рения формулировку Frictionless (без трения).
- 4. Кликните ОК, чтобы сохранит установки и закрыть диалоговое окно Edit Contact Property.

11.9.2 Создание взаимодействия

В этом разделе создадис три механических контактных взаимодействия типа поверхностьповерхность. Каждое взаимодействие будет ссылаться на созданное свойство. Вы можете определить взаимодействия либо вручную, либо автоматически. Если вы захотите испробовать оба метода, убедитесь, чтобы удалите или подавите любые дубликаты, которые появятся в результате ваших действий.

Чтобы создать взаимодействия автоматически:

- 1. В главном меню выберите Interaction—>Find contact pairs.
- 2. В диалоговом окне Find Contact Pairs кликните по Find Contact Pairs. Определятся пять потенциальных контактных пар.
- 3. В области Contact Pairs диалогового окна:
 - Кликните по имени каждой контактной пары, чтобы подсветить ее в графическом окне.
 Это позволит ознакомиться с контактными взаимодействиями, которые выбраны.
 - b. Обратите внимание, что контактные пары определены между скругленными краями каждого фланца и плоскими противоположными им гранями (они идентифицируются в диалоговом окне как имеющие ненулевое разделение). Эти контактные пары не обязательны. Поэтому удалите их (чтобы удалить контактную пару, выделите ее и кликните 3-й кнопкой мыши, из появившегося меню выберите Delete).
 - с. Идентифицируйте контактную пару между петлей с отверстием и штифтом. Переименуйте взаимодействие в HingePin-hole.
 - d. Идентифицируйте контактную пару между сплошной петлей и штифтом. Переименуйте взаимодействие в HingePin-solid.
 - e. Переименуйте оставшееся взаимодействие в Flanges. Если необходимо, переключите диагностику ведущей (master) и подчиненной (slave) таким образом, чтобы поверхность, ассоциированная с петлей с отверстием, оказалась ведущей, а та, которая ассоциируется со сплошной петлей, стала бы подчиненной (кликните 3-й кнопкой мыши по имени поверхности; из появившегося меню выберите Switch surfaces).
 - f. Примите все остальные установки по умолчанию, за исключением контактной дискретизации. Выберите столбец с меткой Discretization и кликните 3-й кнопкой мыши. В появившемся меню выберите Edit cells. В появившемся диалоговом окне выберите Node-to-surface и кликните OK.
 - g. Кликните **ОК**, чтобы сохранить взаимодействия и закрыть диалоговое окно.

Чтобы создать взаимодействия вручную:

- 1. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по контейнеру Interaction и в появившемся меню выберите Manager.
- 2. В левом нижнем углу этого окна кликните Create.
- 3. В этом диалоговом окне:
 - а. Дайте взаимодействию имя HingePin-hole.
 - b. В списке шагов выберите Initial.
 - c. В списке **Types for Selected Step** примите выбор по умолчанию **Surface-to-surface contact** (Standard).
 - d. Кликните **Continue**. Появится диалоговое окно **Region Selection**, содержащее список поверхностей, которые вы определили ранее.

Замечание: Если диалоговое окно не появляется автоматически, кликните по кнопке Surfaces в самой правой стороне области инструкций.

- 4. В диалоговом окне **Region Selection** выберите **Pin** в качестве ведущей (master) поверхности, и кликните **Continue**.
- 5. Среди кнопок в области инструкций выберите Surface в качестве подчиненного типа.
- 6. В диалоговом окне **Region Selection** выберите **Inside-h** в качестве подчиненной (slave) поверхности, и кликните **Continue**.
- 7. В этом диалоговом окне:
 - a. Для Sliding formulation примите выбор по умолчанию Finite sliding.
 - b. Для Slave Node Adjustment примите выбор по умолчанию No Adjustment.
 - с. В качестве свойства выберите NoFric. (Если определено больше свойств, вы можете щелкнуть по стрелке рядом с полем Contact interaction property, чтобы увидеть список доступных свойств и выбрать нужное).
 - d. Кликните **ОК**, чтобы сохранить взаимодействие и закрыть диалоговое окно.
- 8. Используйте те же приемы из предыдущих шагов, чтобы создать аналогичное взаимодействие с именем HingePin-solid. Используйте Pin в качестве основной поверхности, Inside-s в качестве зависимой поверхности, и NoFric в качестве свойства взаимодействия.
- 9. Создайте аналогичное взаимодействие с именем Flange. Используйте Flange-h в качестве основной поверхности, Flange-s в качестве зависимой поверхности, и NoFric в качестве свойства взаимодействия.
- 10. В Interaction Manager кликните Dismiss, чтобы закрыть менеджер.

11.10 Приложение граничных условий и нагрузок к сборке

Приложим следующие граничные условия и нагрузки к модели проушины:

mm) Граничное условие с именем Fixed, которое ограничивает все степени свободы на конце части проушины с отверстием, как показано на рисунке 11-40.



Рисунок 11-40 Один конец проушины зафиксирован.

nn) Граничное условие с именем NoSlip, которое ограничивает все степени свободы, когда обнаруживается контакт в процессе первого шага анализа. Вы можете изменить это граничное условие во втором шаге анализа (шаге, в котором прикладывается нагрузка) таки образом, чтобы степени свободы с 1 по 5 были бы не ограничены. Рисунок 11-41 иллюстрирует это граничное условие, приложенное в опорной точке.



Рисунок 11-41 Штифт зафиксирован.

- оо) Граничное условие с именем Constraint, которое ограничивает все степени свободы в точке сплошной проушины в процессе первого шага анализа. Вы можете изменить это граничное условие на втором шаге анализа таким образом, чтобы 1 степень свободы была бы не ограниченной, когда прикладывается нагрузка.
- pp) Нагрузку с именем Pressure, которая прикладывается к концу сплошной части проушины в процессе выполнения второго шага анализа. Рисунок 11-42 иллюстрирует ограничение и нагрузку давления, приложенную к сплошной петле.



Рисунок 11-42 Вторая проушина зафиксирована и нагружена.

11.10.1 Создание ограничений для проушины с отверстием

Приложим граничное условие к грани на конце проушины с отверстием, чтобы зафиксировать эту часть в процессе анализа.

Чтобы наложить ограничение на часть петли с отверстием для смазки:

- 1. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по контейнеру **BCs** и в появившемся меню выберите **Manager**..
- 2. В этом диалоговом окне кликните Create.
- 3. В диалоговом окне Create Boundary Condition:
 - a. Дайте граничному условию имя Fixed.

- b. Примите в качестве шага Initial из соответствующего списка.
- с. В качестве Category примите выбор по умолчанию Mechanical.
- d. Для выбранного шага в качестве типа граничного условия выберите Displacement/Rotation.
- e. Кликните Continue.
- f. В правой части области инструкций кликните по Select in Viewport, чтобы выбрать объект непосредственно в графическом окне.
- 4. Выберите помеченную сеткой грань, показанную на рисунке 11-43 в качестве области, к которой будет приложено граничное условие.



Рисунок 11-43 Приложите граничное условие к концу части петли с отверстием для смазки.

Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы указать, что вы закончили выбор областей. Появится диалоговое окно Edit Boundary Condition.

- 5. В этом диалоговом окне:
 - а. Включите кнопки, помеченные как **U1**, **U2** и **U3**, чтобы ограничить перемещения конца петли в направлениях 1, 2 и 3. Вам нет необходимости ограничивать вращательные степени свободы петли, так при построении сетки для петли будут использоваться твердые элементы (которые имеют только трансляционные степени свободы).
 - b. Кликните **ОК**, чтобы закрыть диалоговое окно.

Совет: Вы можете подавить стрелки граничного условия точно также, как вы подавляете видимость экземпляров детали. Кликните по закладке **BC** в диалоговом окне **Assembly Display Options**, чтобы увидеть опции граничных условий.

11.10.2 Граничные условия для штифта

На первом общем шаге анализа вы задействуете контакт между двумя частями петли и между частями петли и штифтом. Чтобы зафиксировать штифт в процессе этого шага, вы должны наложить граничное условие на штифт, которое ограничивает его степени свободы.

Чтобы приложить граничное условие к штифту:

B Boundary Condition Manager кликните Create.

a. В диалоговом окне Create Boundary Condition:Дайте граничному условию имя NoSlip. Примите в качестве шага Initial в текстовом поле Step. В качестве Category примите выбор по умолчанию Mechanical. Для выбранного шага в качестве типа граничного условия выберите Displacement/Rotation. Кликните Continue. b. В графическом окне выберите опорную точку жесткого тела на штифте в качестве области, к которой будет приложено граничное условие. Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы указать, что вы закончили выделение областей. В диалоговом окне Edit Boundary Conditions ограничьте все степени свободы штифта. Кликните **ОК**.

11.10.3 Изменение граничных условий, приложенных к штифту

Объекты, созданные и модифицируемые на определенных шагах — такие как граничные условия, нагрузки и взаимодействия — имеют специальные менеджеры, позволяющие модифицировать объекты и изменять их статус на различных шагах анализа. В этом разделе используем менеджер граничных условий для модификации условия NoSlip, так чтобы перемещение в направлении 1 и вращение вокруг оси 2 были освобождены в течение шага нагружения.

В данный момент **Boundary Condition Manager** отображает имена двух созданных граничных условий, а также их статус на каждом шаге: оба граничных условия имеют статус **Created** на начальном шаге и статус **Propagated** на последующих шагах.

Чтобы модифицировать граничное условие:

1. В Boundary Condition Manager кликните по ячейке помеченной как Propagated, что находится в строке с именем NoSlip и в колонке с именем Load, Как показано на рисунке 11-44. Ячейка станет подсвеченной.

Boundary Condition Manager							
	Name	Initial	Contact	Load	Edit		
$\overline{}$	Fixed	Created	Propagated	Propagated	Move Left		
	NoSlip	Created	Propagated	Propagated	Move Right		
					Move Right		

Рисунок 11-44 Выберите граничное условие для редактирования в Boundary Condition Manager.

- 2. В правой стороне менеджера кликните по **Edit**, чтобы указать, что вы хотите отредактировать граничное условие NoSlip на шаге Load.
- 3. В редакторе выключите кнопки с метками U1 и UR2, так что штифту будет позволено перемещаться в направлении 1 и вращаться вокруг оси 2. Кликните OK, чтобы закрыть диалоговое окно. В Boundary Condition Manager статус граничного условия NoSlip на шаге Load стане Modified.

11.10.4 Ограничение сплошной части петли

На первом шаге решения, в котором вводится контакт, ограничим во всех направлениях единственный узел сплошной части петли. Эти ограничения вместе с контактом штифта достаточны, чтобы предотвратить движение жесткого тела сплошной части. На втором шаге анализа, в котором к модели прикладывается нагрузка, снимим ограничение на перемещение в направлении 1.

Чтобы наложить ограничение на сплошную часть петли:

На шаге Initial создайте граничное условие на перемещение и назовите Constrain.

1. Примените это граничное условие к вершине, выбранной на сплошной части петли, как показано на рисунке 11-45.



Рисунок С-45 Наложите граничное условие к вершине в сплошной части петли.

- 2. Ограничьте перемещения вершины в направлениях 1, 2 и 3.
- 3. На шаге Load модифицируйте граничное условие таким образом, чтобы петля была бы не ограничена в направлении 1.
- 4. Когда закончите создавать граничное условие, кликните **Dismiss**, чтобы закрыть **Boundary Condition Manager**.

11.10.5 Приложение нагрузки к сплошной части проушины

Теперь приложим давление к грани на конце сплошной части петли. Приложим эту нагрузку в направлении 1 на втором шаге анализа.

Чтобы приложить нагрузку к сплошной части петли:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру Loads, чтобы создать новую нагрузку. В появившемся диалоговом окне дайте нагрузке имя Pressure, и примите Load в качестве шага в текстовом поле Step. В списке Category примите выбор по умолчанию Mechanical. Из списка типов Types for Selected Step выберите Pressure, а затем кликните Continue
- 2. В графическом окне выберите грань на конце сплошной части петли в качестве поверхности, к которой прикладывается нагрузка, как показано на рисунке 11-46.



Рисунок 11-46 Приложите нагрузку к сплошной части проушины.

- 3. Кликните 2-й кнопкой мыши, чтобы указать, что вы закончили выбор областей.
- 4. Появится диалоговое окно Edit Load. В этом диалоговом окне введите величину -1.Е6 для нагрузки и кликните **ОК**.

11.11 Построение сетки для сборки

Построение сетки для сборки подразделяется на следующие операции:

- qq) Проверка того, что для представления детали в сборке можно построить сетку и создать дополнительное ее деление там, где это необходимо.
- rr) Присваивание атрибутов сетки представлению детали.
- ss) Разметка представления детали.
- tt) Построение сетки для представления детали.

11.11.1 Приложение нагрузки к сплошной части петли

Когда вы входите в модуль Mesh, Abaqus/CAE кодирует цветом области модели в соответствии с методами, которые он использует для построения сетки:

- uu) Зеленый цвет показывает область, для которой может быть построена сетка с использованием структурированных методов.
- Weлтый цвет указывает область, для которой может быть построена сетка с использованием методов развертки.
- ww) Оранжевый цвет указывает область, для которой не может быть построена сетка с используемой по умолчанию формой (гексагональной) элементов, и она должна быть разбита на части. (В качестве альтернативы вы можете строить сетку для любой модели присваиванием модели тетрагональных элементов и использованием методов свободного построения сетки).

В этом разделе Abaqus/CAE покажет, что часть петли с отверстием для смазки должна быть разбита на части, чтобы построить сетку с гексагональными элементами. В частности, должны быть разбиты области, окружающие отверстие во фланце. Разделенные петли показаны на рисунке 11-47.



Рисунок 11-47 Петли, разбитые на части.

Напомним, что экземпляры детали классифицируются по умолчанию как зависимые. Все зависимые экземпляры детали должны иметь идентичную геометрию (включая разбиение) и сетки. Чтобы удовлетворить этому требованию, все разбиения должны быть созданы на исходной детали, а все атрибуты сетки должны быть присвоены также исходной детали. Вы должны исследовать детали по отдельности, чтобы определить, какие действия (если они вообще требуются) необходимы для создания сетки с гексагональными элементами.

Замечание: Преимущество зависимых экземпляров детали в том, что если вы создаете много экземпляров одной и той же детали, то вы можете манипулировать и строить сетку только с исходной деталью; эти свойства автоматически наследуются зависимыми экземплярами. Поскольку в данном уроке вы создали только по одному экземпляру каждой детали, то вы могли их сделать независимыми и работать с ними также легко. Это позволило бы создавать разбиения и присваивать атрибуты сетки на уровне сборки, а не уровне детали. Вы можете сделать зависимый экземпляр детали независимым, щелкнув 3-й кнопкой мыши в Дереве Модели по контейнеру Instances и выбрав опцию Make independent.

Чтобы решить, что подлежит разбиению:

1. В Дереве Модели раскройте элемент **Hinge-hole** в контейнере **Parts** и дважды кликните в появившемся списке по элементу **Mesh**.

Замечание: Если экземпляр детали был независимым, вам следовало раскрыть имя экземпляра в контейнере Instances и щелкнуть по элементу **Mesh** в появившемся списке.

Abaqus/CAE покажет на экране часть петли с отверстием для смазки. Часть в виде куба петли закрашена зеленым цветом, чтобы показать, что для нее можно построить сетку с использованием структурированных методов; Фланец с отверстием для смазки окрашена оранжевым цветом, чтобы показать, что она подлежит разбиению для построения сетки с использованием гексагональных элементов, как показано на рисунке 11-48.



Рисунок 11-48 Для фланца с отверстием для смазки сетка не может быть построена.

- 2. Чтобы изобразить сплошную часть петли, используйте поле Object, которое появится в контекстном меню. Abaqus/CAE покажет ее изображение. Как и раньше, кубическая часть закрашена зеленым цветом, указывая тем самым на возможность построения сетки с использованием структурированного метода. Фланец без отверстия для смазки закрашен желтым цветом, чтобы указать, что для него можно построить сетку с помощью метода развертки.
- 3. В поле Object выберите штифт (pin). Abaqus/CAE изобразит его оранжевым цветом, поскольку на аналитической твердой поверхности нельзя построить сетку.

Таким образом, для построения сетки с гексагональными элементами часть петли с отверстием для смазки должна быть разбита; для сплошной части петли не требуется каких-либо действий.

11.11.2 Разбиение на части фланца с отверстием для смазки

Для того, чтобы Abaqus/CAE построил сетку на фланце с отверстием для смазки, он должен быть разбит на области, показанные на рисунке 11-49.



Рисунок 11-49 Затененный вид фланца, разбитого на области.

Чтобы разбить фланец с отверстием для смазки:

- 1. В главном меню выберите Tools—>Partition.
- 2. Вы хотите разбить всю область, которая образует фланец. В диалоговом окне Create Partition выберите Cell в качестве типа Туре разбиения и кликните по методу Define cutting plane (определить секущую плоскость).
- 3. Выберите фланец петли с отверстием для смазки. Кликните **Done**, чтобы указать, что вы закончили выбор ячеек. Abaqus/CAE предоставляет три метода для задания секущей плоскости:
 - a) Выбрать точку и нормаль. Секущая плоскость проходит через выбранную точку, нормально к выбранному ребру.
 - b) Выбрать три не коллинеарные точки. Секущая плоскость проходит через каждую из точек.
 - c) Выбрать ребро и точку вдоль ребра. Секущая плоскость проходит через выбранную точку, нормально к выбранному ребру.

Секущая плоскость не обязательно должна быть определена в разбиваемой ячейке. Плоскость простирается до бесконечности и разбивает выбранную ячейку всюду, где имеет место пересечение.

- 4. Из кнопок в области инструкций выберите 3 points. Abaqus/CAE подсветит точки, из которых вы можете их выбирать.
- 5. Выберите три точки, которые вертикально рассекают фланец пополам, как показано на рисунке 11-50.



Рисунок 11-50 Выберите три точки, используемы для разбиения фланца.

- 6. В области инструкций кликните по Create Partition. Abaqus/CAE создаст нужное разбиение.
- 7. Выберите **Assembly** в поле **Object** контекстного пеню, чтобы отобразить сборку модели в графическом окне. Сборка со всеми разбиениями показана на рисунке 11-51.



Рисунок 11-51 Модель с разбиениями.

11.11.3 Присваивание управляющих параметров сетки

В этом разделе вы используете диалоговое окно Mesh Controls, чтобы изучить способы, которые использует Abaqus/CAE для построения сетки деталей, и формы элементов, который будет генерировать Abaqus/CAE.

Чтобы присвоить управляющие параметры сетки:

- 1. Мы не можем построить сетку на аналитической жесткой поверхности. Как следствие, мы не можем применить управляющие параметры сетки к такой поверхности; ни произвести разметку ее, ни присвоить ей тип элементов. Таким образом, мы должны иметь дело только с частями петли. Поскольку экземпляры деталей являются зависимыми от определения исходной детали, вы должны присвоить управляющие элементы сетки (параметры настройки, тип и размер разметки) каждой части петли по отдельности. Для удобства вы начнете с участка проушины с отверстием.
- 2. Сделайте эту часть петли с отверстием текущей в графическом окне. В главном меню выберите Mesh—>Controls.

- 3. Протащите прямоугольник вокруг детали, чтобы выбрать все ее области, и кликните Done, чтобы указать завершение выделения.
- 4. В этом диалоговом окне примите выбор по умолчанию **Hex** для формы элемента **Element Shape**.
- 5. В качестве метода построения сетки, который будет использовать Abaqus/CAE, выберите **Swept**.
- 6. В качестве алгоритма построения сетки выберите Medial axis.
- 7. Кликните **ОК**, чтобы присвоить управляющие параметры и закрыть диалоговое окно.
- 8. Вся часть петли станет желтой, указывая, для нее будет построена сетка по методу Swept.
- 9. Кликните **Done** в области инструкций.
- 10. Повторите описанные выше шаги для сплошной части петли.

11.11.4 Присваивание типа элементов сетки

В этом разделе вы используете диалоговое окно **Element Type**, чтобы изучить типы элементов, которые присваиваются каждой части. Для удобства вы начнете с части проушины с отверстием.

Чтобы присвоить тип элементов сетки:

- 1. Сделайте текущей в графическом окне часть петли с отверстием. В главном меню выберите **Mesh—>Element Type**.
- 2. Выберите часть петли с отверстием, используя тот же прием, описанный при работе с управляющими параметрами сетки, И затем кликните **Done**, чтобы указать завершение выделения.
- 3. В появившемся диалоговом окне примите **Standard** в качестве выбора библиотеки элементов **Element Library**.
- 4. Примите Linear в качестве выбора Geometric Order.
- 5. Примите выбор по умолчанию **3D Stress** для семейства элементов **Family**.
- Кликните по закладке Hex и выберите (если он еще не выбран) метод Reduced Integration для Element Controls. В нижней части диалогового окна появится описание для типа элемента по умолчанию, C3D8R. Abaqus/CAE ассоциирует элементы C3D8R с элементами сетки.
- 7. Кликните **ОК**, чтобы присвоить тип элементов и закрыть диалоговое окно.
- 8. Кликните Done в области инструкций.
- 9. Повторите описанные выше шаги для сплошной части петли.

11.11.5 Разметка экземпляров детали

Следующий шаг в процессе построения сетки состоит в разметке каждого из экземпляров детали. Разметка представляет собой приблизительное расположение узлов и указывает желательную плотность сетки, которую вы собираетесь сгенерировать. Вы можете выбрать способ разметки, основанный на количестве элементов, которые будут сгенерированы вдоль ребра, или на среднем размере элементов, или увеличить плотность распределения по направлению к одному концу ребра. Для данного примера вы разметите деталь таким образом, чтобы части детали имели бы средний размер элемента, равный 0.008. Для удобства начнем с части проушины с отверстием.

Чтобы разметить детали:

- 1. Сделайте текущей в графическом окне часть петли с отверстием. В главном меню выберите Seed—>Part.
- 2. В появившемся диалоговом окне **Global Seed** введите приближенный глобальный размер элементов 0.008 и кликните **OK**.На всех гранях появится разметка.
- 3. Кликните Done в области инструкций.
- 4. Повторите описанные выше шаги для сплошной части петли.

11.11.6 Построение сетки для сборки модели

В этом разделе вы построите сетку деталей. Для удобства вы начнете с части петли с отверстием для смазки

Чтобы сгенерировать сетку сборки модели:

- 1. Сделайте текущей в графическом окне часть петли с отверстием. В главном меню выберите Mesh—>Part.
- 2. Кликните **Yes** в области инструкций, чтобы создать сетку. Повторите описанные выше шаги для сплошной части петли.

Операция построения сетки завершена. Отобразите сборку модели в графическом окне, чтобы увидеть окончательную сетку, как показано на рисунке 11-52.



Рисунок 11-52 Окончательный вид модели с построенной сеткой.

11.12 Создание и инициализация задания

Теперь, когда после конфигурирования модели, вы построите задание, ассоциированное с моделью, и инициализируете его для анализа.

Чтобы создать и инициализировать задание для анализа:

- 1. В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру Jobs, чтобы создать задание.
- 2. Дайте ему имя PullHinge, и кликните Continue.
- 3. В поле Description наберите описание Hinge tutorial.
- 4. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по заданию с именем PullHinge и в появившемся меню выберите Submit, чтобы инициализировать задание для анализа.
- 5. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по имени задания и в появившемся меню выберите Monitor, чтобы организовать мониторинг задания.

Появится диалоговое окно с именем вашего задания в области заголовка и график состояния анализа. Сообщения появляются в нижней панели диалогового окна по мере выполнения задания. Кликните по закладкам Errors и Warnings, чтобы проверить возможные проблемы в анализе.

Как только анализ будет запущен, в отдельном окне графического окна появится X-Y график значений степени свободы, которую вы выбрали для мониторинга ранее в этом уроке. (Чтобы увидеть его, может возникнуть необходимость изменить размер графического окна). Вы можете проследить развитие смещения узла во времени в направлении 1 в процессе выполнения анализа.

6. Когда задание успешно завершится, состояние задание, появляющееся в Дереве Модели, изменится на Competed. Теперь вы можете просмотреть результаты анализа с помощью модуля Visualization. В Дереве Модели кликните 3-й кнопкой мыши по имени задания и в появившемся меню выберите Results. Abaqus/CAE вызовет модуль Visualization, откроет выходную базу данных, созданную заданием, и выведет на экран недеформированную форму модели.

Замечание: Вы можете также войти в модуль Visualization в списке Module, расположенном в контекстной панели. Однако в данном случае Abaqus/CAE требует, чтобы вы открыли выходную базу данных явно, используя меню File.

11.13 Отображение результатов расчёта

Теперь просмотрим результаты анализа, изобразив контурный график деформируемой модели. Вы будете также использовать дисплейную группу, чтобы изобразить одну из частей петли; выводя изображение только части модели, вы можете увидеть результаты, которые не видимы, когда изображается вся модель.

11.13.1 Вывод на экран и настройка контурного графика

В этом разделе вы выведите на экран контурный график модели и подберете коэффициент масштабирования для деформации.

Чтобы вывести на экран контурный график модели:

 В главном меню выберите Plot—>Contours—>On Deformed Shape. Abaqus/CAE изобразит контурный график напряжений Мизеса, наложенный на деформированную форму модели в конце последнего приращения шага нагружения, как указывает следующий текст в блоке состояний:

Step: Load, Apply load

Increment 6: Step Time = 1.000

По умолчанию все поверхности, на которых нет результатов (в данном случае это штифт), отображаются белым цветом. Деформация несколько преувеличена из-за масштабного коэффициента, который выбрал Abaqus/CAE.

- 2. Чтобы удалить белые места с экрана поверхности, сделайте следующее:
 - a. В Дереве Результатов раскройте элемент Surface Sets под файлом выходной базы данных с именем PullHinge.odb.
 - b. Выберите все поверхности, которые появились в списке.
 - с. Кликните 3-й кнопкой мыши и в появившемся меню выберите Remove.
- 3. Чтобы уменьшить масштабный коэффициент, сделайте следующее:
 - а. В главном меню выберите Options—>Common.
 - b. Среди опций Deformation Scale Factor выберите Uniform.
 - с. В текстовом поле Value наберите значении 100, и кликните **ОК**.

Abaqus/CAE изобразит контурный график с коэффициентом масштабирования деформации, равным 100, как показано на рисунке 11-53.



Рисунок 11-53 Контурный график напряжений Мизеса с уменьшенным коэффициентом масштабирования.

- 4. Используйте инструменты манипулирования видами, чтобы изучить деформированную модель. Обратите внимание, где штифт приводит к появлению более высокого давления в противоположность внутренности фланцев. Обратите внимание также на то, как два фланца закручены относительно друг друга.
- 5. По умолчанию контурный график показывает напряжения Мизеса в модели. Вы можете изобразить другие переменные, выбрав Result—>Field Output.
- 6. Кликните по закладке Primary Variable этого диалогового окна, и выберите S11 из списка опций Components. Кликните Apply, чтобы увидеть контурный график напряжений в направлении 1.
- 7. В списке опций **Invariant** выберите **Max.Principal**, и кликните **Apply**, чтобы увидеть максимальные главные напряжения в модели.
- 8. Выберите любые другие интересующие вас переменные в диалоговом окне Field Output.
- 9. Из списка Invariant выберите Mises и кликните OK, чтобы снова отобразить напряжения Мизеса, и закрыть диалоговое окно.

11.13.2 Вывод на экран и настройка контурного графика

Теперь создадим дисплейную группу, которая включает только набор элементов, которые образуют часть проушины с отверстием. Удалив с экрана все остальные наборы элементов, вы сможете увидеть результаты для поверхности фланца, которые контактируют с другой петлей.

Чтобы создать дисплейную группу:

- 1. В Дереве Результатов раскройте контейнер Instances.
- 2. Из списка доступных экземпляров деталей выберите HINGE-HOLE-1. Кликните 3-й кнопкой мыши и в появившемся меню выберите **Replace**, чтобы заменить текущую дисплейную группу выбранными элементами. Контурный график всей модели заменится графиком только выделенной части петли, как показано на рисунке 11-54.



Рисунок С-54 Используйте дисплейную группу, чтобы увидеть контурный график напряжений Мизеса в части петли с отверстием для смазки.

- 3. Используйте инструменты манипулирования видом, чтобы увидеть петлю под различными углами. Вы не можете видеть результаты для поверхностей петли, которые закрыты сплошной ее частью
- 4. В главном меню выберите Result—>Field Output.
- 5. В верхней части закладки Primary Variable включите опцию List only variables with results: и в меню выберите at surface nodes.
- 6. Из появившегося списка переменных выберите CPRESS и кликните Apply.

Глава 13: Создание скриптов в Abaqus

Простой сценарий в ABAQUS

Программный комплекс ABAQUS кроме высокопроизводительного ядра включает в себя встроенный интерпретатор языка Python. Python — это интерпретируемый алгоритмический объектно-ориентированный язык со строгой динамической типизацией. В системе он выполняет функцию внутреннего языка сценариев (скриптов), являясь прослойкой между ядром и другими модулями.



Рисунок 1 Взаимодействие с программными интерфейсами ABAQUS

С помощью интерфейса сценариев осуществляются различные действия как над моделью из базы данных модели, так и над данными, сохраненными в базе данных результатов расчета. Среди них можно выделить:

- чтение данных модели, описывающих геометрию составных частей сборки, например, узловых координат, связей между элементами, типов и формы элементов;
- чтение данных модели, описывающих секции и материалы, а также использование их в сборке;

- чтение данных вывода (field output) для выбранных шагов, фреймов и областей;
- чтение истории нагружения (history output);
- выполнение действий с данными пространственного вывода и данными истории нагружения;
- запись перечисленных выше данных в текущую базу результатов расчета или создание новой;
- запуск расчетных задач.

При использовании графического пользовательского интерфейса *Abaqus* (GUI) для создания модели или визуализации результатов после каждой операции генерируются внутренние команды Abaqus/CAE. Эти команды отображают созданную пользователем геометрию в соответствии с выбранными параметрами и настройками в диалоговом окне. GUI генерирует команды на языке Python. Команды, выдаваемые GUI, передаются ядру Abaqus/CAE. Ядро интерпретирует команды и, используя текущие параметры и настройки, создает внутреннее представление модели. Ядро Abaqus/CAE можно назвать «мозгом» системы, а GUI – интерфейс между пользователем и ядром. Интерфейс сценариев Abaqus позволяет обойти ABAQUS/CAE GUI и взаимодействовать напрямую с ядром, путем создания файлов, содержащих команды интерфейса сценариев Abaqus, позволяющие осуществлять следующие действия:

- Автоматизация часто повторяющихся действий. Например, создание сценария, автоматически запускаемого при старте ABAQUS/CAE. Такой скрипт может, к примеру, генерировать библиотеку стандартных материалов. В результате, при работе с модулем **Property**, эти материалы будут доступны. Подобным образом, сценарий может быть использован при создании удаленных очередей для запуска расчетных задач. Эти очереди будут доступны в модуле **Job**.
- Проведение параметрического анализа. Например, создание скрипта, который пошагово изменяет геометрию детали и проводит расчет. Также можно считывать результаты, отображать результаты и генерировать аннотированные документальные копии проведенного расчета.
- Создание и изменение модельных баз данных и моделей, созданных в Abaqus/CAE GUI.
- Доступ к базам данных результатов (выходной файл результатов). Например, проведение собственной постобработки результатов расчета. Результаты могут быть записаны в выходной файл результатов и отображены с помощью модуля Visualization Abaqus/CAE.

Интерфейс сценариев Abaqus является расширением языка Python, использует его синтаксис и операторы. Поэтому, описываемые возможности и особенности интерфейса сценариев в равной степени относятся к самому языку Python, который можно использовать в качестве сценарного языка для связи программных компонентов. Python поддерживает модули и пакеты, поощряя модульность и повторное использование кода.

Python широко используется в системе:

- конфигурационный файл среды ABAQUS (abaqus_v6.env) использует выражения Python;
- определения параметров в секциях *PARAMETER во входном файле расчета (*.inp);
- для проведения параметрического анализа требуется создание и запуск программного сценария Python (*.**psf**);
- Abaqus/CAE в процессе работы записывает все команды текущей сессии в *файл перезапуска* (***.rpy**);
- создание и запуск пользовательских командных сценариев;
- доступ к выходному файлу результатов (*.odb).

Подробное описание языка Python доступно на официальном сайте Python, а особенности работы с использованием интерфейса сценариев раскрыты в документации Abaqus в разделе, посвященном интерфейсу сценариев.

Рассмотрим простой пример сценария, определяющего максимальное значение напряжения для текущего файла результатов.

. . .

```
Имя сценария:
get_max_Mises.py
Назначение:
Данный сценарий читает файл результатов расчета и определяет максимальное значение
напряжения для элемента.
Результаты и дополнительная информация выводятся в статусном окне в нижней части
рабочего окна, а также найденный элемент выделяется красным цветом в окне просмотра.
Применение:
Откройте выходной файл результатов в Abaqus/CAE или /Viewer, запустите сценарий.
. . .
# Начинаем работу с импорта необходимых модулей
#
from abaqus import *
from odbAccess import *
from visualization import *
from displayGroupMdbToolset import *
from displayGroupOdbToolset import *
# Определим текущий объект в порте просмотра
# (пользователь может не открыть файл результатов или работать с моделью)
# в случае отсутствия текущего файла результатов, сообщаем об этом пользователю и останавливаем работу
vp = session.viewports[session.currentViewportName]
odb = vp.displayedObject
if type(odb) != OdbType:
      raise 'An output database must be displayed in the current viewport'
# Найдем максимальные значения напряжения
maxMises = 0.0
haveStressOutput = FALSE
for step in odb.steps.values(): #по всем шагам расчета
      print ' '
      print '------'
      print 'Processing Step:', step.name
      for frame in step.frames:
                                          #по всем фрэймам
            try:
                  stress = frame.fieldOutputs['S'] # тип S - Stress
                  haveStressOutput = TRUE
            except KeyError: # пропускаем фрэймы, для которых не рассчитывается значение напряжения
                  continue
            for stressValue in stress.values: # основной цикл нахождения максимума
                   if (stressValue.mises > maxMises): # запомним промежуточные значения
                         maxMises = stressValue.mises
                         maxInstance = stressValue.instance
                         maxElem = stressValue.elementLabel
                         maxIntegrationPoint = stressValue.integrationPoint
                         maxSectionPoint = stressValue.sectionPoint
```

maxStep, maxFrame = step, frame

if not haveStressOutput: # в случае, если в задаче не рассчитывались напряжения, # сообщаем пользователю и останавливаем работу

raise 'This output database does not have stress output'

```
# В случае, если максимум успешно найден, выведем результат в окне статуса
```

print 'Found maximum von Mises stress of %E in' % maxMises
print ' Instance: ', maxInstance.name
print ' Element: ', maxElem
print ' Section point: ', maxSectionPoint
print ' Integration point: ', maxIntegrationPoint
print ' Step: ', maxStep.name
print ' Frame: ', maxFrame.frameId
print '-----'

Выделим цветом найденный элемент в окне просмотра

для начала найдем этот элемент

leaf =

LeafFromElementLabels(partInstanceName=maxInstance.name,elementLabels=(maxElem,)) # установим для него цвет - красный

vp.setColor(leaf=leaf, fillColor='Red')

разнесем элементы модели на небольшое рассотяние

vp.odbDisplay.deformedShapeOptions.setValues(renderStyle=FILLED, elementShrink=ON, elementShrinkFactor=0.15)

режим отображения - деформированная деталь

vp.odbDisplay.display.setValues(plotState=(DEFORMED,))

#установим режим отображения, чтобы деталь полностью помещалась в окне просмотра vp.view.fitView()

Данный сценарий может быть сохранен на диске и в дальнейшем использоваться. Результат работы сценария для расчета балки:



HI I I M I M I



Рисунок 2 Результат работы сценария

Запуск сценариев в ABAQUS может быть выполнен следующими способами:

- Экран запуска при старте ABAQUS/CAE/Viewer: Выбор соответствующего пункта в диалоговом окне или пункта главного меню, выбор файла скрипта на диске последующий запуск.
- Автоматически при запуске ABAQUS/CAE/Viewer: ABAQUS cae script=myscript.py или ABAQUS viewer script=myscript.py
- Из командной строки ABAQUS/CAE: execfile('myscript.py')
- Без графической оболочки ABAQUS/CAE GUI (не для всех сценариев):
 C:\> ABAQUS cae noGUI=myscript.py или
 C:\> ABAQUS viewer noGUI=myscript.py

Глава 14 : Система единиц

Перед началом построения любой модели, вы должны решить, какую систему единиц будете использовать. ABAQUS не имеет встроенной системы единиц. Все данные должны быть определены в взаимосвязанных единицах. Некоторые общие системы последовательных единиц изображены на рисунке.

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	Ν	Ν	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s²/in
Time	S	S	S	S
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in²)
Energy	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

15. Литература

- 1. SIMULIA Abaqus/CAE User`s Manual v 6.7 2008
- 2. SIMULIA Abaqus Example Problems Manual v6.7 2008
- 3. SIMULIA Abaqus/CAE User`s Manual v 6.10 2010
- 4. SIMULIA Abaqus Example Problems Manual v6.10 2010

15.1 Тестовые задачи

Так же вы можете просмотреть в интерактивном режиме решение задач SIMULIA/Abaqus, использую входящие в состав поставки PYTHON скрипты.

Для этого перейдите в директорию, в которую вы установили SIMULIA/Abaqus – по умолчанию C:\Abaqus\6.7-2SE\samples\job_archive\ и разархивируйте файл samples.zip

После этого запустите Abaqus/CAE и в появившемся при загрузке диалоговом окне, или в главном меню выберете Run Script...