SIMULIA Abaqus

Электронное методическое пособие Решение прикладных задач (Часть 2)



Компания «ТЕСИС», 2018 г.



УДК: 004.942

Авторы: Крючков А.Э. ООО ТЕСИС, г. Москва;
Арсланова Л.И., УГНТУ, г.Уфа;
Дияров К.А., Сухарев К.В., УГНТУ, г.Уфа;
Маликов П.В., "Прогресстех", г. Москва;
Мальгин М.Г., Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев;
Самигуллина Л.Г., "НПК КБМ", г. Коломна
Черкашина Т.И., ЛГТУ, г. Липецк

Рецензенты:

сотрудники ООО «ТЕСИС» Нуштаев Д.В., Кисловский А.О. редакция: Тропкин С.Н.

Методическое пособие составлено на базе работ участников конкурса на лучший расчётный проект SIMULIA Abaqus Student Edition, проведённого компанией ТЕСИС в рамках международного форума «Инженерные системы – 2015, 2016».

Излагается технология применения учебной версии программного комплекса SIMULIA Abaqus Student Edition для решения задач статической и динамической прочности. Проводится подробное описание последовательности действий, необходимых для создания расчетных моделей.

Электронное методическое пособие «SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач. Часть 2 ». – Москва: ТЕСИС, 2018. – 160 с.



СОДЕРЖАНИЕ

1.	Оценка напряженно-деформированного состояния ферменной
КО	нструкции4
2.	Оценка напряженно-деформированного состояния пластины с отверстием.
3a,	дача Кирша15
3.	Рост трещины под действием сжимающей нагрузки
4.	Определение значения Ј-интеграла и коэффициента интенсивности
на	пряжений для трещины отрыва53
5.	Моделирование местной потери устойчивости тонкостенных элементов .71
6.	Моделирование процесса мягкого обжатия на стадии неполной
кр	исталлизации
7.	Анализ контактных напряжений от болтовых соединений118
8.	Моделирование напряженно-деформированного состояния стального
ди	ска



1. Оценка напряженно-деформированного состояния ферменной конструкции

Автор: Крючков А.Э.

Организация: ООО ТЕСИС

В данной работе рассматривается статически неопределимая конструкция, для которой находится поле перемещений и выполняется оценка напряженно-деформированного состояния. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема задачи. К точке 1 прилагается сила в $F_y = -40$ кН. Данная точка находится на расстоянии 3,05 м от узлов 2 и 4. Точка 3 находится на расстоянии 3,05 м от точек 2 и 4, формируя квадрат. Точки 2, 3 и 4 жестко закреплены. Балка 1 соединяет точки 1 и 2, балка 2 соединяет точки 1 и 3, и балка 3 соединяет точки 1 и 4. Линейный статический анализ выполняется с использованием стержневых конечных элементов. Свойства материала указаны в таблице 1.1.



Рисунок 1.1 – Постановка задачи

Таблица 1 – Параметры материала

Модуль Юнга, (Па)	Коэффициент Пуассона	Площадь сечения, (M^2)
$2,07 \ 10^{11}$	0,3	1,29 10 ⁻³

В работе выполнено сравнение численного и аналитического решений для перемещений узла 1. Получены напряжения в первой балке – 27 МПа; во второй: – 10 МПа; и в третьей – 7 МПа [1].



Система координат модели и система единиц измерения

Построение расчетной модели и обработка результатов производится в

декартовой системе координат в международной системе единиц (СИ).

Таблица 2 – Система единиц измерения

Длинна	Сила	Macca	Время	Давление
$\mathcal M$	Н	г	С	Па

Геометрическая модель

Откроем в дереве модели модуль *SKETCH*. Для создания чертежа нажмите на кнопку *Create Sketch* , или дважды щелкните на значке Sketches в дереве модели (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 - Создание эскиза модели

В появившемся окне назовите чертеж *truss_demo* и нажмите *Continue*. В появившемся рабочем поле, воспользовавшись инструментом +, создаем четыре точки с координатами (0,0), (3,05,0), (3,05, 3,05), (0, 3,05).

После задания координат каждой точки, подтверждаем свой выбор клавишей *Enter* (или средней кнопкой мыши). Затем с помощью инструмента соедините точку (0,0) с тремя другими точками (Рисунок 2.2). В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки *Cancel*. Выходим из режима Эскиз, нажав кнопку *Done*.





Рисунок 2.2 – Построение эскиза модели

Откроем в дереве модели модуль *PART*. Для создания детали нажмите кнопку Create Part ¹ или дважды щелкните на значке ¹ Parts в дереве модели (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - Создание модели

В появившемся окне *Create Part* (Рисунок 2.3) примите следующие установки: 2D (двухмерного), *Deformable* (деформируемого) тела и *Wire* в качестве базового свойства. Щелкните *Continue*, чтобы закрыть диалоговое окно. Теперь можно добавить ранее созданный чертёж. Для этого нажмите на *Add => Sketch* и выберите чертёж модели *truss_demo*. Нажмите *Done*, чтобы подтвердить выбор. Выходим из режима *Эскиз*, нажав кнопку *Done*.



Модель материала

Для создания материала, из которого изготовлена модель, воспользуемся либо элементом меню *Material* => *Create*, либо кнопкой *Create Material* $\stackrel{[]}{\sim}$ на текущей панели инструментов или дважды кликнув на $\stackrel{[]}{\sim}$ Materials в дереве модели. В появившемся окне *Edit Material* в меню редактора выберем *Mechanical* => *Elasticity* => *Elastic* и введем значение модуля Юнга – 2,07 10¹¹ – и коэффициента Пуассона – 0.3 (Рисунок 2.4).

<table-cell-rows> Edit Mat</table-cell-rows>	erial	×
Name: Mat	erial-1	
Description:		1
Material B	haviors	
Elastic		
C 1		01
General	Mechanical Inermal Electrical/Magnetic	<u>O</u> ther
Elastic	Plasticity	Hyperelactic
Type: Iso	Damage for Ductile Metals	Hyperfoam ptions
	Damage for Traction Separation Laws	Low Density Foam
	Damage for Fiber-Reinforced Composites	Hypoelastic
Number o	Damage for Elastomers	Porous Elastic
Moduli tin	Deformation Plasticity	Viscoelastic
	<u>D</u> amping	
Noten	Expansion	
Data	Brittle Cracking	
Data	E <u>o</u> s	
Y	Viscosity	
1 2	.07e11 0.3	
	ОК	Cancel

Рисунок 2.4 – Определение модели материала

Для того чтобы определить сечение открываем диалоговой окно *Create Section* (вызов возможен либо из *Дерева модели*, либо через иконку I). В диалоговом окне *Create Section* оставим имя *Section-1* по умолчанию. В соответствующих списках выберете *Beam, Truss* и нажмите *Continue*. В появившемся окне редактора сечений *Edit Section*, в качестве материала необходимо указать созданный ранее материал *Material-1*, и указать площадь сечения равное 1,29 10⁻³ м² (Рисунок 2.5).





Рисунок 2.5 – Создание сечения

Следующим шагом присвоим построенное сечение ранее созданной геометрии. Для этого используем иконку **34** Assign Section в текущей панели инструментов, дважды щелкаем по элементу в дереве модели, или через основное меню Assign => Section. С помощью мыши выделите геометрическую модель, она будет подсвечена красным цветом. Нажмите Done. В появившемся окне, выберите созданное сечение Section-1 и подтвердите выбор нажатием кнопки OK.

≑ Create Instance	×
Create instances from: Parts O Models	
Parts	
Part-1	
Instance Type	
Dependent (mesh on part)	
O Independent (mesh on instance)	
Note: To change a Dependent instance mesh, you must edit its part's m	e's esh.
Auto-offset from other instances	
OK Apply Cance	el

Рисунок 2.6 - Создание экземпляра сборки

Сборка

Перейдём к модулю ASSEMBLY. Для создания сборочной единицы необходимо нажать на иконку Create Part Instance 56 (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу 56 Instances , либо воспользоваться командами:



меню *Instance => Create*). В нашем случае деталь всего одна, выберем ее в появившемся окне – она будет выделена красным цветом. В разделе *Instance Туре* укажите *Dependent* и подтвердите выбор, нажав *OK* (Рисунок 2.6).

Определение процедуры анализа

В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Step. В окне Create Step примите название по умолчанию. Задаем расчет Static, General и щелкните Continue. В появившемся окне Edit Step, оставьте все настройки солвера без изменений и нажмите OK (Рисунок 2.7).

🜩 Edit Step	×
Name: Step-1	
Type: Static, General	
Basic Incrementation Other	Create Step ×
Description:	Name: Step-1
Time period: 1	Insert new step after
Nigeom: On of large displacements and affects subsequent steps.)	Initial
Automatic stabilization: None	
Include adiabatic heating effects	Procedure type: General
	Dynamic, Temp-disp, Explicit Geostatic Heat transfer Mass diffusion Soils Static, General
	Static, Riks Continue Cancel
OK Cancel	1

Рисунок 2.7 – Определение процедуры анализа

Нагрузки и граничные условия

Для задания нагрузки и граничных условий для конструкции перейдем в модуль *LOAD*. Для создания нагрузки необходимо нажать на иконку *Create Load* (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу Loads, либо воспользоваться командами: меню *Load* => *Create*). В появившемся окне *Create Load* задайте категорию *Mechanical* и тип *Concentrated Step*. Далее выберите узел в точке (0,0) и нажмите *Done*. Откроется окно *Edit Load*. Укажите силу нагрузки в поле *CF2* равную -44482 H (Рисунок 2.8).



Современные технологии - в промышленность

New Isold		荣 Edit Load	×
Step: Step-1 Procedure: Static, Genera Category	Types for Selected Step	Name: Load-1 Type: Concentrated force Step: Step-1 (Static, General) Region: (Picked)	
 Mechanical Thermal Acoustic Fluid Electrical/Magnetic Mass diffusion Other 	Concentrated force Moment Pressure Shell edge load Surface traction Pipe pressure Body force Line load Gravity Bolt load	CSYS: (Global) Distribution: Uniform CF1: CF2: -44482 Amplitude: (Ramp) Follow nodal rotation Note: Force will be applied per no	y f(x)

Рисунок 2.8 – Определение нагрузки

Для задания граничных условий необходимо нажать на иконку *Create Boundary Condition* (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу $\mathbb{B}^{C_{5}}$, либо воспользоваться командами: меню *BC* => *Create*). В открывшемся меню *Create Boundary Condition* выберите категорию *Mechanical* и тип *Displacement/Rotation*. Далее выберите точки, которые необходимо ограничить, по координатам (0, 3,05), (3,05, 3,05), (3,05,0). Нажимайте на точки левой кнопкой мыши, зажимая кнопку **Shift**, чтобы выбрать сразу несколько точек. Выбранные точки подсветятся красным цветом. После этого в окне *Edit Boundary Condition* отметьте галочкой перемещение по оси x и y – *U1* и *U2*. Сделайте их равными нулю (Рисунок 2.9).

≑ Create Boundary Con	dition ×	🖨 Edit Bour	ndary Condition	×
Name: BC-1 Step: Step-1 Procedure: Static, Genera Category Ca	Types for Selected Step Symmetry/Antisymmetry/Encastre Displacement/Rotation Velocity/Angular velocity Connector displacement	Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation Step: Step-1 (Static, General) Region: (Picked) CSYS: (Global) Distribution: Uniform		- f(x)
Continue	Connector velocity Cancel	U2: UR3: Amplitude: Note: The c main	0 (Ramp) displacement value will tained in subsequent st	radians A be teps.

Рисунок 2.9 – Определение граничных условий



Конечно-элементная модель

Перейдем к модулю *MESH*. Выберите созданную ранее деталь *Part-1* (Рисунок 2.10).

Module:	🛊 Mesh 🗸 🗸	Model:	Contract Con	\sim	Object: OAssembly OPart: Part-1	\sim

Рисунок 2.10 – Выбор детали в модуле *MESH*

Используйте кнопку *Seed Edges* или команду меню *Seed => Edges*, чтобы задать размер конечного элемента. Выберите всю конструкцию и в появившемся окне *Local Seeds* выберите метод *By Number* и уменьшите число элементов до одного (Рисунок 2.11). Нажмите *OK*, а затем *Done*.

🜩 Local Seeds	×				
Basic Constraints					
Method Bias O By size None O Single O Double By number					
Sizing Controls Number of elements: 1					
Set Creation					
Create set with name: Edge Seeds-1					
OK Apply Defaults C	ancel				



В окне *Element Type (Mesh => Element Type)* выберите следующий тип КЭ – *T2D2* (Рисунок 2.12) или воспользуйтесь кнопкой *Assign Element Type* и выберите всю деталь. В отрывшемся окне *Element Type* укажите *Truss* в разделе Family. Произведите разбиение – *Mesh => Part*.



🖨 Element Type				×
Element Library	Family			
● Standard ○ Explicit	Piezoelectric			^
Geometric Order	Pipe Thermal Electric			
Linear Quadratic	Truss			v
Line				
Hybrid formulation				
Scaling factors: Linear	bulk viscosity: 1			
T2D2: A 2-node linear 2-	D truss.			
Note: To select an element select "Mesh->Contr	shape for meshing, ols" from the main menu	ı bar.		
ОК		Defaults	Cancel	

Рисунок 2.12 – Выбор типа КЭ

Запуск на расчет

Перейдите в модуль *JOB*. С помощью иконки **Сreate Job** (либо команд меню *Job* => *Create*, или дважды кликнув по элементу **Jobs** в дереве модели) создайте задание на расчёт. В появившемся окне примите настройки по умолчанию.

Для продолжения нажмите кнопку *Continue*. Задание на расчёт сформировано. Чтоб запустить расчёт, вызовите **IDD** *Manager* (либо раскройте элемент **IDD** gepeba модели, кликните правой кнопкой по заданию *Job-1* и выберите *Submit*, либо командами меню *Job => Manager*).

В появившемся окне *Job Manager* нажмите *Submit*. Надпись *Running* говорит о том, что расчет запустился.



Анализ полученных результатов

На рисунке 3.1 представлены деформированная и недеформированная конструкции. Поле перемещений приведено на рисунке 3.2, а напряжений на рисунке 3.3. Перемещения узла 2 (рисунок 3.1) по оси X (переменная *u*) и по оси Y (переменная *v*). Напряжения в стержневых элементах приведено в таблице 4.



Рисунок 3.1 – Деформированная конструкция (зелёный цвет) и недеформированная (черный). Масштабный фактор – 750.

Габлица 3 — (Сравнение р	зезуль	татов анали	3a

	u	V
Аналитическое решение [1]	$1,05 \ 10^{-4}$	-4,02 10 ⁻⁴
Abaqus	$1,05 \ 10^{-4}$	-4,03 10 ⁻⁴



Рисунок 3.2 – Перемещения по оси х



Таблица 4 –	Напряжения	B	модели
-------------	------------	---	--------

Номер балки	Напряжения, МПа
1	27
2	10
3	-7



Рисунок 3.3 – Напряжение в конструкции

Список использованных источников

1. Logan D. L. A first course in the finite element method. – Cengage Learning, 2011.



2. Оценка напряженно-деформированного состояния пластины с отверстием. Задача Кирша.

Автор: Крючков А.Э.

Организация: ООО ТЕСИС

В данном примере рассматривается алюминиевая пластина размером $1,02 * 10^{-1}$ м x 5,08 * 10^{-2} x 2,54 * 10^{-3} м с отверстием диаметром 2,54* 10^{-2} м, к ней приложено растягивающее напряжение равное 35 МПа. Численный эксперимент проводится для определения напряжений на грани отверстия. Задача решается в двумерной и в трехмерной постановке, а полученные результаты сравниваются между собой. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема задачи. Свойства материала приведены в таблице 1.1.



Рисунок 1.1 – Схема детали



Модуль Юнга, (Па)	Коэффициент Пуассона
$2*10^{11}$	0,3



Система координат модели и система единиц измерения

Построение расчетной модели и обработка результатов производится в декартовой системе координат. При моделировании принята следующая система измерений – международная система единиц (СИ).

Таблица 2.1 – Система единиц измерения

Длина	Сила	Macca	Время	Давление
$\mathcal M$	Н	г	С	Па

Геометрическая модель

В этом решение используется свойства симметрии данной модели, чтобы упростить решение задачи.

Откроем в дереве модели модуль *SKETCH*. Для создания рисунка нажмите на кнопку *Create Sketch* , или дважды щелкните на значке Sketches в дереве модели (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Создание эскиза модели

В появившемся окне назовите рисунок и нажмите *Continue*. В появившемся рабочем поле, воспользовавшись инструментом + *Create Isolated Point*, создаем пять точек с координатами (0.0127, 0), (0.0254, 0), (0.0254, 0.0508), (0, 0.0508) и (0, 0.0127) (изображение рисунка можно подогнать под размер экрана с помощью кнопки **М** *Auto-fit View*). Затем с помощью инструмента **Сreate Lines: Connected** соедините точки по часовой стрелке от (0, 0.0127) до (0.0127, 0). Теперь используйте инструмент



• Create Arc: Center and 2 Endpoints, чтобы соединить две оставшиеся точки аркой – центр находится в точке (0,0), затем соедините две оставшиеся точки. Финальный рисунок готов (Рисунок 2.2). В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки Cancel. Выходим из режима Эскиз, нажав кнопку Done.



Рисунок 2.2 – Построение эскиза модели

Откроем в дереве модели модуль *PART*. Для создания детали нажмите кнопку Create Part ¹ или дважды щелкните на значке ¹ Parts в дереве модели (рисунок 2.3).

Create Part Name: Part-1 Modeling Space O 3D 2D Planar	Axisymmetric	🖻 File <u>M</u> odel Vie <u>w</u> port <u>V</u> iew <u>P</u> art <u>S</u> hape Feat <u>u</u> re <u>I</u> ools Plug-ins
Type © <u>Deformable</u> O Discrete rigid Analytical rigid Eulerian Base Feature © <u>Shell</u> O Wire O Point	Options None available	Model Results Module: Part M Image: Model Database Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Material-1 Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section (1) Image: Section
Approximate size: 5 Continue	Cancel	

Рисунок 2.3 – Создание модели

В появившемся окне *Create Part* (Рисунок 2.3) примите следующие установки: **2D**, **Deformable** и **Shell** в качестве базового свойства. Щелкните



Continue, чтобы закрыть диалоговое окно. Теперь можно добавить ранее созданный рисунок. Для этого нажмите на *Add => Sketch* и выберите рисунок. Нажмите *Done*, чтобы подтвердить выбор. Выходим из режима *Эскиз*, нажав кнопку *Done*.

Теперь разделим деталь на три части, чтобы при построении сетки можно было увеличить точность расчета на нужных гранях. Используйте инструмент 🧭 Create Datum Point: Offset from Point, чтобы создать необходимую точку. Этот инструмент позволяет отметить точку на рисунке относительно другой выбранной точки. Точкой отсчета послужит середина правой грани. Выберите эту точку. Затем, введите координаты (-.0254,0,0) – на расстоянии будет находится созданная таком нами точка ОТ vже существующей. Таким образом появится новая точка. Выберите инструмент Screate Partition => Face => Use shortest path between 2 points и выделите две ранее использовавшиеся точки. Затем, ипользуя тот же инструмент 🎠, выберите нижнюю часть детали и создайте разделение между серединной точкой правой грани и точкой посередине арки (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Разделение детали



Модель материала

Создадим материал с необходимыми механическими свойствами. Создадим материал для детали. Для этого можно воспользоваться либо элементом меню *Material => Create*, либо кнопкой *Create Material* \mathcal{E} на текущей панели инструментов или дважды кликнуть на \mathcal{E} Materials в дереве модели.

В появившемся окне *Edit Material* в меню редактора выберем *Mechanical => Elasticity => Elastic* и введем значение модуля Юнга – $2*10^{11}$ – и коэффициента Пуассона – 0.3 (Рисунок 2.5).

Material B	ehaviors				
General	Mechanical	<u>T</u> hermal	Electrical/Magnetic	<u>O</u> ther	4
Elactic	<u>E</u> lasticity		•	<u>E</u> lastic	
	Plasticity	_	•	<u>Hyperelastic</u>	
Type: Isot	Damage f	or D <u>u</u> ctile N	Aetals •	Hyper <u>f</u> oam	otion
Use ter	Damage f	or Traction	Separation Laws	Low Density Foam	
Number o	Damage f	or Fiber-Ke	Inforced Composites	Hyp <u>o</u> elastic	
بالمرابية فأساده	Damage f	or Elastome	ers 🕨	Porous Elastic	-
moduli tir	Damping	ion Plasticit	y	Viscoelastic	
No cor	Expansion	,			
No ten	Brittle Cra	Ickina			
Data	Eos				
Y	Viscosity				
N	2-11	Natio		-	
1	2e11	0.3			

Рисунок 2.5 – Определение модели материала

Перейдём к определению сечения. Открываем диалоговой окно *Create Section* (вызов возможен либо из *Дерева модели*, либо через иконку **1**).

В диалоговом окне *Create Section* присвоим сечению имя *Section-1* по умолчанию. Выберите в соответствующих списках *Solid, Homogeneous* и щелкните *Continue* (Рисунок 2.7). В появившемся окне редактора сечений *Edit Section*, в качестве материала необходимо указать созданный ранее материал *Material-1*.



🖨 Create Section				
Name: Section-1				
Category	Туре			
Solid	Homogeneous	1		
◯ Shell	Generalized plane strain			
O Beam	Eulerian			
⊖ Fluid	Composite			
O Other				
Continu	ie Cancel			

Рисунок 2.6 – Определение сечения

Следующим шагом присвоим построенное сечение ранее созданной пластине. Для этого используем иконку **34** Assign Section в текущей панели инструментов (либо дважды щелкаем по элементу в дереве модели, либо используем команды меню: Assign => Section). С помощью мыши выделите пластину, она будет подсвечена красным цветом. Нажмите Done. В появившемся окне, выберите созданное сечение Section-1 и подтвердите выбор нажатием кнопки OK.

Сборка

Перейдём к модулю ASSEMBLY. Для создания сборочной единицы необходимо нажать на иконку Create Part Instance S (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу S Instances , либо воспользоваться командами: меню Instance => Create). В нашем случае деталь всего одна, выберем ее в появившемся окне – она будет выделена красным цветом. В разделе Instance Type укажите Independent и подтвердите выбор, нажав OK (Рисунок 2.8).

Create Instan	ces from:
Parts	() Models
Parts	
Part-1	
Instance Ty	pe
	nt (mesh on part)
Independ	ent (mesh on instance)
Note: To ch	ange a Dependent instance's , you must edit its part's mes
mesh	
mesh	

Рисунок 2.7 – Создание экземпляра сборки



Определение процедуры анализа

В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Step. В окне Create Step примите название по умолчанию. Задаем расчет Static, General и щелкните Continue. В появившемся окне Edit Step, оставьте все настройки решателя без изменений и нажмите OK (Рисунок 2.9).

💠 Edit Step	×	
Name: Step-1		
Type: Static, General		
Basic Incrementation Other	💠 Create Step 🔷 >	ć
Description:	Name: Step-1	
Time period: 1	Insert new step after	
Nigeon: Off (This setting controls the inclusion of nonlinear effects On of large displacements and affects subsequent steps.) Automatic stabilization: None	Initial	
Include adiabatic heating effects	Procedure type: General	~
	Dynamic, Temp-disp, Explicit Geostatic Heat transfer Mass diffusion Soils	•
	Static, General	
	static, Riks	٢
	Continue Cancel	
OK Creation		

Рисунок 2.8 – Определение процедуры анализа

Нагрузки и граничные условия

Для задания нагрузки на и граничных условий для конструкции перейдем в модуль *LOAD*. Для создания нагрузки необходимо нажать на иконку *Create Load* ^{LL} (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу ^{LL} Loads, либо воспользоваться командами: меню *Load* => *Create*).

В появившемся окне *Create Load* задайте категорию *Mechanical* и тип *Pressure*. Далее выберите верхнюю грань детали и нажмите *Done*. Откроется окно *Edit Load*. Укажите силу нагрузки в окошке *Magnitude* на *-3,5e7 Па* (Рисунок 2.8).



Современные технологии - в промышленность

Name: Load-1			🗬 Edit Load		
itep: Step-1 Procedure: Static, Genera Category	I Types for Selected Step		Name: Loa Type: Pres Step: Step Region (Pic	d-1 ssure p-1 (Static, General) keed)	
Mechanical Thermal	Concentrated force Moment	^	Distribution:	Uniform 🗸	f(x)
 Acoustic Fluid Electrical/Magnetic Mass diffusion Other 	Pressure Shell edge load Surface traction Pipe pressure Body force Line load Gravity Both load		Magnitude: Amplitude:	-35000000 (Ramp)) Po

Рисунок 2.9 – Определение нагрузки

Для задания граничных условий необходимо нажать на иконку *Create Boundary Condition* (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу \bowtie вс, либо воспользоваться командами: меню *BC* => *Create*). В открывшемся меню *Create Boundary Condition* выберите категорию *Mechanical* и тип *Displacement/Rotation*. Далее выберите нижнюю грань детали, а в появившемся окне *Edit Boundary Condition* укажите ограничение для перемещения по оси у, U2=0 (Рисунок 2.11).

🔷 Crea	te Boundary Cond	dition >	🗧 🔷 Edit Bou	indary Condition	×
Name: Step: Procedu Catego @ Mec O Elec O Othe	BC-1 Step-1 re: Static, Genera ory chanical d trical/Magnetic er	Types for Selected Step Symmetry/Antisymmetry/Encastre Displacement/Rotation Velocity/Angular velocity Connector displacement Connector velocity	Name: BC Type: Dis Step: Ste Region: (Pi CSYS: (G1 Distribution U1: U1: U2: U2: UR3: Amplitude:	-1 :placement/Rotation :p-1 (Static, General) cked) obal)	f(x) radians
	Continue	Cancel	- mair Oł	itained in subsequent s	teps.

Рисунок 2.10 – Определение граничных условий

Далее таким же образом установите еще одно граничное условие. Выберите всю левую грань детали и укажите ограничение по оси х, U1=0.



Конечно-элементная модель

Перейдем к модулю *MESH*. Перейдите в меню *Mesh* => *Controls* и выделите верхнюю часть детали. В появившемся окне *Mesh Controls* укажите форму *Quad* и технику *Free* (Рисунок 2.11). А для нижней части детали укажите технику *Structured*.



Рисунок 2.11 – Настройка сетки

Перейдите в меню *Mesh => Element Type* и выберите всю деталь.

Укажите Geometric Order – Quadratic и Family – Plane Stress (Рисунок 2.12).

lement Library	Family	
Standard O Explicit	Plane Strain	
	Plane Stress	
Geometric Order	Pore Fluid/Stress	
) Linear 🔘 Quadratic	Thermal Electric	
Quad Tri Reduced integration		
Element Controls		
Viscosity: 💿 l	Use default 🔘 Specify	
Element deletion:	Use default 🔘 Yes 🔘 No	
Max Degradation: 🔘 l	Use default 🔘 Specify	
CPS8: An 8-node biquad	dratic plane stress quadrilateral.	
te: To select an element	t shape for meshing,	
select "Mesh->Conti	rols" from the main menu bar.	

Рисунок 2.12 – Тип элемента сетки



Используйте кнопку Seed Edges или команду меню Seed => Edges. Выберите всю верхнюю часть детали и в появившемся окне Local Seeds выберите метод By Number и укажите 8 в окне количества элементов; Bias -None. Таким же образом выделите все внешние грани нижней части детали и укажите 10 в окне кол-ва элементов, но в этот раз поставьте Bias – Single и Bias Ratio = 1 (Рисунок 2.13). В настройках оставшейся диагональной грани укажите Bias Ratio =5. Произведите разбиение детали – Mesh => Part.

📥 Local Seeds	×			
Basic Constraint	s			
Method Bias By size O None O Single O Double O By number				
Sizing Controls Number of elements: 10 - Bias ratio (>=1): 1 Flip bias: Select.				
Set Creation Create set with name: Edge Seeds-1				
ОК	Apply Defaults Cancel			

Рисунок 2.13

Запуск на расчет

Перейдите в модуль *JOB*. С помощью иконки *Create Job* (либо команд меню *Job* => *Create*, или дважды кликнув по элементу *Lobs* в дереве модели) создайте задание на расчёт. В появившемся окне примите настройки по умолчанию.

Для продолжения нажмите кнопку *Continue*. Задание на расчёт сформировано. Чтоб запустить расчёт, вызовите 📰 *Job Manager* (либо раскройте элемент 🛃 Jobs дерева модели, кликните правой кнопкой по заданию *Job-1* и выберите *Submit*, либо командами меню *Job => Manager*).

В появившемся окне *Job Manager* нажмите *Submit*. Надпись *Running* говорит о том, что расчет запустился.



АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены результаты анализа – поля главных

напряжений. Масштабный фактор для всех рисунков равен 4000.

2 D

3 D



Рисунок 3.3 – Поле главных напряжений по оси ОХ



Рисунок 3.4 – Поле главных напряжений по оси ОУ

Для того чтобы построить зависимость напряжений вдоль отверстия, необходимо зайти в меню *Tools => Path => Create*. Далее выберите тип **Node** List и назовите путь. Нажмите кнопку **Add Before** и последовательно выберите каждый узел как показано на рисунке 3.5. Нажмите **Done** после определения пути и кнопку **OK** в меню **Edit Node List Path.**





Рисунок 3.5 – Определение пути

Для построения графика функции на созданном **Path** перейдите в меню *Tools => XY Data => Create* и выберите источник **Path** в появившемся окне. Примите настройки по умолчанию и нажмите кнопку *Plot*. Для того, чтобы экспортировать данные перейдите в *Plug-ins => Tools => Excel Utilities*. В появившемся окне **Excel Utilities** выберите *From Current XY Plot* в разделе **XY Data to plot in Excel.** Завершите действие, нажав **OK**. Данная процедура позволяет экспортировать данные из Abaqus и использовать их для дальнейшего анализа.

Полученная зависимость напряжения на отверстии от расстояния вдоль него, для рассмотренных в данном примере моделей, приведена на рисунке 3.6. Напряжения S_{xx} в точке 1 и S_{yy} в точке 2 (см. рисунок 3.5) приведены в таблице 3.1.

	2D	3D
S _{xx} (МПа)	-59,18	-59,46
S _{yy} (МПа)	153,31	154,02

Таблица 3.1 – Значения главных напряжений





Рисунок 3.6 – Зависимость напряжений вдоль отверстия.



3. Рост трещины под действием сжимающей

нагрузки

Автор: Маликов П.В.

Организация: «Прогрестех»

В рамках механики разрушения считается, что рост трещин происходит под действием растягивающих нагрузок, нормальных к плоскости трещины, или сдвиговых нагрузок. Сжимающие нагрузки в задаче о математическом разрезе В зависимости от своего направления либо не влияют на концентрацию напряжений в окрестности роста трещины, либо способствуют закрытию трещины, в случае, когда они направлены перпендикулярно линии разреза. Практические исследования, однако, показали возможность наличия распространения трещин в материале, находящемся под действием И трёхосного сжатия. Рост трещин при этом обычно происходит в направлении параллельном действию максимального сжимающего напряжения [1]. Наиболее характерны данные процессы для горных пород, находящихся под действием значительного сжатия (горного давления). Необходимость исследования данного феномена возникла в связи с проведением различных работ, связанных со строительством шахт, а также прокладкой тоннелей в горных породах, склонных к хрупкому разрушению.

Математическая модель данного явления была построена в работах [2–4]. Упрощённая схема данного явления показана на Рисунке 1.1. Образование и рост трещины происходят на концах трещины РР', расположенной под углом Под действием главным сжимающим напряжениям. наибольшего к трещины PP' напряжения $\sigma_1 > \sigma_2$ края скользят сжимающего друг относительно друга, в результате чего происходит раскрытие «крыльев» РО и P'Q' расположенных на концах трещины PP'. Таким образом, трещина PQ находится под действием нагрузки, нормальной к её поверхности. Действие сжимающего напряжения σ_2 способствует остановке роста трещины. В

28



приведённом в работе [2] решении коэффициенты интенсивности напряжений K_I и K_{II} в окрестности кончика трещин Q вычисляются как сумма влияния сдвига трещины PP' напряжения приложенного на удалении от трещины. Точное решение контактной задачи при этом не проводится.



Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует..1 - Рост трещины под действием сжимающих напряжений

В рамках данной работы проведено построение конечно-элементной модели в пакете Abaqus для проверки приближённого решения аналитической задачи вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в работе [2] и решения данной задачи с при численном моделировании контакта на берегах разреза РР'. В силу центральной симметрии геометрии и нагрузок относительно середины трещины РР' (точка О на рисунке 1.2) возможно получить решение, рассмотрев лишь половину конструкции, что особенно важно в свете достаточно жёстких ограничений на количество используемых элементов в студенческой версии Abaqus – 1000 узлов. Условие центральной симметрии можно смоделировать наложением условия симметрии



перемещений отрезков ОА и ОВ относительно точки О. Для того чтобы исключить поворот модель как твёрдого тела относительно центра симметрии необходимо закрепить перемещение ещё одной точки модели. В качестве такой точки можно выбрать точку Е – середину отрезка CD, закрепив её перемещения по горизонтали. В силу удалённости точки Е от разреза, это не должно оказать серьёзного влияния на распределение напряжений в окрестности точки Q.



Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..2 - Постановка задачи

Рассматривается два типа нагрузок. Для сравнения результатов расчёта с приближённым аналитическим решением поверхность разреза ОР нагружается сдвиговым напряжением τ , вычисленным по соотношениям, приведённым в работе [2] для $\angle POB = 30^\circ$, вертикального расположения трещины PQ и l/c = 1. При моделировании сжатия трещины, к верхнему ребру модели (CD) прикладывается равномерно распределённая нагрузка σ для различных углов наклона разреза OP. Задача решается для условий плоского напряжённого состояния. Материал является линейно упругим. Так



как интерес представляет распределение напряжений, а модель нагружается посредством приложения распределённой нагрузки, конкретное значение параметров материала с теоретической точки зрения роли не играет.

Система координат модели и система единиц измерения

При создании модели и проведении расчёта используется декартова система координат и система единиц СИ.

Таблица Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует..1 - Система единиц модели

Длина	Напряжения
\mathcal{M}	Па

Геометрическая модель

Определение геометрии детали состоит из двух основных этапов – задания внешней границы детали и создания разбиения детали для дальнейшего создания разреза и конечно-элементной сетки в окрестности вершины трещины для снятия коэффициентов интенсивности напряжений.

При создании детали в диалоге Create Part необходимо выбрать следующие свойства: 2**D** Planar (плоская двухмерная), Deformable (деформируемая) и Shell (пластина). Последний параметр означает, что создание детали начнётся с построения чертежа плоской грани, в противовес ребру (возможно, изогнутому) или точке при выборе альтернативных опций (Wire и Point соответственно). Параметр Approximate size задаёт размер сетки для построения первоначальной геометрии и может быть задан произвольно. Наиболее удобным значением данного параметра будет величина, равная нескольким характерным линейным размерам детали (или сечения для объемных деталей). В нашем случае вполне достаточно выбрать 10.



Внешняя граница детали имеет форму квадрата 2 × 2. В модуле Sketch его можно создать с помощью инструмента , задав прямоугольник с вершинами (-1, 0) и (1, 2).



Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..3 - Задание внешней границы детали

После задания границы детали необходимо создать дополнительное разбиение детали, чтобы обозначить разрез а так же вспомогательные разбиения ДЛЯ построение конечно-элементной сетки. Учитывая относительную сложность разбиения, удобнее всего нарисовать его, воспользовавшись инструментом Tools — Partition — Face — Sketch или Единственная доступная на текущей момент грань будет выбрана автоматически. Построение эскиза разбиения удобно начать с создания вспомогательной геометрии. Для этого в середине нижнего ребра нужно поставить точку (инструмент +) и провести через неё две вспомогательные (construction lines, *i*) – вертикальную и наклонную линии (под произвольным углом). После этого двумя отрезками (инструмент 44) нужно

32



контур будущего разреза, построив наклонный отрезок задать на вспомогательной лини, а отрезок, соответствующий линии PQ в постановке задачи сделав вертикальным. Кроме того, для построения сетки конечных элементов потребуются дополнительные разбиения детали. Для их создания нужно построить три окружности (инструмент ¹) с центром в вершине разреза. При задании окружности необходимо помнить, что точка на окружности, отмечаемая при её построении является граничной точки получаемого в результате ребра и учитывается при построении конечноэлементной сетки, что может затруднить ручное создание узлов конечных элементов и ограничить выбор доступных техник разбиения. Чтобы избежать этого, достаточно при построении окружностей в качестве второй точки выбирать точку, лежащую на линии разреза. Построение геометрии разбиения разбиение построенных окружностей завершает горизонтальным И вертикальным отрезками, проходящими через их центр. После этого необходимо более строго задать размер разреза и радиусы окружностей. Так как моделируется случай l/c = 1, на отрезки, задающие границу разреза нужно наложить связь (инструмент $\stackrel{\text{def}}{=0}$) equal length. Размеры элементов разбиения нужно задать инструментом 🔨, как показано на рисунке 2.3.





Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует..4 - Построение разбиения детали

Середина верхнего ребра модели будет использоваться для наложения граничных условий, следовательно, его нужно разбить пополам. Сделать это можно при помощи команд **Tools** \rightarrow **Partition** \rightarrow **Edge** \rightarrow **Enter parameter** или инструмента $\overrightarrow{=}$, выбрав параметр 0.5.



Рисунок **Ошибка! Текст указанного стиля в документе** отсутствует..5 - Построение разбиения детали и задание его размеров





Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..6 - Разбиение верхнего ребра модели

Модель материала

С точки зрения теории коэффициенты концентрации напряжений для изотропного линейно-упругого материала зависит только от геометрии разреза и приложенных нагрузок, поэтому значения упругих модулей можно выбрать достаточно произвольно. В численном решении модули упругости повлияют на перемещения узлов модели. Большие значения перемещений узлов могут повлиять на моделирование контактного взаимодействия между краями разреза, переведя малое проскальзывание в конечное, и в критическом случае могут вызвать чрезмерную деформацию элементов, что негативно скажется на сходимости и точности результатов анализа. В силу этих причин для данной задачи лучше выбрать материал с большим значением модуля Юнга.

Для создания материала в модуле **Property** нужно выбрать пункт меню **Material**—**Create...** или инструмент . В появившемся диалоге нужно задать свойства линейной упругости материала (**Mechanical**—**Elasticity**—**Elastic**) и задать значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, как 1е10 и 0.33 соответственно. Введённое значение коэффициента Пуассона является типичным для многих металлов и сплавов.

35



Кроме того, для задания свойств детали необходимо создать сечение. Это можно сделать с помощью меню **Section**—**Create...** или инструмента **1**. Так как рассматриваемая модель находится в условиях плоского напряженного состояния, необходимо создать однородное (**Solid**, **Homogeneous**) сечение.

Созданное сечение необходимо присвоить созданной ранее детали, выбрав пункт меню Assign \rightarrow Section или инструмент **\mathbb{E}**.

🔶 Edit Material	
Name: Material-1	
Description:	
Material Behaviors	
Elastic <u>G</u> eneral Mechanical Ihermal Qther Elastic Type: Isotropic Use temperature-dependent data Number of field variables: 0	Create Section Name: Section-1 Category Solid Shell Generalized plane strain Eulerian Katerial: Material-1 Category Category
Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term	Fluid Composite Plane stress/strain thickness: 1
No compression	Other OK Cancel
Data	Continue Cancel
Young's Poisson's Modulus Ratio	
1 1610 33	
OK	

Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..7 - Задание свойств материала и сечения

Сетка конечных элементов

При создании сетки конечных элементов необходимо руководствоваться следующими соображениями:

- Сетка должна быть достаточно мелкой в окрестности разреза;
- Плотность сетки может быть уменьшена на удалении от выреза (на внешней границе детали);


- Условия центральной симметрии на нижнем ребре детали будет удобнее моделировать, если узлы сетки также будут симметричны относительно середины ребра;
- Для того чтобы стало возможно вычисление коэффициентов интенсивности напряжений в окрестности вершины разреза, конечные элементы в этой области должны быть четырёхугольными.

Создание сетки необходимо начать с задания разбиения рёбер детали и техник построения сетки для отдельных областей модели либо для модели целиком. Для задания разбиения всех рёбер необходимо в модуле Mesh ранее созданной детали выбрать пункт меню Seed — Part... (или инструмент —) и задать 0.2 в качестве размера ребра элемента. Теперь нужно задать особые условия разбиения отдельных рёбер модели. Это можно сделать, выбрав пункт меню Seed — Edges... (или инструмент —). Для обоих нижних рёбер детали нужно задать разбиение на 15 элементов (выбрав By number в качестве метода определения) и запретить отступление от заданного разбиения, выбрав пункт Do not allow the number of elements to change на вкладке Constraints диалога Local Seeds, чтобы иметь более чёткий контроль над построением сетки. Аналогично для рёбер разреза нужно задать разбиение на 10 элементов, для дуг окружностей – на 4, и для радиальных рёбер – на 2.

Для построения сетки в окрестности вершины разреза, нужно задать технику разбиения модели отличную, от выставленной по умолчанию. Выбрав пункт меню **Mesh**—**Controls...** (инструмент **b**) нужно выбрать форму элементов **Quad** для областей, лежащих внутри кругов, построенных вокруг вершины выреза, для того чтобы исключить возможность генерации треугольных элементов, и технику **Sweep** для колец, окружающих вершины разреза. Выбор техник построения стеки конечных элементов и разбиение рёбер детали показаны на рисунке 2.6.



Тип элементов можно выбрать при помощи инструмента ш (пункт меню **Mesh→Element Type...**). Нам потребуется выбрать plane stress элементы. Таким образом, будут использоваться элементы CPS4R в качестве четырёхугольных и CPS3 в качестве треугольных.

Осталось только построить сетку, выбрав пункт меню Mesh→Part... или инструмент **Ш**.

P	Hesh Controls	💠 Local Seeds
💠 Global Seeds 📃 🗙	Element Shape	Basic Constraints
Sizing Controls		Method Bias
Approximate global size: 2	Technique	💿 By size 💿 None 💿 Single 💿 Double
Curvature control	O As is	By number
Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1	© Free	Sizing Controls
(Approximate number of elements per circle: 8)	© Structured	Number of elements: 15
Minimum size control	Multiple	
By fraction of global size (0.0 < min < 1.0) 0.1	Redefine Sweep Path	
By absolute value (0.0 < min < global size) 0.01	OK Defaults Cancel	Set Creation
		Create set with name: Edge Seeds-1
OK Appiy Defaults Cancel		
		OK Apply Defaults Cancel
	4	Local Seeds
		Basic Constraints
A Met	sh Controls	Seed Constraints
Elem	ient Shape	Allow the number of elements to increase or decrease
• 0	uadi 🔿 Quad-dominated 🔿 Tri	Allow the number of elements to increase only
Tech	inique Algorithm	Do not allow the number of elements to change
As	is O Medial axis D Herita axis	
ø 💿 🖲 Fr	ee 📃 🗹 Minimize the mesh transition 🎲	
Str	ructured 🗧 💿 Advancing front	
Su Su	Veep Vse mapped meshing where appropriate	Set Creation
• • • • •	utiple	Create set with name: Edge Seeds-1
Y	OK Defaults Cancel	
		OK Apply Defaults Cancel
•	15.	р ^а тата активни страни с Страни страни с
****	13	
		1

Рисунок **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**.8 - Задание разбиения рёбер и техник построения сетки



Element Tune	×	
v clement type		
Element Library	Family	
Standard O Explicit	Piezoelectric ^	
	Plane Strain	
Geometric Order	Plane Stress	
Linear O Quadratic	Pore Fluid/Stress	
Quad Tri		
Reduced integration	Incompatible modes	
Element Controls		
Hourglass stiffness:	Use default Specify	
Viscosity:	O Use default O Specify	
Second-order accuracy	r: 🔿 Yes 💿 No	
Distortion control:	Ise default ○ Yes ○ No	- C X X X HHHATAATA
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	I THINK KERABUY X
CPS4R: A 4-node bilines	ar plane stress quadrilateral reduced integration, hourglass control	
CF341C A 4-Hode billites	a plane suess quadinateral, reduced integration, nodigiass control.	
later. To calact an element	t change for maching	
select "Mesh->Contr	rols" from the main menu bar.	
ОК	Defaults Cancel	

Рисунок **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** 9 - Выбор типа элементов и сетка конечных элементов

Сборка и создание разреза

Для добавления созданной детали в пространство пространство анализа необходимо в модуле Assembly выбрать пункт меню **Instance**→**Create...** (инструмент **)** и добавить единственную доступную деталь.

На данном этапе деталь представляет собой квадрат с нарисованным на нём разбиением и сеткой конечных элементов, но без каких-либо разрезов. Добавить разрез можно, создав дополнительные узлы на его границе и переопределив элементы сетки. Это потребует модификации сетки конечных элементов, провести которую можно только на независимом экземпляре детали. Для того, чтобы сделать экземпляр детали независимым нужно в дереве **Assembly** в пункте **Instance** выделив правой клавишей мыши ранее созданный экземпляр, выбрать пункт **Make Independent**. Для создания разреза нужно перейти в модуль **Interaction** и, выбрав пункт меню **Special→Crack→Assign Seam...**, выделить границу разреза. Создание разреза изменит сетку конечных элементов, создав свободную поверхность/ребро на выделенной поверхности/ребре. Стоит отметить, что созданный разрез не



появится в дереве модели и будет отображаться только при создании/удалении разрезов.

Для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений необходимо задать трещину. Это можно сделать в пункте дополнительно меню Special→Crack→Create..., выбрав тип Contour Integral. После этого необходимо указать вершину разреза (одну точку) и задать направление роста трещины, выбрав либо нормаль к линии разреза, либо направление роста разреза (q vector). Так как разрез расположен вертикально, нормаль можно задать, указав две точки: (0, 0) и (1, 0). Созданное определение трещины будет вычисления коэффициентов использовано только для интенсивности напряжений и, в отличие от разреза, само по себе не окажет влияния на напряжённо-деформированное состояние. Трещина будет доступна В менеджере трещин (Special \rightarrow Crack \rightarrow Manager...).



Рисунок **Ошибка! Текст указанного стиля в документе** отсутствует..10 - Определение границы разреза и задание трещины

Контактные взаимодействия



В исследуемой модели потребуется задать только один контакт – между границами наклонной части разреза. Это верно в предположении, что горизонтальная сжимающая нагрузка отсутствует либо недостаточна того, чтобы границы вертикального участка трещины начали вдавливаться друг в друга.

Для задания свойств контактного взаимодействия в модуле Interaction нужно выбрать пункт меню Interaction \rightarrow Property \rightarrow Create... (инструмент 🔁) и тип свойства contact. Для наших целей достаточно задать нормальное и касательное поведение касающихся поверхностей (Mechanical-Normal **Behavior Mechanical**→**Tangential Behavior** соответственно). При И определении нормального взаимодействия достаточно оставить условия по умолчанию и снять галочку с пункта Allow separation after contact, так как поверхности в рассматриваемой задаче находятся в контакте на протяжении всего времени анализа. Касательное взаимодействие необходимо задать для расчёта задач, учитывающих трение. Учитывая малый размер модели, для задания касательного взаимодействия можно использовать метод Lagrange Multiplier обеспечивающий более высокую точность по сравнению с другими.

Для между поверхностями необходимо задания контакта задать контактные поверхности. В нашем случае особенностью определения контактных поверхностей является то, что они лежат на поверхности разреза и не ассоциированы с какой-либо внешней границей детали, поэтому их придётся задавать как границу конечных элементов. Перед определением контактной поверхности удобно скрыть с экрана часть элементов границы разреза, которые не будут в неё входить. Для этого в модуле Assembly нужно включить отображение сетки (инструмент И включив в панели Elements 2 инструментов выделение элементов (выделить элементы одной из границ разреза и скрыть их (🖤). Теперь можно создать

41



поверхность, дважды щелкнув по пункту Surfaces в дереве сборки (или воспользовавшись пунктом меню Tools — Surface — Create...), выбрав Mesh в качестве типа поверхности и выделив рёбра элементов, лежащие на оставленной границе разреза. Вернуть скрытые элементы можно, нажав . Аналогично нужно выбрать другую границу разреза.

Для задания контакта между созданными поверхностями в модуле Interaction нужно выбрать пункт меню Interaction \rightarrow Create (инструмент \blacksquare) и тип Surface-to-surface contact. В качестве контактных поверхностей нужно указать две ранее созданные поверхности, а в качестве свойств контакта – созданные ранее свойства. В качестве формулировки контакта стоит выбрать Small sliding, так как задача не предполагает значительного (порядка ребра элемента) проскальзывания поверхностей друг относительно друга. Дополнительно можно установить свойство Adjust only remove to overclosures, но это не критично, так как поверхности изначально точно касаются друг друга.



+ Edit Contact Property	X	- Edit Contact Property
Name: IntProp-1 Contact Property Options		Name: IntProp-1 Contact Property Options
Tangential Behavior Normal Behavior		Tangential Behavior Normal Behavior
Mechanical Ihermal Normal Behavior Pressure-Overclosure: "Hard" Contact Constraint enforcement method: Default Allow separation after contact		Mechanical Ihermal
OK		OK Cancel

Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует..11 - Свойства контактного взаимодействия





Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует.. 12 - Выбор контактной поверхности

- Edit Interaction				
Name: Int-1				
Type: Surface-to-surface contact (Standard)				
Step: Initial				
Master surface: Cont_1 Slave surface: Cont_2				
Sliding formulation: 🔘 Finite sliding 💿 Small sliding				
Discretization method: Surface to surface				
Exclude shell/membrane element thickness				
Degree of smoothing for master surface: 0.2				
Use supplementary contact points: 💿 Selectively 💿 Never 💿 Always				
Contact tracking: $③$ Two configurations (path) \bigcirc Single configuration (state)				
Slave Adjustment Surface Smoothing Clearance Bonding				
No adjustment				
 Adjust only to remove overclosure 				
Specify tolerance for adjustment zone: 0				
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: IntProp-1				
Options: Interference Fit				
Contact controls: (Default)				
Active in this step				
OK				

Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..13 - Определение контакта между поверхностями

Нагрузки и граничные условия



Перед созданием нагрузок необходимо определить шаг анализа. Для этого в модуле Step нужно выбрать пункт Step→Create... (инструмент) и тип шага Static, General. Дополнительные параметры можно оставить без изменения, так как исследуется линейная задача.

Как было указано в постановке задачи, граничные условия состоят из двух основных элементов – условий центральной симметрии на нижнем ребре модели и закрепления горизонтальных перемещений середины верхнего ребра (точка Е на рисунке 1.2). Abaqus позволяет задать условие циклической симметрии при помощи взаимодействия cyclic symmetry (модуль Interaction). Недостатком этого способа является то, что связываемые поверхности не должны пересекать ось или центр симметрии, а в нашем случае края разреза лежат в центре симметрии. Альтернативой данному подходу является задание связи между точками методом equation. Связь equation можно задать как в САЕ так непосредственно в input файле. Недостатком задания такой связи через САЕ является необходимость создания наборов точек (Node set), в то время как синтаксис input файла позволяет обращаться к связываемым точкам непосредственно по номеру. Нам нужно связать уравнениями перемещения узлов, симметричных относительно середины нижнего ребра так, чтобы сумма перемещений по оси х и сумма перемещений по оси у были равны нулю. Для этого необходимо узнать номера узлов нижнего ребра при помощи инструмента 🕖 (пункт меню **Tools**→**Query**) и запроса информации об узлах (Point/Node). Так же можно включить отображение номеров узлов (View \rightarrow Assembly Display **Options** → **Mesh** → **Show** node labels \rightarrow OK) Лалее необходимо добавить ключевые слова, задающие уравнения в input файл. Это можно сделать, выбрав пункт меню Model — Edit Keywords и добавив на уровень Assembly строчки вида

```
*Equation
2
Part-1-1.16,1,1,Part-1-1. 590,1,1
```



для каждой пары связываемых узлов для первой и

*Equation 2 Part-1-1.16,2,1,Part-1-1. 590,2,1

для второй степеней свободы узла. Первый и четвёртый аргументы в третьей строчке – имена экземпляра детали и номера узлов, второй и пятый – номера степеней свободы, третий и шестой – коэффициенты при указанных переменных в линейном уравнении.



Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..14 (a)

– Отображение номеров узлов для узлов нижней поверхности

Для узлов модели, приведенных на рисунке 2.12 (a) необходимо добавить следующие строчки:



*Equation

Part-1-1.16,1,1,Part-1-1.590,1,1 *Equation 2 Part-1-1.80,1,1,Part-1-1.108,1,1 *Equation 2 Part-1-1.79,1,1,Part-1-1.109,1,1 *Equation 2 Part-1-1.78,1,1,Part-1-1.110,1,1 *Equation 2 Part-1-1.77,1,1,Part-1-1.111,1,1 *Equation 2 Part-1-1.76,1,1,Part-1-1.112,1,1 *Equation 2 Part-1-1.75,1,1,Part-1-1.113,1,1 *Equation Part-1-1.74,1,1,Part-1-1.114,1,1 *Equation 2 Part-1-1.73,1,1,Part-1-1.115,1,1 *Equation 2 Part-1-1.72,1,1,Part-1-1.116,1,1 *Equation 2 Part-1-1.71,1,1,Part-1-1.117,1,1 *Equation 2 Part-1-1.70,1,1,Part-1-1.118,1,1 *Equation 2 Part-1-1.69,1,1,Part-1-1.119,1,1 *Equation 2 Part-1-1.68,1,1,Part-1-1.120,1,1 *Equation Part-1-1.67,1,1,Part-1-1.121,1,1 *Equation 2 Part-1-1.15,1,1,Part-1-1.20,1,1

*Equation 2 Part-1-1.16,2,1,Part-1-1.590,2,1 *Equation 2 Part-1-1.80,2,1,Part-1-1.108,2,1 *Equation 2 Part-1-1.79,2,1,Part-1-1.109,2,1 *Equation 2 Part-1-1.78,2,1,Part-1-1.110,2,1 *Equation 2 Part-1-1.77,2,1,Part-1-1.111,2,1 *Equation 2 Part-1-1.76,2,1,Part-1-1.112,2,1 *Equation 2 Part-1-1.75,2,1,Part-1-1.113,2,1 *Equation Part-1-1.74,2,1,Part-1-1.114,2,1 *Equation 2 Part-1-1.73,2,1,Part-1-1.115,2,1 *Equation 2 Part-1-1.72,2,1,Part-1-1.116,2,1 *Equation 2 Part-1-1.71,2,1,Part-1-1.117,2,1 *Equation 2 Part-1-1.70,2,1,Part-1-1.118,2,1 *Equation 2 Part-1-1.69,2,1,Part-1-1.119,2,1 *Equation 2 Part-1-1.68,2,1,Part-1-1.120,2,1 *Equation Part-1-1.67,2,1,Part-1-1.121,2,1 *Equation 2 Part-1-1.15,2,1,Part-1-1.20,2,1

Центральный узел верхнего ребра модели можно закрепить, выбрав в модуле Load пункт меню $BC \rightarrow Create...$ (инструмент), тип Displacement/Rotation и запретив перемещения по оси x (U1).

Расчёт будет проводиться для вертикальной сжимающей нагрузки *σ* = 1000 (рисунок 1.2). Как было указано в постановке задачи, расчёт будет проведён для



двух типов нагрузки – для давления σ , приложенного к верхнему ребру модели и для сдвиговой нагрузки τ , приложенной к верхней границе наклонного выреза. Давление σ может быть приложено в модуле **Load** в первом шаге анализа путём выбора пункта меню **Load**—**Create...** (инструмента **L**) и типа нагрузки **Pressure**. В качестве области приложения нагрузки следует выбрать верхнее ребро модели, а величину нагрузки сделать равной 1000.

Согласно приближённому решению, представленному в работе [2], при приложении только сжимающего давления, на поверхность разреза действует усилие $\tau = \frac{1}{2}\sigma \sin 2\gamma$ (γ – угол между наклонным разрезом и вертикальной осью). Для нашей нагрузки $\tau \approx 433.013$. Для того, чтобы приложить сдвиговую нагрузку нужно выбрать **Surface traction** в качестве типа нагрузки, выбрать созданную ранее контактную поверхность на верхней границе выреза, вектор, параллельный разрезу (по двум точка на разрезе) и величину 433.013.



Edit keywords, Model: Model-3_30deg	
** ASSEMBLY	
**	
*Assembly, name=Assembly	
**	
*Flement_type=CPS4R	
*Element, type=CPS3	
** Section-1	
*Solid Section, elset=_PickedSet42, material=Material-1	
1., *End Instance	
**	
*Surface, type=ELEMENT, name=Cont_1	
*Surface, type=ELEMENT, name=Cont_2	
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf23, internal	
*Equation	
Part-1-1.16,1,1,Part-1-1.590,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.80,1,1,Part-1-1.108,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.79,1,1,Part-1-1.109,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.78,1,1,Part-1-1.110,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.77,1,1,Part-1-1.111,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.76,1,1,Part-1-1.112,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.75,1,1,Part-1-1.113,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.74,1,1,Part-1-1.114,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.73,1,1,Part-1-1.115,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.72,1,1,Part-1-1.116,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.71,1,1,Part-1-1.117,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.70,1,1,Part-1-1.118,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.69,1,1,Part-1-1.119,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.68,1,1,Part-1-1.120,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.67,1,1,Part-1-1.121,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.15,1,1,Part-1-1.20,1,1	
*Equation	
2 Part-1-1.16,2,1,Part-1-1.590,2,1	
*Equation	
2 Part-1-1.80,2,1,Part-1-1.108,2,1	
*Equation	
2 Part-1-1.79,2,1,Part-1-1.109,2,1	
*Equation	
2 Part-1-1.78,2,1,Part-1-1.110,2,1	
*Equation	
2 Part-1-1.77.2.1.Part-1-1.111.2.1	
*Equation	
2	
lock: Add After Remove Discard Edits	
OK Discard All Edite	Cancel
	concer

Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует..15 (б) - Добавление уравнений при помощи инструмента Edit

keywords





Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..16 - Добавление нагрузок и граничных условий

Запуск на расчет

Перед запуском модели на расчёт необходимо создать запрос на вывод коэффициентов напряжений. Для этого в модуле **Step** нужно выбрать пункт меню **Output**—**History Output Request**—**Create...** (инструмент **:::**) и запросит вывод коэффициентов интенсивности напряжений для ранее созданной трещины Crack-1 (рисунок 2.14). Учитывая зависимость расчета J-интеграла используемого при вычислении коэффициент интенсивности напряжений от области вокруг вершины выреза, необходимо задать вывод коэффициента интенсивности для нескольких контуров.



🜩 Edit Hist	ory Output Request
Name:	H-Output-2
Step:	Step-1
Procedure:	Static, General
Domain:	Crack 🔹 : Crack-1
Frequency:	Every n increments n: 1
Timing:	Output at exact times 👻
Number of	contours: 4
E Step for	residual stress initialization values:
Туре: 🔘 Ј-	integral
00	it-integral
© T	-stress
S	tress intensity factors
0	Crack initiation criterion: 🔘 Maximum tangential stress
	Maximum energy release rate
	○ KII=0
	OK

Рисунок **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** 17 - Запрос вывода коэффициента интенсивности напряжений

После этого можно создать и запустить расчёт, выбрав пункт меню **Job**—**Create...** (инструмент **—**) в модуле **Job** со стандартными настройками.

Анализ полученных результатовЦель работы состояла в исследовании

зависимости свойств контактного взаимодействия на значение коэффициента интенсивности напряжений и сравнении результатов расчёта с приближённым аналитическим решением, полученным в работе [2]. Для исследования был выбран случай l/c = 1, и $\gamma = \theta$ (рисунок 1.1). Предложенное аналитическое решение не учитывает всех особенностей контактного взаимодействия на границе наклонного разреза, вычисляя коэффициент интенсивности напряжений как сумму коэффициентов, вызванных действием сдвига наклонного выреза и действием напряжений, приложенных на удалении, на вертикальный вырез. В случае одноосного сжатия и вертикального расположения трещины ($\gamma = \theta$), влияние напряжений, приложенных на удалении от разреза на коэффициент интенсивности напряжений отсутствует, и коэффициенты интенсивности напряжений могут быть вычислены по формулам:



$$K_I = \frac{2c\tau\sin\theta}{\sqrt{\pi l}}, \ K_{II} = -\frac{2c\tau\cos\theta}{\sqrt{\pi l}},$$

где τ – напряжение, вызывающее сдвиг поверхностей наклонной части разреза друг относительно друга. В случае одноосного сжатия, оно может быть найдено по формуле

$$\tau = \frac{1}{2}\sigma\sin 2\gamma.$$

Сравнение с этим решением было проведено при помощи модели с касательной нагрузкой, приложенной к поверхности наклонного выреза, и углом $\gamma = 60^{\circ}$. Сжимающее напряжение в этой модели не прикладывалось, так как в теоретическом решении его влияние для случая $\gamma = \theta$ при одноосном сжатии к сдвигу границ наклонного разреза, сводится только что уже учтено приложением сдвиговой нагрузки. Трение на поверхности контакта отсутствует. Касательная нагрузка на поверхности контакта вычислена для значения $\sigma = 1000$. Построение данной модели описано в разделе 2. Результаты сравнения аналитического приближения и конечно-элементного решения приведены в таблице 3.1. Приведённые результаты сравнения показывают хорошее соответствие между теоретической и конечно-элементной моделью, с учётом грубой приближенного характера приведённого достаточно сетки И аналитического решения.

Таблица **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**.2 – Сравнение аналитического решения и конечно-элементной модели

	Аналитическое значение, Па $\cdot \sqrt{M}$	Abaqus, $\Pi a \cdot \sqrt{M}$	Ошибка, %
K _I	283.85	280.71	-1.12
K _{II}	-163.88	-150.97	-8.55

Для анализа влияния условий контакта коэффициент интенсивности напряжений был поострен ряд моделей для углов $\gamma = \theta$ от 10° до 80° с шагом 10° и трением на поверхности контакта, определяемым коэффициентом трения μ под



действием сжимающей нагрузки $\sigma = 1000$. Их построение аналогично описанию в разделе 2 с точностью до замены нескольких числовых параметров. Типичная картина распределения напряжений в построенных моделях показана на рисунке 3.1. На нём отчётливо видно, что вершина вертикального разреза находится под действием нормального отрыва (положительное напряжение σ_{11}).



Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..18 – распределение напряжений в окрестности разреза (γ=70°, множитель перемещений 20)

Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от коэффициента трения и угла разреза приведена на рисунке 3.2. Коэффициент интенсивности уменьшается с увеличением коэффициента трения и стремится к нулю при стремлении угла γ к значениям 0° и 90°. Стоит, однако, отметить что полученные значения коэффициента интенсивности выше приведённых в работе [2], что может быть объяснено более точным учётом модели контактного взаимодействия на границе наклонного разреза в конечно-элементном расчёте.





Рисунок Ошибка! Текст указанного стиля в документе

отсутствует..19 – зависимость коэффициента интенсивности напряжений от коэффициента трения и угла разреза

Список использованных источников

- Gay N. C. Fracture growth around openings in large blocks of rock subjected to uniaxial and biaxial compression //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – Pergamon, 1976. – T. 13. – №. 8. – C. 231-243.
- Horii H., Nemat-Nasser S. Brittle failure in compression: splitting faulting and brittle-ductile transition //Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 1986. – T. 319. – №. 1549. – C. 337-374.
- Horii H., Nemat-Nasser S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1985. – T. 90. – №. B4. – C. 3105-3125.
- 4. Nemat-Nasser S., Horii H. Rock failure in compression. The Technological Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1983. №. SGP-TR-74-51.



4. Определение значения Ј-интеграла и коэффициента интенсивности напряжений для трещины отрыва

Автор: Дияров К.А.

Организация: УГНТУ, г. Уфа

В рамках решения данной задачи производится нахождение значений Ј-интеграла и коэффициента интенсивности напряжений для трещины отрыва образца с плоским напряженным состоянием. Длина образца 40 мм, ширина 10 мм, толщина 2 мм, длина трещины 2 мм. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема задачи.



Рисунок 1.1 – Принципиальная схема задачи

Граничные условия:

1. Нижняя грань жестко закреплена.

2. К верхней грани прикладывается усилие F=1000 H.



Система координат модели и система единиц измерения

Построение расчётной модели и обработка результатов производится в декартовой системе координат.

При моделировании принята следующая система измерений – СИ (мм). Таблица 2.1 – Система единиц измерения

Длина	Сила	Macca	Время	Напряжение	Плотность
ММ	Н	Т	С	МΠа	т\мм ³

Геометрическая модель

Откроем в дереве модели модуль **PART** (рисунок 2.1). Для создания детали нажмите кнопку *Create Part* , или дважды щёлкните на значке " Parts в дереве модели.



Рисунок 2.1 – Создание геометрической модели

В появившемся окне *Create Part* (рисунок 2.2) дайте детали имя *Plate* и примите следующие установки: 2D (двухмерного), *Deformable* (деформируемого) тела и *Shell* (оболочка) в качестве базового свойства. В текстовом поле *Approximate size* наберите 100. Щелкните *Continue*, чтобы закрыть диалоговое окно.

В появившемся рабочем поле (рисунок 2.3), воспользовавшись инструментом , создаём прямоугольник с координатами (0, 0) и (10, 40). После задания



координат каждой точки, подтверждаем свой выбор клавишей *Enter* (или средней кнопкой мыши). Далее нажимаем кнопку *Done*.

×	Create	\$
	Plate	Name:
	eling Space	Mode
ymmetric) 🖲 2D Planar	0 30
ns		Туре
	eformable	• De
aver italata	iscrete rigid	ODi
available	nalytical rigid	
	ulerian	O Eu
	Feature	Base
	nell	● Sł
	lire	OW
	oint	OP
	imate size: 100	Approx
a	imate size: 100	Approx



Рисунок 2.2 – Создание новой детали Рисунок 2.3 – Построение эскиза модели Зададим геометрию трещины. Для этого воспользуемся инструментом *Partition Sketch: Face* . В появившемся рабочем окне, щелкните по иконке *Create Lines Connected* и постройте линию с координатами (-5, 0) и (-3, 0), далее нажмите на иконку ⁽¹⁾ и постройте окружность по координатам центра (-3, 0) и точки на окружности (-2.5, 0) (рисунок 2.4).. Выйдите из инструмента, нажав среднюю кнопку мыши. Далее нажмите *Done*.

Модель материала

Перейдем в модуль **PROPERTY.** Зададим свойства материала. В **Дереве Модели** дважды кликните по контейнеру **Materials**, чтобы создать новый материал. В появившемся окне **Edit Material** (рисунок 2.5) присвойте материалу имя **Steel**, в выпадающем меню выберите **Mechanical->Elasticity>Elastic** и введите в соответствующих полях: 2E5 МПа для модуля Юнга и 0.3 для коэффициента Пуассона, далее нажмите **OK**.





Vame: Stee				
Material B	ehaviors			
<u>G</u> eneral	Mechanical Ihermal Electrical/Magneti	c <u>(</u>	<u>)</u> ther	[]
	Elasticity Plasticity Damage for Ductile Metals Damage for Traction Separation Laws Damage for Fiber-Reinforced Composites Damage for Elastomers Deformation Plasticity Damping Expansion Brittle Cracking Egs Viscosity	• • • • •	Elastic Hyperelastic Hyperfoam Low Density Foam Hypgelastic Porous Elastic Viscoelastic	



Рисунок 2.5 – Определение свойств

материала

Теперь перейдём к определению свойств сечения. Нажимаем на инструмент *Create Section* **.** В диалоговом окне *Create Section* присвоим сечению имя *Plate*. Выберите в соответствующих списках **Category:** *Solid*, *Type: Homogeneous* и щелкните *Continue*. В появившемся диалоговом окне *Edit Section*, в качестве материала необходимо указать *Steel*. Ставим галочку *Plane stress/strain thickness*, задаем значение толщины образца 2 мм(рисунок 2.6). Далее жмем *OK*.

Присвоим построенное сечение ранее созданной пластине. Для этого используем иконку **З Assign Section** в текущей панели инструментов, после выделим всю пластину, она будет подсвечена красным цветом. Нажмите **Done**. В появившемся диалоговом окне (рисунок 2.7), выберите сечение **Plate** и нажмите кнопку **OK**. После выполнения данных операций, цвет модели станет зелёным.



Name: S	ection-1
Type: S	olid, Homogeneous
Material:	Steel 모 🖉
V Plane	stress/strain thickness: 2

Рисунок 2.6 – Определение свойств

сечения

🕂 Edit Section Assignment
Region Region: Set-1 💦
Section Section: Plate
Note: List contains only sections applicable to the selected regions.
Type: Solid, Homogeneous Material: Steel
Thickness Assignment: From section From geometry
OK

Рисунок 2.7 – Присвоение сечения геометрической модели

Сборка

Перейдём в модуль *ASSEMBLY*. Для создания сборки нажмите на иконку *Create Part Instance* . В появившемся диалоговом окне (рисунок 2.8) в разделе *Parts* выберете *Plate*, а в *Instance Type* укажите *Independent* и подтвердите выбор, нажав *OK*.

+ Create Instance
Create instances from: Parts O Models
Parts
Plate
Instance Type
 Dependent (mesh on part)
Independent (mesh on instance)
Note: To change a Dependent instance's mesh, you must edit its part's mesh.
Auto-offset from other instances
OK Apply Cancel

Рисунок 2.8 – Создание экземпляра сборки



Определение процедуры анализа

Перейдём в модуль *Step*. Нажмите на панели инструментов иконку *Create Step* ••••. В появившемся окне задайте имя нового шага анализа – *Static*. Примите тип *Static, General* и щелкните *Continue* (рисунок 2.9). В появившемся окне *Edit Step*, оставьте все настройки решателя без изменений и нажмите *OK*.

В появившемся окне *Edit Step*, перейдите во вкладку *Incrementation*. В разделе *Increment size* измените значения *Initial* и *Maximum* на 0.25 (рисунок 2.7). Нажмите *OK*.

Create Step	
Name: Static	
Insert new step after	
Initial	
	🔶 Edit Step
Descriptions from Consult	Name: Static
Procedure type: General	Type: Static General
Dynamic, Temp-disp, Explicit	
Geostatic	Basic Incrementation Other
Heat transfer	Type: Automatic Fixed
Soils	Maximum number of increments: 100
Static, General	Initial Minimum Maximum
Static, Riks 🗸 🗸	Increment size: 0.25 1E-005 0.25
< >	
Continue Cancel	

Рисунок 2.9 – Определение процедуры анализа

Контактные взаимодействия

Перейдите в модуль *Interaction*. Используя главное меню, откройте вкладку *Special > Crack > Assign Seam*, после чего при помощи клавиши Shift выделите заданный отрезок трещины (рисунок 2.12). Нажмите *Done*.



Аналогично, используя главное меню, откройте вкладку *Special > Crack > Create*. В появившемся окне (рисунок 2.13) выберите тип создаваемой трещины *Contour integral* и нажмите *Continue*.



Рисунок 2.12 - Создание трещины

	Abaqus	/CAE Student Edition	#	Create Crack
Constraint Connector	Special Feature Tools	Plug-ins <u>H</u> elp \?	Name:	Crack
) (~ <mark>≧∎ </mark> ! ↔ (ction ♥ Model: ♥	<u>Crack</u> Springs/Dashpots ►	Assign Seam	Conto	our integral
	Easteners	<u>M</u> anager	Debor	nd using VCCT
		<u>C</u> reate Edit ►	Cont	tinue Cancel

Рисунок 2.13 – Определение типа трещины

После чего выбираем фронт трещины, для этого нажимаем на точку в центре

окружности, как показано на рисунок 2.14 и жмем Done.



Рисунок 2.14 – Определение фронта трещины



Из предложенных вариантов определения направления трещины выберите q *vectors* (рисунок 2.15). Далее вводим начальные координаты вектора (-3, 0), нажимаем *Enter* и координаты направления (-2.5, 0).

X Specify crack extension direction using: Normal to crack plane q vectors

Рисунок 2.15 – Определение направления трещины

После того как мы определили направление вектора, всплывает диалоговое окно *Edit Crack.* Как показано на рисунке 2.16 выбираем вкладку *Singularity*, в окне *Midside node parameter* вводим значение 0.25, выбираем тип *Collapsed element side, single node* и жмем OK.



Рисунок 2.16 – Параметры трещины

Для добавления вывода значений J – интеграла в результаты анализа в дереве модели нажмите правой кнопкой на инструмент *History output Requests* \mathbb{H} , выберите *Create*. В окне *Create History* (рисунок 2.10)присвойте имя J и нажмите *Continue*.

В появившемся окне Edit History output Requests (рисунок 2.11) выбираем в разделе Domain: Crack, количество контуров 5, Type: J-integral и нажимаем OK.



🔒 📴	Field Outpu	ut Requests (1)		\$	Create History	×
🗄 🏪	History Qu	tout Requests (1)				
 ++ +	Time Po	Switch Context Ctrl+Sp	ace	Mamor	1	1
- F	ALE Ada	Manager		Name:	,	
- 11	Interactio	Create		Step:	Static	~
둼	Interactio	Filter	F2			
- 🙀	Contact	Set As Root		Proced	ure: Static, General	
- 12	Contact	Expand All Under				
- 37	Contact	Collapse All Under		Cont	tinue Cancel	
<u>ب</u>	Constraints	5 (1)				_

Рисунок 2.10 – Создание вывода значений J – интеграла

÷	Edit History Output Request	×
Name: Step: Procedure:	J Static Static, General	
Domain: Frequency: Timing: Number of Step for Type: J C T S C C C C C C C C C C C C C	Crack Crack-1 Every n increments n: 1 Output at exact times contours: 5 residual stress initialization values: -integral t-integral t-stress stress intensity factors Crack initiation criterion: Maximum tangential str Maximum energy release Kli=0	ess e rate
	OK	el

Рисунок 2.11 – Определение свойств вывода значений J – интеграла

Аналогично, для вывода коэффициента интенсивности напряжений в области трещины в дереве модели нажмите правой кнопкой на инструмент *History output Requests* , выберите *Create*. В окне *Create History* присвойте имя *SIF* и нажмите *Continue*.

В появившемся окне *Edit History output Requests* выберите в разделе *Domain: Crack*, количество контуров 5, *Type: Stress intensity factors* и нажимаем *OK*.



Нагрузки и граничные условия

Для того чтобы приложить силу ко всей грани, задайте опорную точку. Для этого, оставаясь в модуле *Interaction*, нажмите на иконку *Create Reference Point* $\overset{\ref{multiple}}{\label{eq:starses}}$ и введите координаты (5, 45). Далее щелкните на инструмент *Create Constraint* $\overset{\ref{multiple}}{\label{eq:starses}}$, в появившемся окне (рисунок 2.17) выберите тип *Coupling* и нажмите *Continue*. Выберите опорную точку *RP-1* в рабочем окне и нажмите *Done*, далее нажмите *Surface* и выберите верхнюю границу пластины. Нажмите *Done*. В появившемся окне *Edit Constraint* оставьте все без изменений и щелкните *OK*.





Рисунок 2.17 – Задание опорной точки

Перейдём в модуль *Load*. На нижнюю грань пластины накладываются ограничения по перемещениям. Для моделирования данного граничного условия нажмите на иконку *Create Boundary Condition*. В появившемся окне (рисунок 2.18) выберите Шаг: *Initial*, Тип: *Symmetry/Antisymmetry/Encastre* и нажмите *Continue*.

Далее выберите нижнюю грань пластины и нажмите *Done*. В появившемся окне *Edit Boundary Condition* зафиксируйте все степени свободы, выбрав *ENCASTRE (U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0)* и нажмите *OK*.



Create	Boundary Condition	Edit Boundary Condition
Name: BC-1 Step: Initial Proced Initial Categ Static Categ	Types for Selected Step Symmetry/Antisymmetry/Encastre Displacement/Rotation Velocity/Angular velocity Acceleration/Angular acceleration Connector displacement Connector velocity Connector acceleration	Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre Step: Initial Region: Set-6 CSYS: (Global)
		 PINNED (U1 = U2 = U3 = 0) ENCASTRE (U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0)

Рисунок 2.18 – Задание ограничения

Для моделирования нагрузки нажмите на иконку *Create Load* ¹. В окне *Create Load* (рисунок 2.19) укажите Шаг: *Static*, Тип: *Concentrated force* и нажмите *Continue*.



Рисунок 2.19 – Выбор нагрузки

Выберите опорную точку *RP-1* в рабочем окне и нажмите *Done*. В окне *Edit Load* (рисунок 2.20) для *CF2* укажите значение 1000 Н и нажмите *OK*.





÷	Edit Load	×
ame: Load		
ype: Conc	entrated force	
tep: Static	(Static, General)	
egion: Set-7		
SYS: (Glob	al) 🔉 🙏	
istribution: [Jniform 🗸	f(x)
F1:		
F2:	000	
mplitude: (Ramp) 🗸	Po
Follow nod	al rotation	
ote: Force w	vill be applied per node.	
ote: Force w	vill be applied per node. Cancel]

Рисунок 2.20 – Задание нагрузки

Конечно-элементная модель

Следующим шагом будет построение конечно-элементной сетки. Для этого Mesh. В поле **Object** выбираем Assembly переходим модуль В 🖹. Далее нажимаем на панели инструментов команду Model: Model-1 V Object: Assembly Part: Seed Edges 🛄 и выбираем отрезок расположенный внутри окружности, как показано на рисунке 2.21. Нажимае Done. В появившемся окне Local Seeds выберите Method: By number и укажите количество элементов равное 4, нажмите **ОК**.

	\$	Local Seeds	. ×
	Basic Constraint Method By size By number Sizing Controls Number of element	Bias None O Single O Double	
	Set Creation	name: Edge Seeds-1 Apply Defaults Ca	ancel

Рисунок 2.21 – Задание локального сгущения сетки



Выберите инструмент Seed Part Instance , в диалоговом окне Global Seeds (рисунок 2.22) введите значение 1 для раздела Approximate global size и нажмите *OK*.

\$	Global Seeds	*		Mesh Controls	×
Sizing Contro	ls	Eler	ment Shape		
Approximate		<u> </u>	luad O Qua	ad-dominated () In	
Curvature of	control	Tec	hnique	Algorithm	
Maximum	deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1	0/	ls is	Medial axis	
(Approxim	ate number of elements per circle: 8)		ree 📃	Minimize the mesh transition 👸	
Minimum size	control	0 5	tructured	O Advancing front	
By fract	tion of global size (0.0 < min < 1.0) 0.1	0.5	weep	Use mapped meshing where appropr	ate
O By abso	olute value (0.0 < min < global size) 0.2	01	Aultiple		
OK	Apply Defaults Can	cel	OK	Defaults Cancel	1
UK	Apply Defaults Can	cel	UK	Cancel	-

Рисунок 2.22 – Определение разметки детали

Рисунок 2.23 – Метод построения сетки

С помощью команды Assign Mesh Controls **S** выберем форму конечного элемента и методы построения сетки, для этого щелкните на область внутри окружности и нажмите Done. Во всплывшем окне Mesh Controls примените параметр Sweep и нажмите OK. Далее щелкните на область вне окружности и нажмите Done. В появившемся окне Mesh Controls (рисунок 2.23) в разделе Element Shape выберите Quad, в разделе Algorithm: Medial axis. Нажмите OK.

Затем при помощи инструмента *Mesh Part* **b**, создадим сетку (рисунок 2.24).

Запуск на расчет

Перейдите в модуль *JOB* (Рисунок 2.25). С помощью иконки *Create Job* создайте задание на расчёт. В появившемся окне *Create Job*, присвойте заданию имя *Static*.





Рисунок 2.24 – Конечноэлементная модель

Рисунок 2.25 – Определение задания на расчет

Для продолжения нажмите кнопку *Continue*. Задание на расчёт

сформировано. В появившемся окне Job Manager (рисунок 2.26) нажмите Submit.

Надпись *Running* в графе *Status* говорит о том, что расчет запустился.

Name	Mode	1	Туре	Status	Write Input
Static	Mode	1-1	Full Analysis	None	Data Check
					Submit
					Continue
					Monitor
					Results
					Kill
Create	Edit	Copy	Rename	Delete	Dismiss

Рисунок 2.26 – Вызов Job Manager

Анализ полученных результатов

После успешного завершения расчёта, в окне *Job Manager*, в графе *Status* надпись *Running* поменяется на *Completed*. Для просмотра результатов расчёта, в окне *Job Manager*, нажмите *Results* или в списке *Module* выбираем *Visualization*.



В рабочей зоне экрана появится недеформированная конечно-элементная модель образца.

Для вывода картины распределения эквивалентных напряжений по Мизесу на панели *Field Output* выберите *Primary*, *S*, *Mises* и нажмите на инструмент *Plot Contours on Deformed Shape* (рисунок 3.1). Результаты выводятся в рабочей зоне экрана (рисунок 3.2).



Рисунок 3.1 – Вывод картины распределение эквивалентных напряжений



Рисунок 3.2 – Распределение эквивалентных напряжений (МПа)

Для вывода значений графика значений J-интеграла в зависимости от шага расчета нажмите на вкладке главной панели **Result** => **History Output**, и, в появившемся окне **History Output** (рисунок 3.3) из списка выберите *J-integral: J at J_CRACK-1__PICKEDSET6_Contour_5 in ELSET ALL ELEMENTS*, нажмите на



кнопку *Plot*. В рабочей зоне появится график значений Ј-интеграла (рисунок 3.5). Выполняем аналогичные действия для построения графика значений коэффициента интенсивности напряжений (рисунок 3.6), в окне *History Output* выбираем списка **Stress** intensity factor K1: *K1* at SIF CRACK-ИЗ 1 PICKEDSET6 Contour 5 in ELSET ALL ELEMENTS.

Section <u>P</u> oints <u>F</u> ield Output	Z × Z × Y Z Z Y Ile: ♥ Visualization	Image: Weight of the second secon	0 O 📉 🔿
<u>H</u> istory Output Options	[x1.F-3	3]	
History Output		· · · ·	53
Output Variables Name filter:	-ĝ-		
J-integral estimated J-integral estimated J-integral: J at J_CRA J-integral: J at J_CRA	from Ks: JKs at SIF_CF from Ks: JKs at SIF_CF ACK-1PICKEDSET6_C ACK-1PICKEDSET6_C	RACK-1_PICKEDSET6_Contour_4 in ELSET ALL ELEMENTS RACK-1_PICKEDSET6_Contour_5 in ELSET ALL ELEMENTS Contour_1 in ELSET ALL ELEMENTS Contour_2 in ELSET ALL ELEMENTS	*
J-integral: J at J_CRA J-integral: J at J_CRA	ACK-1_PICKEDSET6_C	Contour_3 in ELSET ALL ELEMENTS Contour_4 in ELSET ALL ELEMENTS	
J-integral: J at J_CRA Joule heat dissipatio	ACK-1PICKEDSET6_C on: ALLJD for Whole M	Contour_5 in ELSET ALL ELEMENTS Model	-

Рисунок 3.3 – Построение графика

Для оценки полученных результатов, решим задачу аналитическим методом.

Определим напряжения растягивающие образец:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{a \cdot b} = \frac{1000}{2 \cdot 10} = 50 \text{ M}\Pi a, \qquad (3.1)$$

где F-усилие, с которым растягивается образец, H;

S – площадь поперечного сечения образца, мм;

а – толщина образца, мм;

b – ширина образца, мм.

Коэффициент интенсивности напряжений рассчитывается по формуле:

$$K_{I} = \sigma \cdot \sqrt{I} \cdot Y(\lambda), \qquad (3.2)$$

где 1-длина трещины, мм;



Y(λ) – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения длины трещины к размерам образца.

Для данной схемы нагружения (рисунок 3.4) Y(λ) определяется следующим образом:

$$Y(\lambda) = 1,99 - 0,41 \cdot \lambda + 18,70 \cdot \lambda^2 - 38,48 \cdot \lambda^3 + 53,85 \cdot \lambda^4,$$
(3.2)

где λ – отношение длина трещины к толщине образца;

Рассчитаем отношение длины трещины к толщине образца:

$$\lambda = \frac{1}{b} = \frac{2}{10} = 0, 2. \tag{3.3}$$

Подставив полученное значение в (3.2) определим Y(0,2):

 $Y(0,2) = 1,99 - 0,41 \cdot 0,2 + 18,70 \cdot 0,2^2 - 38,48 \cdot 0,2^3 + 53,85 \cdot 0,2^4 = 2,43.$



Рисунок 3.4 – Схема нагружения образца

По (3.2) рассчитаем значение коэффициента интенсивности напряжений:

 $K_{I} = \sigma \cdot \sqrt{l} \cdot Y(\lambda) = 50 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,43 = 171,83 \text{ M}\Pi a \cdot \text{mm}^{1/2}.$

Для упругого случая в плосконапряженном состоянии J-интеграл определяется по формуле:

$$J = G = \frac{K_{I}^{2}}{E} = \frac{171,83^{2}}{2 \cdot 10^{5}} = 0,148 \text{ MJ} \text{mm}^{2}, \qquad (3.4)$$

где Е – модуль Юнга, МПа.



Погрешность значений J-интеграла (0,141261 мДж/мм²) и коэффициента интенсивности напряжений (173,849 МПа·мм^{1/2}), полученных в программном комплексе Abaqus, в сравнении с аналитическим решением (J = 0,148 мДж/мм², $K_I = 171,83$ МПа·мм^{1/2}) составляет менее 5 %.



Рисунок 3.5 – График зависимости значений Ј-интеграла от шага расчета



Рисунок 3.6 – График зависимости значений коэффициента интенсивности напряжений от шага расчета


5. Моделирование местной потери устойчивости тонкостенных элементов

Автор:

Мальгин М.Г.

Организация:

Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев

В рамках данной задачи производится расчет местной потери устойчивости отсека стенки металлической сварной балки (Рисунок 1.1). Двутавровая балка длиной 2970мм состоит из стенки толщиной 4мм и высотой 600мм. Верхний и нижний пояс балки имеет размеры 200х10мм. Стенка балки подкреплена тремя продольными ребрами жесткости с размерами 30х5мм лишь с одной стороны, а также пятью поперечными ребрами жесткости с размерами 70х10мм с двух сторон. Два поперечных ребра размещены в местах опоры балки на опоры, другие ребра сосредоточены в средней части балки. Все элементы балки из одной марки стали, с пределом текучести 480МПа. Нагрузка прикладывается таким образом, чтобы в балке возникал трехточечный изгиб. В расчете рассматривается ½ балки.



Рисунок 1.1 – Общий вид сварной балки

Для того, чтобы отразить местную потерю устойчивости в отсеке стенки при нагружении, балка имеет закрепления, ограничивающие ее перемещение в поперечном направлении. Закрепления находятся в местах размещения поперечных ребер жесткости.

Решение задачи состоит из трех этапов:



1. Расчет в линейной постановке. Используется тип расчета *Buckle*, позволяющий определить формы потери устойчивости и соответствующие значения критических сил.

2. Расчет в нелинейной постановке. Используется тип расчета *Static, Riks*, позволяющий оценить закритическое поведение конструкции с учетом физической и геометрической нелинейности. При этом в модели учитываются несовершенства геометрической формы элементов (начальное искривление).

3. Выполнение сравнительного анализа результатов расчета в SIMULIA Abaqus с результатами аналитического решения и данными натурного эксперимента.

РАСЧЕТ В ЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ В SIMULIA Abaqus

Система координат модели и система единиц измерения

Построение расчетной модели и обработка результатов производится в декартовой системе координат.

При моделировании принята следующая система измерений - SI.

Таблица 2.1 – Система единиц измерения

Длинна	Сила	Напряжения	
М	кН	кН/м ²	

Геометрическая модель

Открыть в дереве модели модуль *PART*. Для создания детали нажмите кнопку *Create Part* , или дважды нажмите на значке [—] Parts в дереве модели.





Рисунок 2.1 – Создание геометрической модели

В появившемся окне *Create Part* (Рисунок 2.2) введите имя *Girder* и следующие установки: *3D* (трехмерное), *Deformable* (деформируемое) тело и *Shell* (оболочка), с типом *Extrusion*, в качестве базового свойства. В текстовом поле *Approximate size* введите 0.6. Нажмите *Continue*, чтобы закрыть диалоговое окно.



Рисунок 2.2 – Построение эскиза *Girder*

В появившемся рабочем поле, воспользовавшись инструментом , создайте отрезками сечение балки (с произвольными размерами), а затем с



инструментом
откорректируйте размеры: левый и правый свес поясов – 0.1; высота стенки – 0.6; продольные ребра – 0.3; расстояние между ребрами по высоте – 0.15. После задания координат каждого отрезка через
, нажмите *Esc* для завершения (или среднюю кнопку мыши). Для использования инструмента

▶ выделите элемент, введите нужный размер, нажмите *Enter*. В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки *Cancel*. Выйдете из режима *Эскиз* нажав кнопку *Done*. В появившемся диалоговом окне (Рисунок 2.3), напротив Depth, введите 1.485.

💠 Edit Base Extrusion 🛛 🗙					
End Condition					
Type: Blind					
Depth: 1.485					
Options					
Note: Twist and draft cannot be specified together.					
Include twist, pitch:	0	(Dist/Rev)			
Include draft, angle:	0	(Degrees)			
ОК		Cancel			



Рисунок 2.3 – Выдавливание сечения

Создайте вторую деталь (Рисунок 2.4) с именем *Stiffener* и со следующими установками: *3D* (трехмерное), *Deformable* (деформируемое) тело и *Shell* (оболочка), с типом *Planar*, в качестве базового свойства. В текстовом поле *Approximate size* введите 0.6. Нажмите *Continue*, чтобы закрыть диалоговое окно.

В появившемся рабочем поле, воспользовавшись инструментом , создайте прямоугольник с размерами 0.6 по высоте и 0.14 по ширине. Прямоугольник должен размещаться в центре рабочего поля. Выйдете из режима *Эскиз* нажав кнопку *Done*.





Рисунок 2.4 – Построение эскиза Stiffener



Рисунок 2.5 – Создание экземпляра сборки

Сборка

Перейти к модулю ASSEMBLY (Рисунок 2.5). Для создания сборочной единицы нажмите на иконку Create Part Instance 155 (либо в дереве модели



дважды нажмите по элементу **Sinstances**, либо воспользуйтесь командами: меню *Instance => Create*). Появится окно со списком созданных деталей *Parts*. В нашем случае две детали, выберите их – они будут выделены, нажмите *OK*.

В модуле ASSEMBLY нажмите \square , выделите поперечное ребро балки и нажмите **Done**. Появившиеся значения координат первой точки (0.0,0.0,0.0) оставите по умолчанию и нажмите **Enter**. Для второй точки укажите координаты 0.0,0.0,0.135 и нажмите **OK**. В результате поперечное ребро сместиться вдоль балки на указанную величину. Нажмите \square , снова выделите поперечное ребро и нажмите **Done**. В появившемся окне (Рисунок 2.6), в рамке **Direction 2**, укажите 1 под **Number**, в рамке **Direction 1** нажмите \square и укажите в модели любую линии вдоль балки, введите 1.275 под **Offset**, после чего нажмите **OK**. Скопируйте третье поперечное ребро, аналогично описанной выше процедуре, на величину 0.075 (Рисунок 2.7).



Рисунок 2.6 – Копирование второго ребра





Рисунок 2.7 – Копирование третьего ребра

В модуле ASSEMBLY нажать ⁽¹⁾. В появившемся диалоговом окне введите имя *Total*, в *Intersecting Boundaries* выберите *Retain* и нажмите *Continue* (Рисунок 2.8), выделите все элементы и нажмите *Done*.

Merge/Cut Instances	
Note: This function will create a new part and	
automatically instance it into the assembly.	
Part name: Total	
Operations	
Marra	
© Merge	
Geometry O Mesh O Both	
○ Cut geometry	
Ontions	
Suppress () Delete	
Geometry	
Intersecting Boundaries	
O Remove	
Retain	
Cantinua	
Conunue Cancei	

Рисунок 2.8 - Сшивка элементов геометрической модели

Свойства

Для создания материала с необходимыми свойствами для расчета, в дереве модели дважды нажмите по контейнеру *Materials*. В появившемся окне *Edit Material* введите имя *Steel*. В меню редактора выберите



Mechanical=>Elasticity=>Elastic и введите значение модуля упругости 2,0e8 kN/m² и коэффициента Пуассона 0.3 (Рисунок 2.9) и нажмите *OK*. Для создания сечения элементов откройте диалоговой окно *Create Section* (вызов возможен либо из *Дерева модели*, либо через иконку \textcircled). В диалоговом окне *Create Section* введите имя сечения *t-4*, в категории выберите *Shell*, укажите тип *Homogoneous* и нажмите *Continue*. В появившемся окне pедактора сечений *Edit Section*, в качестве материала укажите созданный ранее материал *Steel* и укажите *Shell Thickness Value* - 0.004, после чего нажмите *OK*. Повторите процедуру с созданием еще двух сечений с именами *t-5*, *t-10* и толщинами 0.005, 0.01.

🖶 Edit Material X	🖕 Edit Section 🛛 🕹
Name: Steel	
Description:	Name: t-4
Material Behaviors	Type: Shell / Continuum Shell, Homogeneous
Elastic	Section integration: O During analysis Before analysis
	Basic Advanced
General Mechanical Inermal Electrical/Magnetic Other	Thickness
Elastic	Shell thickness: Value: 0.004
Type: Isotropic 🗸	
Use temperature-dependent data	🔿 Element distribution:
Number of field variables: 0	f(x)
Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term	O Nodal distribution:
No compression	
No tension	Material: Steel 🗸 🖄
Data	
Young's Poisson's Modulus Ratio	Thickness integration rule: Gauss
1 20000000 0,3	Thickness integration points: 5
	Options: 🔶
OK Casel	OK Cancel
Cancel	

Рисунок 2.9 – Определение материала и толщины элемента

Следующим шагом является присвоение созданных сечений элементам балки. Для этого нажмите **З Assign Section** в текущей панели инструментов (либо дважды нажмите по элементу в дереве модели, либо используйте команду меню: **Assign => Section**). С помощью мыши выделите стенку балки, она будет подсвечена красным цветом (Рисунок 2.10) и нажмите **Done**. В появившемся окне выберите сечение *t*-4 и подтвердите выбор нажатием кнопки **OK**. Повторите процедуру для продольных ребер (сечение *t*-5), поясов балки (сечение *t*-10), ребра по середине балки (сечение *t*-5) и остальных ребер (сечение *t*-10) (Рисунок 2.11).



🜩 Edit Section Assignment 🛛 🗙
Region Region: Set-1
Section Section: t-4 Note: List contains only sections applicable to the selected regions. Type: Shell, Homogeneous Material: Steel
Thickness Assignment: ● From section ○ From geometry
Shell Offset Definition: Middle surface
OK Cancel

Рисунок 2.10 – Присвоение сечения *t-4* стенке балки



Рисунок 2.11 – Присвоение сечений остальным элементам балки



Определение процедуры анализа

В дереве модели дважды нажмите по контейнеру *Step*. В окне *Create Step* введите имя нового анализа – *Linear buckling*. Выберите *Procedure type=>Linear perturbation*. Из списка выберите линейный расчет устойчивости *Buckle* и нажмите *Continue* (Рисунок 2.12). В появившемся окне *Edit Step* укажите число форм - 3 и нажмите *OK*.

💠 Create Step 🛛 🗙	🜩 Edit Step 🛛 🗙
Name: Linear buckling	Name: Linear buckling Type: Buckle
Insert new step after	Basic Other
Initial	Description:
	Nigeom: Off
	Eigensolver: 🔿 Lanczos 💿 Subspace
	Number of eigenvalues requested: 3
Procedure type: Linear perturbation Buckle Frequency Static, Linear perturbation Steady-state dynamics, Direct Substructure generation	Maximum eigenvalue of interest: Vectors used per iteration: Maximum number of iterations: 30
Continue Cancel	OK

Рисунок 2.12 – Определение процедуры анализа линейной устойчивости

Нагрузки и граничные условия

Для задания граничных условий и нагрузки перейдите в модуль LOAD. Для задания нагрузки нажмите \square , в появившемся окне Create Load выберите Concentrated force, нажмите Continue. Затем выберите верхний узел стенки как на Рисунке 2.13 и нажмите Done. В появившемся окне Edit Load введите величину вертикальной силы CF2 =-0.5 и нажмите OK. Для задания граничных условий нажмите \square , в появившемся окне Create Boundary Condition выберите Step=>Initial, затем выберите Symmetry/Antisymmetry/Encastre и нажмите Continue. После этого выделите все элементы и линии находящиеся в плоскости симметрии балки (Рисунок 2.14) и нажмите Done. В появившемся окне Edit



Boundary Condition выберите ZSYMM (U3=UR1=UR2=0) и нажмите OK. Затем

еще раз нажмите , в появившемся окне *Create Boundary Condition* выберите *Displacement/Rotation* и нажмите *Continue*. Выделите линии под поперечным ребром на конце балки как на Рисунок 2.15 и нажмите *Done*. В появившемся окне *Edit Boundary Condition* укажите закрепление *U2* и нажмите *OK*. Повторите процедуру для поперечных закреплений балки выбрав четыре узла в местах прикрепления ребер к стенке (Рисунок 2.16) и укажите закрепление *U1*.



💠 Edit Load 🛛 🗙						
Name:	Name: Load-1					
Type:	Concentrated force					
Step:	Step: Linear buckling (Buckle)					
Region:	Set-2					
CSYS: (Global) 🔈 🙏						
Distribu	ition: Uniform 🗸	f(x)				
CF1:						
CF2:	-0.5					
CF3:						
Note: Force will be applied per node.						
	OK Cancel					

Рисунок 2.13 – Задание нагрузки



💠 Edit Boundary Condition 🛛 🗙
Name: BC-1
Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
Step: Initial
Region: Set-3
CSYS: (Global) 😓 🙏
XSYMM (U1 = UR2 = UR3 = 0)
○ YSYMM (U2 = UR1 = UR3 = 0)
ZSYMM (U3 = UR1 = UR2 = 0)
XASYMM (U2 = U3 = UR1 = 0; Abaqus/Standard only)
YASYMM (U1 = U3 = UR2 = 0; Abaqus/Standard only)
ZASYMM (U1 = U2 = UR3 = 0; Abaqus/Standard only)
O PINNED (U1 = U2 = U3 = 0)
O ENCASTRE (U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0)
OK Cancel





Рисунок 2.15 – Задание граничных условий опоры балки







X

Конечно-элементная модель

Перейдите в модуль MESH, выберите Part=>Total (Рисунок 2.17). Нажмите Ца, в появившемся диалоговом окне Global Seeds укажите средний размер конечных элементов 0.047, нажмите ОК и Done. Нажать 🔚 , выделите все элементы модели и нажмите Done. В появившемся диалоговом окне Mesh Controls выберите форму элементов Quad, алгоритм Medial axis с указанием Minimize the mesh transition (Рисунок 2.18), после этого нажмите OK и Done.

📥 Global Seeds

Нажмите 🖳 и *Yes* для нанесения сетки конечных элементов.

	-
	Sizing Controls
	Approximate global size: 0.047
Object: 🔿 Assembly 🖲 Part: 📮 Total 🗸	Curvature control
	Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1
	(Approximate number of elements per circle: 8)
	Minimum size control
	By fraction of global size (0.0 < min < 1.0)
	O By absolute value (0.0 < min < global size) 0.0074
	OK Apply Defaults Cancel

Рисунок 2.17 – Задание среднего размера конечных элементов

Mesh Controls		×		
Element Shape				
Quad O Quad	-dominated () Tri			
Technique	Algorithm			
🔿 As is	Medial axis			
Free	🗹 Minimize the mesh transition 🛛 🍟			
O Structured	O Advancing front			
O Sweep	✓ Use mapped meshing where appropriate			
O Multiple				
ОК	Defaults Cancel			



Рисунок 2.18 – Настройки структуры сетки конечных элементов

Запуск на расчет

Перейдите в модуль *JOB* (Рисунок 2.19). С помощью иконки *Create Job* (либо команды меню *Job => Create*, или дважды нажав по элементу в дереве модели) создайте задание на расчет. В появившемся окне *Create Job* введите заданию имя *Linear_buckling* и нажмите *Continue*.



Рисунок 2.19 – Определение задания на расчет

Чтобы запустить на расчет нажмите **ID** Job Manager (Рисунок. 6.20), выберите задание Linear_buckling и нажмите Submit (либо раскройте элемент Jobs дерева модели, нажмите правой кнопкой по заданию Linear_buckling и выберите Submit).



Рисунок 2.20 – Вызов Job Manager



Анализ полученных результатов

Для отображения результатов расчета, в дереве модели нажмите правой кнопкой мыши на *Linear_buckling* и выберите *Results* (Рисунок 3.1). Для

отображения деформированного вида нажмите . На Рисунке 3.2 представлена первая форма местной потери устойчивой стенки балки в линейной постановке. Ниже указана величина критической силы *Mode1: Eigenvalue = 995.19* (КН).



Рисунок 3.1 – Переход в режим анализа результатов расчета



Рисунок 3.2 – Отображение формы потери устойчивости



РАСЧЕТ В НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Получение перемещений узлов из линейного расчета

Несовершенство геометрической формы элементов для нелинейного расчета будет создаваться на основе первой формы потери устойчивости, с введением масштабного коэффициента. Для этого, не закрывая созданный ранее проект, в дереве модели нажмите правой кнопкой мыши на *Model-1* и выберите *Edit Keywords* (Рисунок 3.1). В появившемся диалоговом окне *Edit keywords, Model: Model-1*, в самом конце, между стройками «*Output field variable=PRESELECT» и «End Step» введите две строки: «*NODE FILE» и «U». Введенные команды, после повторного выполнения расчета модели, откроют доступ к перемещениям узлов модели исходя из полученных форм потери устойчивости. Значения перемещений будут применяться программой для преобразования геометрии расчетной модели. После введения команд нажмите *OK* и запустите задачу снова на расчет.



Рисунок 3.1 – Внесение дополнительных команд в расчетную модель

Пластические свойства стали

В дереве модели откройте ранее созданный материал стали *Materials(1)=>Steel*. В появившемся окне *Edit Material*, в меню редактора, выберите *Mechanical=>Plasticity=>Plastic* и введите значение предела текучести



480000 (кН/м²) и величину начальных пластический деформаций 0. После этого нажмите *ОК*.

≑ Edit Material				×
Name: Steel				
Description:				1
Material Behaviors				
Elastic				
Plastic				
<u>General</u> <u>Mechanical</u>	<u>I</u> hermal	Electrical/Magnetic	<u>O</u> ther	*
Plastic				
Hardening: Isotropic	~			 Suboptions
Use strain-rate-depe	endent data			
Use temperature-de	pendent data			
Number of field variabl	es: 0 单	The second se		
Data				
Yield	Plastic			
1 480000	0			
OK			Cancel	

Рисунок 3.2 – Переход в режим анализа результатов расчета

Определение нелинейной процедура расчета

Перейдите в модуль *STEP*, нажмите . В диалоговом окне *Step Manager* выберите ранее созданную процедуру расчета *Linear buckling*, нажмите *Rename* и введите новое название «Nonlinear buckling». Выберите снова процедуру расчета *NonLinear buckling* и нажмите *Replace*. В открывшемся диалоговом окне укажите новую процедуру – *General*, выберите *Static*, *Riks* (Рисунок 3.3). В открывшемся диалоговом окне *Edit Step* установите переключатель на учет геометрической нелинейности и нажмите *OK* (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Определение процедуры нелинейного расчета

Задание геометрических отклонений

В дереве модели нажмите правой кнопкой мыши на *Model-1* и выберите *Edit Keywords*. В появившемся диалоговом окне *Edit keywords*, *Model: Model-1*, между строками «STEP: Nonlinear buckling» и «*Step, name='Nonlinear buckling', ngeom=Yes» введите команды «*IMPERFECTION, FILE=Linear_buckling, STEP=1» и «1, 2e-4». В Первой команде указывается файл с результатами расчета линейной устойчивости. Вторая команда указывает программе, что координаты узлов модели в ходе расчета изменятся, исходя из перемещений по 1 форме потери устойчивости с максимальной величиной отклонения в 2мм (Рисунок 3.4). В этом же диалоговом окне удалите все строки, в которых вначале присутствует слово «Conflicts» (Рисунок 3.4), после этого нажмите *OK*.

Запуск на расчет

Перейдите в модуль *JOB*. Создайте новое задание на расчет с введением имени *Nonlinear_buckling*. Запустите задание на расчет.



💠 Edit keywords, Model: Model-1	×	🜩 Edit keywords, Model: Model-1	×
"Боилаагу Set-5, 1, 1	^	**	^
** **		** OUTPUT REQUESTS **	
** STEP: Nonlinear buckling		*Restart, write, frequency=0	
*IMPERFECTION, FILE=Linear_buckling, STEP=1 1, 2e-4		** FIELD OUTPUT: F-Output-1	
*Step, name="Nonlinear buckling", nlgeom=YES		*Output, field, variable=PRESELECT	
*Static, riks 1., 1., 1e-05, , ,		*Conflicts, Generated keywords	
** LOADS		** HISTORY OUTPUT: H-Output-1 **	
** Name: Load-1 Type: Concentrated force		*Output, history, variable=PRESELECT	
*Cload		*Conflicts, User edited keywords	
Set-2, 2, -0.5 **		*NODE FILE U	
** OUTPUT REQUESTS		*Conflicts, End of conflict block	
*Restart. write. frequency=0	~	*End Step	*
Block: Add After Remove Discard Edits		Block: Add After Remove Discard Edits	
OK Discard All Edits	Cancel	OK Discard All Edits Cancel	





Рисунок 3.5 – Построение диаграммы равновесного состояния

Анализ полученных результатов

Для отображения результатов расчета, в дереве модели нажмите правой кнопкой мыши на *Nonlinear_buckling* и выберите *Results*. Для отображения деформированного вида нажмите **S**. Для построения диаграммы равновесного состояния модели перейдите в *Results=>History Output*. В открывшемся диалоговом окне выберите *Load proportionality factor: LPF for Whole Model* и нажмите *Plot* (Рисунок 3.5). В результате программа построит график. Из данного графика получается, что критическая сила для модели составляет *LPF=1044.15*



(*кН*). При этом важно отметить, что с уменьшением сетки конечных элементов данная величина будет уточняться.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С АНАЛИТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЕМ И ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Аналитический расчет

Аналитический расчет основывался на теории устойчивости пластин подкрепленных ребрами жесткости [1]. Данная теория допускает учет малых упруго-пластических деформаций. Для определения критической силы, при которой возникает местная потеря устойчивости стенки балки, использовалась формула (4.1), суть которой заключается в определении отношений компонентов действующих напряжений σ_x , τ_{xz} и критических напряжений $\sigma_{x,cr}$, $\tau_{xz,cr}$ в пластине. В формуле (4.1) коэффициент ϖ_I отражает особенности поведения пластины в упругопластической и закритических стадиях. Если при заданной нагрузки левая часть уравнения получается больше 1.0, соответственно пластина теряет устойчивость. Значения для формулы (4.1) при действии критической силы P_{cr} приведены в таблице 4.1.

$$\frac{\sigma_x}{\varpi_1 \cdot \sigma_{x,cr}} + \left(\frac{0.9 \cdot \tau_{xz}}{\tau_{xz,cr}}\right)^2 \le 1.0$$
(4.1)

Таблица 4.1 – Значения для формулы (4.1) при действии критической силы P_{cr}

σ_x , kN/m ²	$\sigma_{x,cr}$, kN/m ²	τ_{xz} , kN/m ²	$ au_{xz,cr}, \mathrm{kN/m}^2$	$arpi_l$	P _{cr} , kN
194280	364200	173640	228345	1.048	952

Натурный эксперимент

Данные натурного эксперимента были взяты из источника [2]. Размеры экспериментальной балки и свойства стали соответствуют приведенным ранее. На Рисунке 4.1 представлен общий вид балки на испытательном стенде и вид потери



устойчивости. На Рисунке 4.2 приведена диаграмма равновесного состояния, полученная в ходе эксперимента.



Рисунок 4.1 – Общий вид балки на испытательном стенде



Рисунок 4.2 – Диаграмма равновесного состояния

Сравнительный анализ

В Таблице 4.2 приведены значения критических сил, полученных из линейного и нелинейного расчета устойчивости в SIMULIA Abaqus, а также аналитического расчета и натурного эксперимента. На Рисунке 4.3 приведено



сравнение равновесного состояния балки, полученного из SIMULIA Abaqus и натурного эксперимента.



Таблица 4.2 – Значения критических сил *P*_{cr}, кН

Вертикальное перемещение (середина балки), мм



Список использованных источников

- 1. Потапкин А. А. Проектирование стальных мостов с учетом пластических деформаций //М.: Транспорт. 1984. Т. 200.
- Vigh L. G., Dunai L. Advanced stability analysis of regular stiffened plates and complex plated elements //Proceedings of SDSSRio 2010 Stability and Ductility of Steel Structures. – 2016. – C. 8-10.



6. Моделирование процесса мягкого обжатия на стадии неполной кристаллизации

Автор: Черкашина Т.И.

Организация: ЛГТУ, г. Липецк

В рамках данной задачи моделируется процесс мягкого обжатия на стадии неполной кристаллизации в виде трехмерной задачи. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема задачи.



Рисунок 1.1 – Постановка задачи

При построении модели процесса упругопластического деформирования непрерывного слитка в двухфазном состоянии приняты следующие допущения [1]:



- моделируется состояние только твердой фазы металла, а присутствие жидкого расплава не учитывается;
- в любой момент времени кристаллизации толщина твердой фазы постоянна по всему периметру поперечного сечения сляба;
- в пределах твердой фазы металл рассматривается как однородная изотропная среда;
- деформирующие ролики являются абсолютно жесткими.

В качестве моделируемого материала используется свинец. Напряжения текучести материала при различной скорости деформации в зависимости от величины пластической деформации представлены в таблице 1.1.

Напряжения текучести, ×10 ⁶	Пластическая деформация	Скорость деформации
2,0	0	0
6,0	0,1	0
8,0	0	0,4
11,0	0,05	0,4
13,0	0,1	0,4
17,5	0,2	0,4
22,0	0,3	0,4
27,0	0,5	0,4
33,0	0,8	0,4
34,0	1	0,4
10,0	0	9
14,0	0,05	9
17,0	0,1	9
22,0	0,2	9
26,0	0,3	9
32,0	0,5	9
38,0	0,8	9
40,0	1	9
12,0	0	100
17,0	0,05	100
20,0	0,1	100
25,0	0,2	100
28,0	0,3	100
34,0	0,5	100
41,0	0,8	100
43,0	1	100

Таблица 3.1 – Параметры материала



Основные физико-механические свойства материала: плотность – 11300кг/м³, модуль упругости – 14000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,4.

Исходные размеры целого образца $H_0 = 16$ мм, $B_0 = 72$ мм, $L_0 = 100$ мм, толщина стенки 4 мм. Моделируется 1/4 часть образца. Диаметр валка – 125 мм, длина – 125 мм. Угловая скорость вращения валка – 1,5708 рад/с. Начальная скорость движения заготовки – 0,2 м/с. Коэффициент трения – 0,2. Моделируется режим обжатия 3мм.

Приведено сравнение численного и аналитического решений для свинца.

1. Система координат модели и система единиц измерения

Построение расчётной модели и обработка результатов производится в декартовой системе координат в международной системе единиц, СИ.

Длина	Н	Macca	Время	Температура	Напряжения	Плотность
$\mathcal M$	Ν	kg	S	°C	Па	kg/m ³

Таблица 2.1 – Система единиц измерения

Геометрическая модель

Откроем в дереве модели модуль *PART*. Для создания детали нажмите кнопку *Create Part* , или дважды щёлкните на значке **Parts** в дереве модели.



26 <u>.</u> W	Abaqus/CAE Student Edition 6.13-2 [Viewport: 1]
Eile Model Viewport View Part Shape Featu	ire_Tools_Plug-ins_Help_ \?
0 🗗 🖬 🖶 🛔 🛊 🕼 🖓 🗗 🎒 🕼) : 💼 🐂 📰 🔟 🚳 🔍 🔪 \Lambda 🗟 📰 📰 : 🕧 🔅 Part defaults 🛛 🗗 🔹 🗟 All
Model Results	Module: Part V Model: Model-1 V Part:
Model Database 🗹 🌲 🖗 🍹	
➡ Models (1) ▲ ➡ Model-1 ▲ ➡ Parts ▲ ➡ Example ▲ ➡ Profiles ▲ ➡ Assembly ● ➡ Get Steps (1) ♣ ➡ Field Output Requests ➡ History Output Requests	

Рисунок 2.1 – Создание геометрической модели

В появившемся окне *Create Part* (Рисунок 2.2) дайте детали имя *Slab* и примите следующие установки: *3D* (трехмерного), *Deformable* (деформируемого) тела и *Solid* (твердое) в качестве базового свойства. В текстовом поле *Approximate size* наберите 0,1. Щелкните *Continue*, чтобы закрыть диалоговое окно

ame: Slab		
Modeling Sp	oace	
3D 2	D Planar	Axisymmetric
Type		Options
9 D C		
Deforma		
Discrete	rigid	None available
Analytica	al rigid	
Eulerian		
Base Feature		
Shape	Туре	
Solid	Extrus	ion
Shell	Revol	ution
 Wire 	Sweep	0
Reint		
Point		





Рисунок 2.2 – Построение эскиза модели

В появившемся рабочем поле, воспользовавшись функцией *Create Lines: Connected*, создаём ¹/₄ часть образца. Затем воспользовавшись инструментом, задайте нужный размер в нижнем поле, нажмите *Enter*. Аналогично поступите с другими граням. После задания координат каждой стороны сляба, подтверждаем свой выбор клавишей *Enter* (или средней кнопкой мыши). В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки *Cancel* или функции *Delete*. (Рисунок 2.2). Выходим из режима Эскиз, нажав кнопку *Done*.

В появившемся рабочем окне задаем величину выдавливания *Depth* равной 0,1. Затем нажимаем *OK* или *Enter* (Рисунок 2.3).

Edit Base Extrusion		23
End Condition		
Type: Blind		
Depth: 0.1		
Options		
Note: Twist and draft of	annot	be specified together.
Include twist, pitch:	0	(Dist/Rev)
📄 Include draft, angle:	0	(Degrees)
OK		Cancel

Рисунок 2.3 – Выдавливание модели

В результате получим ¹/₄ часть сляба, как показано на Рисунке 2.4





Рисунок 2.4 – Модель 1/4 сляба

После создания сляба, нам необходимо начертить валок. Валки будут абсолютно одинаковыми, поэтому достаточно будет начертить только один, а точнее 1/4 часть валка.

Для этого откроем в дереве модели модуль **PART.** Для создания детали нажмите кнопку *Create Part* **1**, или дважды щёлкните на значке **Parts** в дереве модели.

В появившемся окне *Create Part* дайте детали имя *Rolling* и примите следующие установки: *3D* (трехмерного), *Analytical rigid* (аналитически жесткая) тела и *Shell* (оболочка) в качестве базового свойства. В текстовом поле *Approximate size* наберите 0,2. Щелкните *Continue*, чтобы закрыть диалоговое окно.



adeling Space 3D O 2D Planar Axisymmetric pe Options Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian	adeling Space 3D 2D Planar Axisymmetric De Options Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian Re Feature Extruded shell	Axisymmetric pe Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian se Feature Extruded shell Revolved shell	ne: Rolling			
pe Options Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian	Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian Extruded shell	pe Options Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian se Feature Extruded shell Revolved shell	odeling Space 3D 💿 2D Planar	Axisymmetric		
Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian The Feature	Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian :e Feature Extruded shell	Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian Extruded shell Revolved shell	pe	Options		
Eulerian	Eulerian e Feature Extruded shell	Eulerian se Feature Extruded shell Revolved shell	Deformable Discrete rigid Analytical rigid	None available		
	Extruded shell	Extruded shell Revolved shell) Eulerian			
Revolved shell						
Revolved shell						

Рисунок 2.5 – Построение эскиза модели

В появившемся рабочем поле, воспользовавшись инструментом создайте часть круга. Затем воспользовавшись инструментом, эадайте нужный размер в нижнем поле равным 0,125. Подтверждаем свой выбор клавишей *Enter* (или средней кнопкой мыши). В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки *Cancel* или функции *Delete*. (Рисунок 2.5). Выходим из режима Эскиз, нажав кнопку *Done*.

В появившемся рабочем окне задаем величину выдавливания *Extrusion depth* равной 0,125. Затем нажимаем *OK*.

Extrusion depth (for display only): 0.125

Рисунок 2.6 – Выдавливание модели



Модель материала

Создадим материал с необходимыми теплофизическими свойствами. В Дереве Модели дважды кликните по контейнеру Materials, чтобы создать новый материал. В появившемся окне Edit Material зададим имя Lead. В меню редактора выберем Mechanical=>Elastic=>Elastic и введем значение модуля Юнга 14000000000 МПа и коэффициента Пуассона 0,4. Для задания значения пластических свойств материала выберем Mechanical => Plastic=> Plastic и введем значения таблицы 1.1, при этом необходимо поставить галочку для учета скорости деформации. Плотность свинца задаётся в окне General=>Density равную 11300 kg/m3 (Рисунок 2.7).

Name: LEAD Description: Material Behaviors			
Density Elastic Plastic			
<u>G</u> eneral <u>M</u> echanic Plastic	cal <u>T</u> hermal <mark>E</mark> lecti	rical/Magnetic <u>O</u> th	er 🖉
Use strain-rate-de	c rependent data dependent data ables: 0 *	-	 Suboptions
Yield Stress	Plastic Strain	Rate	-
1 2000000	0	0	=
2 4000000	0.05	0	2.11
3 6000000	0.1	0	
4 8000000	0	0.4	
5 11000000	0.05	0.4	
6 13000000	0.1	0.4	
17500000 8 22000000	0.2	0.4	
	DK .		Cancel
	Description: Material Behaviors Density Elastic Plastic Plastic Plastic Hardening: Isotropi V Use strain-rate-di Use temperature- Number of field varia Data Vield Stress 1 2000000 2 400000 3 6000000 4 8000000 5 11000000 6 1300000 7 1750000 8 22000000	Description: Material Behaviors Density Elastic Plastic General Mechanical Ihermal Electron Vise strain-rate-dependent data Use temperature-dependent data Number of field variables: O 2 4 800000 0.05 3 6000000 0.05 6 12000000 0.05 6 13000000 0.05 6 12000000 0.05 6 13000000 0.05 6 12000000 0.1 7 17500000 0.3	Description: Material Behaviors Density Elastic Plastic General Mechanical Ihermal Electrical/Magnetic Qth Plastic Wuber of field variables: 0 Data Vield Stress Strain Rate 1 200000 0 2 400000 3 600000 3 600000 0 0 4 800000 0 0.4 5 11000000 0.05 0.4 6 1300000 0.02 0.4

Рисунок 2.7 – Определение модели материала

Теперь перейдём к определению сечения. Открываем диалоговой окно *Create Section* (вызов возможен либо из *Дерева модели*, либо через иконку **()**. В диалоговом окне *Create Section* присвоим сечению имя *Lead*. Выберите в соответствующих списках *Solid, Homogeneous* и щелкните *Continue*. В



появившемся окне редактора сечений *Edit Section*, в качестве материала необходимо указать созданный ранее материал *Lead*.

Следующим шагом присвоим построенное сечение ранее созданному слябу. Для этого используем иконку **З Assign Section** в текущей панели инструментов (либо дважды щелкаем по элементу в дереве модели *Slab*, либо используем команды меню: *Assign => Section*). С помощью мыши выделите сляб, он будет подсвечен красным цветом. Нажмите *Done*. В появившемся окне (Рисунок 2.8), выберите созданное сечение и подтвердите выбор нажатием кнопки *OK*.

Region	
Region:	Set-1
Section	
Section:	lead 🚽 🏝
Note: L	ist contains only sections
а	pplicable to the selected regions.
a Type:	pplicable to the selected regions. Solid, Homogeneous

Рисунок 2.8 – Присвоение сечения геометрической модели

Теперь необходимо определить базовую точку отсчета. Для этого в верхней панели меню находим команду *Tools=> Reference Point*. Базовой точкой будет центр валка.

Далее определяем поверхность контакта сляба с валком. Для этого в Дереве модели выбираем валок *Slab=>Surface*. Выделяем весь сляб, нажимаем *Enter*, теперь нам необходимо выделить плоскость с какой будет контакт. Выбираем плоскость и соглашаемся. (Рисунок 2.9).





Рисунок 2.9-Определение поверхности контакта сляба

Сборка

Перейдём к модулю ASSEMBLY. Для создания сборки необходимо нажать на иконку Create Part Instance (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу instances), либо воспользоваться командами: меню Instance => Create). Появится окно со списком созданных деталей Parts. В нашем случае деталей две, выберем их – они будут выделены красным цветом. В разделе Instance Type укажите Dependent и подтвердите выбор, нажав OK.

Parts			
Roller Slab			
Instan Dep	e Type indent (mesh	on part)	
-	pendent (mesl	h on instance)	
🔘 Inde			
Inde	o change a De nesh, you mus	ependent instan st edit its part's i	ce's mesh
Inde Note: Auto-	o change a Do nesh, you mus	ependent instan st edit its part's i her instances	ce's mesh

Рисунок 2.10 – Создание экземпляра сборки



Теперь необходимо правильно расположить детали сборки и выровнять их. Для этого воспользуемся функцией *Rotate Instance* (вращать элемент), выделим на слябе 2 точки нужной плоскости и развернем образец на -90⁰.



Рисунок 2.11 – Конечная сборка Затем воспользовавшись функцией *Translate Instance* (перемещать



элемент), переместим сляб по краю валка, как показано на рисунке 2.11. После этого воспользуемся командой *Tools=>Partition=>Face=>Use shortest path between 2 points* и выберем на валке 2 точки, создав разделение как на рисунке 2.11. Переместим валок относительно вновь созданной линии на валке.

Также нужно определить поверхность контакта валка со слябом. Для этого в *Дереве модели* выбираем валок *Constraints=>Rigid Body=> Continue*. В появившемся окне выбираем *Analytical Surface* и стрелочку *Edit Selection*, в нижней панельки щелкаем на *Geometry*. Выбираем поверхность контакта валка, она окрашена в коричневый цвет *Brown*, также укажите RP, выбрав центр валка, и нажимаем *Enter* (Рисунок 2.12).



Рисунок 2.12-Определение поверхности контакта валка

В контейнере Assembly проверим наличие трех поверхностей *Assembly* => *Surfaces*: поверхность контакт у валка, поверхность контакта у сляба и одна внешняя поверхность сляба (появляются автоматически) (рисунок 2.13). Если какая-либо из плоскостей отсутствует, создадим её с помощью *Surface*=>*Create*.





Рисунок 2.13 – Создание необходимых для анализа плоскостей

Определение процедуры анализа

В *Дереве Модели* дважды щелкните по контейнеру *Step*. В окне *Create Step* задайте имя нового шага анализа – *Prokatka*. Задайте *Dynamic,Explicit* и щелкните *Continue* (Рисунок 2.14).

💠 Create Step	🖶 Edit Step
Name: Prokatka Insert new step after Initial Step-1	Name: Prokatka Type: Dynamic, Explicit Basic Incrementation Mass scaling Other Description: Time period: NIgeom: On
Procedure type: General Anneal Dynamic, Explicit Dynamic, Temp-disp, Explicit	Include adiabatic heating effects
Continue Cancel	OK

Рисунок 2.14 – Определение процедуры анализа



В появившемся окне *Edit Step*, задаём расчёт установившегося режима с временным период 1.

Также необходимо настроить массовый масштаб, для этого воспользуемся командой *Mass Scaling =>Use scaling definitions below*. В нижней части окна нажмите на клавишу Create. В появившемся окне зададим следующие настройки, как на рисунке 2.15.

			: #1		
Edit Step		Module: 🖹 Step	•	Model: Metal form	Lina Objective
					Semi-automatic mass scaling
ame: Step-1					Automatic mass scaling
/pe: Dynamic, Ex	plicit				Reinitialize mass
Basic Incremen	tation Mass so	aling Other			Disable mass scaling throughout step
Use scaled mas	ss and "through	out step" definitions	R)		
from the previous step					Application
Use scaling definitions below					Region: Whole model Set:
Data					Scale: At beginning of step Throughout step
Region	Туре	Frequency/ Interval	Factor	Target Time Increment	Туре
Whole Model		Beginning of Sten	250	None	Scale by factor: 250
				-	Scale to target time increment of:
					Scale element mass: If below minimum target
) [F.F.]					
Create Ldit Delete					Grand Increments
OK				Cancel	Scale
					O At equal intervals
Load Case	5		× -		
Field Output Reg	uests (1)				
History Output R	equests (1				
Time Points 👻					OK
111					

Рисунок 2.15 – Настройки массового масштаба

В появившемся окне *Edit Step*, установите настройки солвера и нажмите *OK*.

Контактные взаимодействия

Зададим трение между поверхностью сляба и валком. Для этого в окне *Create Interaction Properties* (модуль *Interaction*) зададим контакт, дав ему имя *friction*. В появившемся окне выберем *Mechanical=>Tangential Behavior=>Penalty*, зададим установки как на рисунке 2.16.


ame: friction	Mechanical Therm	and Electrical
Type Contact	Tangential Behavior Friction formulation:	Penalty
Film condition Cavity radiation Fluid cavity Fluid exchange Acoustic impedance Continue Car	Cel	endent data endent data sure-dependent data -dependent data ables: 0

Рисунок 2.16 – Определение свойств контакта

Теперь необходимо определить контакт между валком и слябом. Для этого в окне *Create Interaction* (модуль *Interaction*) выберите *Create=>Surface-to-surface-contact* и нажмите *Continue*. Выделите внешнюю поверхность валка и сляба, нажмите *OK*. (Рисунок 2.17).



Рисунок 2.17– Задание контакта



Нагрузки и граничные условия

В окне *Create Boundary Condition* выберите *Initial* граничных условий, категория *Mechanical* тип шага *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*, затем нажмите *Continue* выберите поверхность у сляба и поставьте настройки как на рисунке 2.18. Поверхность будет симметрична оси Z.



Рисунок 2.18 – Задание граничных сляба

В окне *Create Boundary Condition* выберите *Initial* граничных условий, категория *Mechanical* тип шага *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*, затем нажмите *Continue* выберите поверхность у сляба и поставьте настройки как на рисунке 2.19. Поверхность будет симметрична оси Y.



Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre		
Step: Initial		
Region: Set-3 🔉		
CSYS: (Global) 除 🙏		
XSYMM (U1 = UR2 = UR3 = 0)		
YSYMM (U2 = UR1 = UR3 = 0)		
ZSYMM (U3 = UR1 = UR2 = 0)		
XASYMM (U2 = U3 = UR1 = 0; Abaqus/Standard only)		
YASYMM (U1 = U3 = UR2 = 0; Abaqus/Standard only)	7 4	
ZASYMM (U1 = U2 = UR3 = 0; Abaqus/Standard only)		
PINNED (U1 = U2 = U3 = 0)		
ENCASTRE (U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0)	1 1 I	
OK Cancel		

Рисунок 2.19 – Задание граничных условий сляба

В окне *Create Boundary Condition* выберите *Initial* граничных условий, категория *Mechanical* тип шага *Displacement/Rotation*, затем нажмите *Continue* выберите *RP* на валке и поставьте галочки у U1, U2, U3, UR1, UR2 как на рисунке 2.20, кроме UR3.



Рисунок 2.20 – Задание граничных условий валка



Теперь необходимо задать вращение валку, для этого воспользуемся функцией *Create BC*: в шаге выбираем *Prokatka*, в категории *Mechanical*, в типе *Velocity /Angular velocity*. Выделяем *RP* на валке. Нажмите *Continue* и в появившемся окне задайте скорость вращения валка по Z равную -1,5708 рад/с (Рисунок 2.21).

Edit Boundary Condition Image: BC-4 Type: Velocity/Angular velocity Step: Prokatka (Dynamic, Explicit)	x z z
Region: Set-5 🔉	
CSYS: (Global) 🔉 🙏	
Distribution: Uniform 💌 f(x)	
🗇 V1:	
🗖 V2:	
🖾 V3:	
VR1: radians/time	
VR2: radians/time	
VR3: -1.5708 radians/time	
Amplitude: (Instantaneous)	
OK Cancel	A A A A A A A A A A A A A A A A A A A

Рисунок 2.21 – Задание вращения валка

Далее необходимо задать предопределенное поле перемещения сляба, для обеспечения захвата полосы валками. Для этого в меню выберите *Predefined Field* и в появившемся окне выберите шаг *Initial*, категорию *Mechanical* тип *Velocity* и нажмите продолжить (Рисунок 2.22).

Name:	Predefine	d Field-1
tep:	Initial	
roced	ure:	
Categ	jory	Types for Selected Step
Me	chanical	Velocity
🗇 Flu	id	Stress
O Otl	her	Geostatic stress
		hardening
		-
C	ontinue	Cancel

Рисунок 2.22-Параметры перемещения сляба

Выберите поверхность необходимую для перемещения. Далее в



появившемся окне задаем скорость перемещения сляба по оси X равную -0,2

(Рисунок 2.23).

🜩 Edit Predefined Field	x			X Z
Name: Predefined Field-1				
Step: Initial			X	
Region: Set-6 除				
Distribution: Uniform				
Definition: Translational only		=		
V1: -0.2				
V2: 0				
Angular velocity: 0	radians/time			
Axis point 1: 0,0,0				
Axis point 2: 0,0,0			A A	• /
ОК	incel			

Рисунок 2.23-Задание скорости перемещения сляба

Конечно-элементная модель

При расчёте задачи необходим определённый тип конечных элементов. В окне *Element Type (Mesh => Element Type)* выберите следующий тип КЭ – **C3D8R** (Рисунок 2.24). И нажмите *OK*.

Element Library	Family	
Standard O Explicit	3D Stress	
	Acoustic	
Geometric Order	Cohesive	
🖲 Linear 🔘 Quadratic	Continuum Shell	
Hex Wedge Tet		
Hybrid formulation	Reduced integration 🔲 Incompatible modes	
Element Controls		
	AU 17 1 A 4 7	
Hourglass stiffness:	Ose default Specify	
Viscosity:	Use default Specify	
Kinematic split:	Average strain Orthogonal Centroid	
Second-order accuracy:	O Yes O No	
Distortion control:		
	Length ratio: 0.1	-
C3D8R: An 8-node linear	brick, reduced integration, hourglass control,	
ote: To select an element	shape for meshing,	
select iviesn->Contri	bis from the main menu bar.	

Рисунок 2.24 – Выбор типа конечных элементов



С помощью инструмента *Partition Cell: Extend Face* **b** выберете плоскость показанную на рисунке 2.25(а) и завершите разбиение сляба, нажав на клавишу *Create Partition* в окне инструкций.

Для задания размеров конечных элементов на гранях воспользуемся инструментом . Seed Adges (применив параметр Local seed=>By number) задайте количество элементов на вертикальных гранях выделенных красным на рисунке 2.25(б) и укажите число элементов Number of elements 3. Во вкладке Constraints окна Local Seeds укажите, Do not allow the number of elements to change, чтобы построение сетки происходило строго по созданным параметрам. Нажмите OK. Повторите процесс для оставшихся двух вертикальных граней число элементов равное 6, а для продольных горизонтальных – 15 (Рисунок 2.25(б) посередине). Для торцевых горизонтальных граней укажите число элементов равное 7, и способ сгущения Bias => Double. Sizing Controls => Bias ratio (>=1) = 10. Произведите разбиение, воспользовавшись инструментом .







Рисунок 2.25 – Построение конечно-элементной модели

Валок в нашей постановке задачи абсолютно жесткий и для него строить сетку не нужно. Он подсветится оранжевым цветом.

Запуск на расчет

Перейдите в модуль *JOB* (Рисунок 2.27). С помощью иконки *Create Job* (либо команд меню *Job => Create*, или дважды кликнув по элементу в дереве модели) создайте задание на расчёт. В появившемся окне *Create Job*, присвойте заданию имя *Soft_Reduction*.



Module: 🗐 Ja	ob 🔽 Model: 🗍 Model-1 👻
	Name: Soft reduction Source: Model Model-1
	Continue Cancel

Рисунок 2.27- Определение задания на расчет

Для продолжения нажмите кнопку *Continue*. Задание на расчёт сформировано. Чтоб запустить расчёт, вызовите 📰 *Job Manager* (рис. 2.28) (либо раскройте элемент 🛃 Jobs дерева модели, кликните правой кнопкой по заданию *Soft reduction* и выберите *Submit*, либо командами меню *Job => Manager*).

В появившемся окне *Job Manager* нажмите *Submit*. Надпись *Running* говорит о том, что расчет запустился.



Рисунок 2.28 – Вызов *Job Manager*

Анализ полученных результатов На рисунке 3.1 представлены поле распределений эквивалентной пластической деформации.





Рисунок 3.1 – Распределение поля эквивалентной пластической деформации

Для того чтобы увидеть целую модель сборки воспользуемся *View=>ODB Display Options=>Mirror/Pattern=>Mirror planes*.

Чтобы оценить адекватность модели необходимо произвести сравнение математической модели с реальным процессом. Воспользуемся физическим моделированием процесса мягкого обжатия на стадии неполной кристаллизации. Моделирование обжатия сляба с жидкой сердцевиной осуществлено на модели, выполненной из сплава Вуда и тарированных сферических элементов (дроби) из свинца, и представляющей замкнутую оболочку. Замкнутая оболочка позволяет создавать различное внутреннее давление, имитирующее ферростатическое, и моделировать деформирование сляба на различных стадиях разливки.

Деформирование модельных образцов осуществили на кафедре ОМД Липецкого государственного технического университета на лабораторном стане 250. Суммарное обжатие за 2 прохода образцов составило 3 мм (за первый проход 2 мм и за второй проход 1 мм).

После деформирования выполнили разрез образцов поперек направления прокатки. Первичный визуальный осмотр сечений показал, что основная деформация зерен произошла вдоль узких граней, в то время как вдоль широкой они остались недеформированными. Характерное сечение представлено на рис.





б)

Рис. 3.2 - Образец после деформирования с 16 мм на 13 мм а) - внешний вид поперечного сечения; б) - форма дроби, извлеченной из образца

3.2,а, где срез зерен по узкой грани имеет вид эллипса, а по широкой – окружности.

Так как свинцовая дробь, расположенная вдоль широкой и узкой грани, в процессе деформирования по-разному изменила первоначальную форму, то для дальнейшего исследования были выбраны фрагменты, в которых форма дроби представляла наибольший интерес для изучения деформированного состояния образцов после обжатия. Перед извлечением положение зерен исследуемого фрагмента фотографировали с использованием координатной сетки, модельный образец локально нагревали, и у высвобожденного зерна измеряли главные



диагонали эллипсоида – ℓ_1 , ℓ_2 , ℓ_3 (рис. 3.2,б). В окрестности рассматриваемого зерна значения главных деформаций находятся как

$$\varepsilon_1 = \frac{\ell_1 - d}{d}, \ \varepsilon_2 = \frac{\ell_2 - d}{d}, \ \varepsilon_3 = \frac{\ell_3 - d}{d}, \ (1)$$

где ε₁, ε₂, ε₃ – главные относительные деформации; *d* – исходный диаметр дроби. Далее по известным зависимостям можно определить другие характеристики деформированного состояния [2,3].

В ходе сравнения результатов физической и математической модели была определена максимальная погрешность, и она составила 6,17%. Для получения более достоверных данных необходима модель с другой структурой сетки, что недопустимо у студенческой версии. Математическая модель процесса мягкого обжатия на стадии неполной кристаллизации, разработанная в Abaqus Student Edition, адекватна физической модели и в дальнейшем может быть реализована в полной версии Abaqus применительно для стали уже с учетом жидкой фазы.

Список использованных источников

- 1. Мазур И. П., Барышев В. В., Седых М. О. Постановка задачи упругопластического деформирования непрерывного слитка с жидкой сердцевиной //Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – №. 1. – С. 29-32.
- 2. Тищук Л. И. и др. ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОСАДКЕ //Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. 2017. Т. 15. №. 3.
- 3. Мазур И. П., Смирнов Е. Н., Черкашина Т. И. Физическое моделирование деформирования сляба на стадии неполной кристаллизации. 2011



7. Анализ контактных напряжений от болтовых соединений

Авторы:	Арсланова Л.И. Султанов И.М.	
Организация:	УГНТУ, г. Уфа	

В рамках данной задачи производится моделирование двух прямоугольных пластин, между которыми находится прокладка. Они закреплены друг с другом болтом и гайкой. Пластины сделаны из латуни, прокладка из резины, а болты и гайки из стали.

Геометрическая модель

Откроем в списке Module модуль PART. Для создания детали нажимаем кнопку Create Part **b**. В появившемся окне Create Part дайте детали имя *Plate* и примем следующие установки: *3D* (трехмерное) *Deformable* (деформируемое) *Solid* (твердое) тело с особенностью типа *Extrusion* (вытеснение). В текстовом поле *Approximate size* наберите 20 (Рисунок 2.1). Подтвердим заданные свойства нажатием кнопки *Continue*.

Построение пластины







В рабочем появившемся поле. построим прямоугольник с **ДВУМЯ** Выбираем команду Create Lines: rectangle отверстиями. И строим прямоугольник с координатами (0.0) и (10, 2.5). Для построения отверстий воспользуемся командой ⁽¹⁾. Первое отверстие строим с координатами (2,5; 1,25) и второе (7,5; 1,25). Радиусы отверстий равны 0,25. В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки *Cancel*. Нажав кнопку *Done* перейдем к следующему шагу построения модели - в окне Edit Base Extrusion в поле *Depth* вводим толщину стенки пластины равной 0.5. Нажимаем ОК (Рисунок 2.2).

🖶 Edit Base Extrusion	<u> </u>		
End Condition Type: Blind Depth: 0.5		0	
Options Note: Twist and draft cannot	be specified together.		
📄 Include twist, pitch: 0	(Dist/Rev)		\circ
Include draft, angle: 0	(Degrees)		
ОК	Cancel		

Рисунок 2.2 – Трехмерная модель пластины

Далее вас ждет разделение пластины на сечения с использованием базовых плоскостей. В панели меню выберите **Tools**→**Datum** (Рисунок 2.3)



Рисунок 2.3 – Панель меню



Появляется окно Create Datum, в котором выбираем тип *Plane* и метод *Offset from plane* и выделяем боковую грань пластины (Рисунок 2.4)



Рисунок 2.4 – Боковая плоскость пластины

Далее выбираем в панели инструкций Enter Value, вводим значение 1.9, нажимаем Enter (Рисунок 2.5).





Аналогично создаем 5 таких плоскостей со значениями в панели инструкций 2.5, 3.1, 6.9, 7.5, 8.1 (Рисунок 2.6)





Рисунок 2.6 – Создание вертикальных базовых поверхностей

Затем в панели меню снова выбираем **Tools→Datum**, для создания базовой поверхности, но уже выделяя нижнюю грань плиты. В области запроса вводим значение 1.25 (Рисунок 2.7)



Рисунок 2.7 – Создание горизонтальной базовой поверхности

Далее разделяем пластину с использованием базовых плоскостей, которые вы только что создали. Нажимаем **Tools**→**Partition**. В появившемся окне **Create Partition** выбираем *Cell* и *Use datum plane* (Рисунок 2.8)





Рисунок 2.8 - Окно Create Partition

Выделяем базовую поверхность в графической части и нажимаем Create **Partition** (Рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Создание сечений на пластине

Повторите эту процедуру для всех вертикальных базовых плоскостей, который вы создали. Обратите внимание, что после того, как плита была секционирована, вы должны сначала выделить ячейку или ячейки, которая вам нужна (Рисунок 2.10)



Рисунок 2.10 – Трехмерная модель пластины



Построение прокладки

Построение прокладки производится аналогично построению пластины, за исключением толщины стенки, которая имеет значение 0.125 и имя Thin (Рисунок 2.11 (а)). И создайте поверхность (surface), дважды щёлкнув по **Thin => Surfaces**, и, назвав её Gasket (Рисунок 2.11 (б)).



Рисунок 2.11 (а) – Трехмерная модель прокладки



Рисунок 2.11 (б) – Создание поверхности Gasket

Построение болта

Для создания детали нажмем кнопку **Create Part L**. В появившемся окне **Create Part** дайте детали имя **Bolt** и примем следующие установки: **3D** (трехмерное) **Deformable** (деформируемое) **Solid** (твердое) тело с особенностью типа **Revolution** (вращение). В текстовом поле **Approximate size** наберите 3 (Рисунок 2.12). Подтвердим заданные свойства нажатием кнопки **Continue**.



lame: Bolt		
Modeling Sp	bace	
	D Planar	O Axisymmetric
Туре		Options
Oeforma	ble	
O Discrete	rigid	
Analytica	al rigid	None available
🔘 Eulerian		
Base Feature		
Shape	Туре	
Solid	Extrus	ion
Shell	Revol	ution
O Wire	Sweep)
O Point		
pproximate :	size: 3	

Рисунок 2.12 – Окно Create Part

Нажимаем *Continue* и при помощи инструментов строим болт (Рисунок 2.13) нажимаем *Done*.



Рисунок 2.13 – Эскиз болта

В появившемся диалоговом окне **Edit Feature** в строке параметров *Angle* вводим угол поворота 360 градусов и нажимаем *OK* (Рисунок 2.14)





Рисунок 2.14 – Часть болта после вращения

Далее построим набросок профиля, который будет вытеснен по всей высоте головки болта, чтобы дать ему шестиугольную форму. Среди компонентов модулей выбираем **Create Cut: Extrude** *Ф*. Выделяем поверхность головки болта, выбираем грань этой поверхности.

Используя инструменты «, ⁽⁾и вспомогательную прямую ⁽⁾ делаем эскиз шестиугольника. При помощи ⁽⁾ создаем угол между вспомогательными прямыми равным 60 градусов (Рисунок 2.15), при этом радиус внешней окружности может быть выбран произвольно.



Рисунок 2.15 – Наброски профиля



Нажимаем *Done* и в появившемся диалоговом окне Edit Cut Extrusion выбираем *Through All type*. Стрелка в графической части должна быть направлена вниз, можно переключить её направление при помощи стрелки в диалоговом

окне

▲ Extrude direction:
, затем нажимаем **ОК** (Рисунок 2.16)



Рисунок 2.16 – Трехмерная модель болта

Чтобы облегчить задание нагрузки болта в дальнейшем, создаем две базовые плоскости при помощи **Tools**→**Datum** в панели меню, как создавали для пластины, базовые плоскости должны быть определены на расстоянии 0,8 и 0,925 от внешней поверхности головки болта (Рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 - Создание базовых поверхностей

Теперь, чтобы создать сечение, выберите **Tools**→**Partition** из панели меню. Далее проделываем шаги, аналогично шагам по созданию сечений пластины (Рисунок 2.18)





Рисунок 2.18 – Создание сечений болта Теперь следует разделить болт на 2 части – головку и стержень при помощи Tools→Partition, в появившемся окне Create Partition выбираем *Cell* и *Define cutting plane*. В графической части выделяем верхнюю часть болта и в панели инструкций выбираем по 3 точкам (*3 Points*) (Рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Создание сечений болта

Далее в графической части выбираем 3 точки на гранях головки болта (Рисунок 2.20).





Рисунок 2.20 – Создание сечений болта

Теперь следует разделить болт на 6 сечений при помощи **Tools**→**Partition**, в появившемся окне **Create Partition** выбираем *Cell* и *Define cutting plane*. В графической части выделяем весь болт и в панели инструкций выбираем по 3 точкам (*3 Points*). Далее в графической части выбираем 3 точки на гранях головки болта (Рисунок 2.21).



Рисунок 2.21 – Создание сечений на головке болта Повторяем данную операцию и с другими гранями болта (Рисунок 2.22).





Рисунок 2.22 – Модель болта

Построение гайки

Откроем в списке Module модуль PART. Для создания детали нажимаем кнопку Create Part ¹. В появившемся окне Create Part дайте детали имя *Nut* и примем следующие установки: *3D* (трехмерное) *Deformable* (деформируемое) *Solid* (твердое) тело с особенностью типа *Extrusion* (вытеснение). В текстовом поле *Approximate size* наберите 2 (Рисунок 2.23). Подтвердим заданные свойства нажатием кнопки *Continue*.



💠 Create Part		×
Name: Nut Modeling Spa 3D 2D	ace Planar	Axisymmetric
Type Deformab Discrete ri Analytical Eulerian	le gid rigid	Options None available
Base Feature Shape Solid Shell Wire Point	Type Extrus Revolu Sweep	ion ution 2
Approximate si Continue	ze: 2	Cancel



При помощи панели инструментов строим гайку (Размеры приведены на рисунке 2.24).



Рисунок 2.24 – Эскиз гайки

Нажимаем *Done*, в появившемся окне Edit Base Extrusion в строке *Depth* вводим значение 0.325 и нажимаем *OK* (Рисунок 2.25).





Рисунок 2.25 – Трехмерная модель гайки

Далее делим гайку на сечения при помощи **Tools**→**Partition.** В появившемся окне Create **Partition** выбираем *Cell* и *Define cutting plane*. Аналогично делению головки болта на сечения по 3 точкам (Рисунок 2.26).



Рисунок 2.26 – Сечения гайки

Модуль материала

Далее задаем материал для каждой детали. Плита из латуни, гайка и болт из стали, а прокладка из резины. Открываем в списке Module модуль Property. Нажимаем Material Create \mathcal{D}_{ϵ} , в появившемся окне Edit Material задаем наименование материала *Brass*. Далее в строке меню материального редактора выбираем *Mechanical*—*Elasticity*—*Elastic*. Далее вводим модуль Юнга и коэффициент Пуассона в соответствующих областях (Рисунок 2.27).



Elastic Elasticity Elastic Elastic	Vouna's	Poisson's	
Hyperelastic	Modulus	Ratio	
Type: Iso Damage for Ductile Metals Hyperfoam ptions 1 Use ter Damage for Traction Separation Laws Low Density Foam 1	14935000	0.3	

Рисунок 2.27 – Материальный редактор – данные для латуни.

В строке меню материального редактора выбираем *Mechanical*→ *Plasticity*→ *Plastic*. И введем пластические свойства для латуни (Рисунок 2.28) И нажимаем ОК.

						Data		
<u>G</u> eneral	<u>Mechanical</u> <u>Thermal</u> <u>Electrical/Magne</u>	tic	<u>O</u> ther	<u></u>			Yield	Plastic
Floor Co.	<u>E</u> lasticity	•					Stress	Strain
Elastic	<u>P</u> lasticity	Þ	<u>P</u> lastic			1	28000	0
Type: Iso	Damage for D <u>u</u> ctile Metals	•	<u>C</u> ap Plasticity			2	30000	0.1
🔲 Use ter	Damage for Traction Separation Laws	►	Cast Iron Plasticity					

Рисунок 2.28 – Материальный редактор – данные для латуни.

Далее задаем свойства материала для стали и задаем наименование материала *Steel*. Далее в строке меню материального редактора выбираем *Mechanical*→*Elasticity*→*Elastic* и вводим модуль Юнга и коэффициент Пуассона в соответствующих областях (Рисунок 2.29).

Da	lo tension		
	Young's Modulus	Poisson's Ratio	
1	3000000	0.3	

Рисунок 2.29 – Материальный редактор – данные для стали.

В строке меню материального редактора выбираем Mechanical→ Plasticity→ Plastic. Вводим пластические свойства для латуни (Рисунок 2.30).

	Yield	Plastic
	Stress	Strain
1	52000	0
2	65000	0.1

Рисунок 2.30 – Материальный редактор – данные для стали.



Задаем свойства материала для резины с наименованием *Rubber*. Далее в строке меню материального редактора выбираем Mechanical \rightarrow Elasticity \rightarrow Hyperelastic. Выбираем *Mooney-Rivlin* как энергетический потенциал напряжения и *Coefficients* как входной источник и вводим данные (Рисунок 2.31)



Рисунок 2.31- Материальный редактор – данные для резины

Теперь нужно определить и назначить секции. Секция пластины будет относиться к материалу латунь, секция прокладки будет относиться к резиновому материалу, а секция болта и гайки будет относиться к стальному материалу. В панели компонентов модулей выберите **Create Section D**. В появившемся диалоговом окне *Create Section* называем сечение *Plate Section*, и выбираем *Solid* и *Homogenous* и нажмите *Continue*. В появившемся окне **Edit Section** выберите материал *Brass* и нажмите *OK*. Аналогично выполняем и для других материалов.

Дважды щелкните на **Plate** в дереве конструирования. На панели компонентов модулей выберите **Assign Section** ²¹, затем в графической части выделите всю плиту как область, которой назначат секцию и нажмите **Done**. В появившемся окне **Edit Section Assignment** выберите **Plate Section** и нажмите **OK** (Рисунок 2.32)

Sectio	n: Plate Section	n 🔻 🏝
Note:	List contains o applicable to t	only sections the selected regions.
Type: Mater	Solid, Hom ial: brass	ogeneous
	ОК	Cancel

Рисунок 2.32 – Окно Edit Section Assignment



Те же самые действия выполняем и для других деталей. Для секции болта задайте наименование *Bolt Section*, для гайки *Nut Section*, а для прокладки *Gasket Section*.

Сборка

Перейдем к модулю Assembly и нажмите Create Instance III, в появившемся окне Create Instance активируем строку Auto-offset from other *instances*, чтобы детали не накладывались друг на друга и выберем *Plate*. Нажмите *OK*. В графической части появится пластина. Аналогичную операцию проведем для всех деталей, т.е. получаем 2 плиты, 1 прокладку, 2 болта и 2 гайки (Рисунок 2.33)

Cre	ate Instance
Creat	te instances from:
۲	Parts 🔘 Models
Part	ts
Bolt	:
Gas	ket
Nut	
Plat	e
Inst	ance Type
A m the i	eshed part has been selected, so nstance type will be Dependent.
Note	 To change a Dependent instance's mesh, you must edit its part's mesh.
🗸 Au	to-offset from other instances
	OK Apply Cancel

Рисунок 2.33 – Окно Create Instance

Используем команду **Translate Instance** В панели инструментов. Далее в графической части выделяем всю прокладку и нажимаем *Done*. Перемещаем прокладку к плите, выбрав сначала точку на прокладке, а затем точку на пластине (Рисунок 2.34). Проделаем операцию с другой плитой, чтобы прокладка была между 2 плитами.





Рисунок 2.34 – Использование команды Translate Instance

Чтобы выровнять болт с болтовым отверстием, используем **Create Constraint: Parallel face** и удерживаем пока не появятся другие комплекты инструментов и выберите **Create Constraint: Coaxial .** Далее выбираем цилиндрическую поверхность болта (Рисунок 2.35)



Рисунок 2.35 – Выбор поверхности болта

Затем выбираем поверхность в отверстии плиты и нажимаем ОК (Рисунок 2.36).





Рисунок 2.36 – Выбор поверхности отверстия

Чтобы одеть болт до конца используем команду Create Constraint: Parallel face *и* удерживаем пока не появятся другие комплекты инструментов и выбираем Create Constraint: Face to face *и*, затем выделяем поверхность на головке болта (для удобства возможно использование Remove Selected *м* чтобы скрыть части деталей) (Рисунок 2.37).



Рисунок 2.37 – Выбор поверхности головки болта

Затем выбираем плоскость на плите (Рисунок 2.38). Необходимо удостовериться, что стрелки направлены в одну сторону, при надобности, чтобы переключить направление стрелки используйте *Flip* в панели инструкций.





Рисунок 2.37 – Выбор плоскости на плите

Затем нажимаем *OK*, вводим значение 0,0 в панели инструкций. Далее так же надеваем болт во второе отверстие. Так же на болты надеваем гайки, используя инструменты **Translate Instance** и **Create Constraint: Face to face** (Рисунок 2.38).



Рисунок 2.38 – Окончательная сборка

Чтобы облегчить применение граничных условий позже в дереве конструирования раскрываем **Assembly** и дважды щелкаем на **Sets** в диалоговом окне называем основание набора *Bottom* и нажимаем *Continue*.



Определение процедуры анализа

Далее создаем общий, статический шаг: Открываем модуль Step. Нажимаем команду Create Step •••••. В появившемся диалоговом окне Create Step задаем наименование *Bolt Load*, выбираем тип *General* и *Static*, *General* и нажимаем *Continue*.

Далее появляется диалоговое окно Edit Step включите *On*. В этом же диалоговом окне нажмите на вкладку **Incrementation** и изменяем начальный размер приращения на 0.25 *OK* (Рисунок 2.39).

🜩 Edit Step	🜩 Edit Step
Name: BoltLoad Type: Static, General Basic Incrementation Obscription:	Name: BoltLoad Type: Static, General Basic Incrementation Other Type: Automatic Fixed Maximum number of increments: 100 Initial Minimum Maximum Increment size: 0.25 1E-005 1

Рисунок 2.3 – Окно Edit Step

Контактные взаимодействия

Затем, определяем свойства взаимодействия. В списке модуля выбираем Interaction. Затем на панели компонентов модулей выбираем Create Interaction Property **E**. В появившемся окне Create Interaction Property назовем взаимодействие *Friction1*, выберем тип *Contact* и нажмем *Continue*.

В появившемся диалоговом окне Edit Contact Property выбираем Mechanical—Tangential Behavior. В строке *Friction formulation* выбираем *Penalty* и вводим коэффициента трения 0.1 (Рисунок 2.40).



Tangential Behavior		
Friction formulation:	Penalty	
Friction Shear St	ress Elastic Slip	
Directionality: 🔘 I	sotropic 🔘 Anisotropic (Standa	ard on
🔲 Use slip-rate-dep	pendent data	
Use contact-pres	ssure-dependent data	
🔲 Use temperature	e-dependent data	
Number of field up	riabler: 0 🛎	

Рисунок 2.40 – Окно Edit Contact Property

Далее выбираем Mechanical \rightarrow Normal Behavior. В строке Constraint enforcement method выбираем Penalty (Standart) и нажимаем *OK* (Рисунок 2.41).

Normal Behavior	
Pressure-Overclosure:	"Hard" Contact
Constraint enforcement method	d: Penalty (Standard)
Allow separation after contact	ct
Contact Stiffness	
Behavior: 🖲 Linear 🔘 Nonli	near
Stiffness value: 🔘 Use default	t
Specify:	
Stiffness scale factor:	1

Рисунок 2.41 – Окно Edit Contact Property

Повторяем шаги, задав наименование взаимодействия *Friction 2* с коэффициентом трения 0.4. В главной строке меню выбираем **Create Interaction**. В появившемся окне называем *Contact*, выбираем шаг *Initial* и *General contact* (*Standard*) и нажимаем *Continue* (Рисунок 2.42).



Create Interaction				
Name: Contact				
Step: Initial				
Procedure:				
Types for Selected Step				
General contact (Standard)				
Surface-to-surface contact (Standard)				
Self-contact (Standard)				
Fluid cavity				
Fluid exchange				
XFEM crack growth				
Cyclic symmetry (Standard)				
Elastic foundation				
Actuator/sensor				
Continue Cancel				

Рисунок 2.42 – Окно Create Interaction

В диалоговом окне Edit Interaction выбираем Friction1 как Global property

assignment, затем нажимаем Individual property assignments 🥓 (Рисунок 2.43).

Action C As									
Contact Properties	Surface Properties	Contact Formulati	: on						
Global prop	erty assignme	ent: Frictio	n-1	• =					
Individual p	Individual property assignments: None 🧭								
Initialization	Initialization assignments: None 🥓 👔								
Stabilization	assignments	: None 🦕	∕ ĝâ						
	ОК		Canc	el					
	_	_	_	_					

Рисунок 2.43 – Окно Edit Interaction

В диалоговом окне Edit Individual Contact Property Assignments выбираем (Global), как First Surface. Gasket как Second Surface и Friction-2 как Second Surface. Щелкните и затем нажимаем OK (Рисунок 2.43). Нажимаем OK в диалоговом окне Edit Interaction.



First Surface	Second Surface	Property Assigned
(Global)	gasket	Friction-2

Рисунок 2.43 – Окно Edit Individual Contact Property Assignments

Теперь применяем ограничения, которые скрепляют болт и гайку. На панели компонентов модулей выбираем Find Contact Pairs \checkmark . В появившемся диалоговом окне Find Contact Pairs в строке *Include pairs within separation tolerance* вводим значение 0.1, затем нажимаем на *Find Contact Pairs* (Рисунок 2.44).

	X								
Search Options Names Entities Rules Advanced									
Search domain: Whole model									
Include pairs within separation tolerance: 0.1									
Extend each surface found by angle: 20									
Include pairs with surfaces on the same instance									
Contact Pairs (0 new candidates)	Contact Pairs (0 new candidates)								
Show previously created interactions and ties	_								
Name filter: 👘 🤌 🕇 🧇 🚧 🛱									
Name Separation Type Sliding Discretization F	Name Separation Type Sliding Discretization Pro								
<	Þ.								
✓ Highlight in viewport: Selected pairs									
Master 📕 Slave 📕 Search domain 🛄									
	_								

Рисунок 2.44 – Окно Find Contact Pairs



Из списка контактных пар удаляем все пары, кроме *Bolt-1-Nut-1* и *Bolt-2-Nut-2*. В колонке **Туре** изменяем содержание этих двух клеток от **Interaction** на **Tie**. Нажимаем *OK* (Рисунок 2.45)

CP-15-Bolt-2-Nut-2 0.002095 Tie Surf-Surf CP-14-Bolt-1-Nut-1 0.002095 Interactive Finite Surf-Surf Fricti	P-15-Bolt-2-Nut-2 0.002095 Tie Surf-Surf P-14-Bolt-1-Nut-1 0.002095 Interactive Finite Surf-Surf Friction	Name	∇	Separation	Туре	Sliding	Discretization	Prope
CP-14-Bolt-1-Nut-1 0.002095 Interactive Finite Surf-Surf Ericti	P-14-Bolt-1-Nut-1 0.002095 Interactive Finite Surf-Surf Frictio	CP-15-Bolt-2-Nut-2		0.002095	Tie		Surf-Surf	
	Interaction	CP-14-Bolt-1-Nut-1		0.002095	Interacti	Finite	Surf-Surf	Frictio

Рисунок 2.45 – Список контактных пар

Нагрузки и граничные условия

Применяем необходимые граничные условия для сборки. В списке модулей выбираем Load. В панели инструментов нажимаем команду Create Boundary Condition. В появившемся диалоговом окне Create Boundary Condition вводим наименование *FixBase*. Выбираем тип *Initial*, в котором будет активировано граничное условие. В списке *Category* принимаем *Mechanical*. В *Types for Selected Step* выбираем *Symmetry/Antisymmetry/Encastre* (Рисунок 2.46). Нажимаем Continue.



Рисунок 2.46 – Окно Create Boundary


В панели инструкций нажимаем на *Done* и в графической области выделяем основание болта. В появившемся диалоговом окне Edit Boundary Condition включаем *ENCASTRE*, затем нажмите *OK* (Рисунок 2.47).

() () () () () () () () () ()	🖶 Edit Boundary Condition	
	Name: Fix Base Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre Step: Initial Region: Set-3 CSYS: (Global) XSYMM (U1 = UR2 = UR3 = 0) YSYMM (U2 = UR1 = UR3 = 0) ZSYMM (U3 = UR1 = UR2 = 0) XASYMM (U1 = U3 = UR1 = 0; Abaqus/Standard only) YASYMM (U1 = U2 = U3 = 0; Abaqus/Standard only) PINNED (U1 = U2 = U3 = 0; Abaqus/Standard only) ENCASTRE (U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0) CK Cancel	

Рисунок 2.47 – Окно Edit Boundary

Применяем нагрузку к болту: В панели инструментов выбираем **Create Load.** Затем в диалоговом окне **Create Load** введем в поле наименования *BoltLoad1.* За шаг выбираем *BoltLoad*, в котором будет активирована данная нагрузка. В списке *Category* принимаем *Mechanical.* В *Types for Selected Step* выбираем *Bolt load* и Нажимаем *Continue* (Рисунок 2.48).



Рисунок 2.48 – Окно Create Load



Далее нужно выбрать сечение болта как показано на рисунке 2.49 (для удобства используйте **Remove Selected** ⁽¹⁾ чтобы скрыть детали и одно из сечений болта). Нажимаем на *Surfaces* в панели инструкций, затем выбираем любой цвет.



Рисунок 2.49 – Выбор сечения для приложения внутренней нагрузки болта

В графической области выбираем ось вдоль *Bolt1* и в появившемся диалоговом окне Edit Load вводим величину 270 и нажимаем *OK* (Рисунок 2.50). Повторяем процедуру для второго болта, назвав *BoltLoad2*, выберите *Bolt2*.



Рисунок 2.50 – Окно Edit Load



Конечно-элементная модель

В списке модулей выбираем **Mesh.** На панели состояния выбираем **Part** вместо **Assembly** и деталь **Plate** (Рисунок 2.51)





В панели компонентов модулей выбираем Seed Part is в появившемся диалоговом окне Global Seeds в строке *approximate global size* вводим значение равным 2 и нажимаем Apply и *OK* (Рисунок 2.52). В панели компонентов модулей выбираем Mesh Part is и нажимаем Yes на панели инструкций. Аналогично строим конечно-элементную модель для Thin и Nut.



Рисунок 2.52 – Конечная сетка элементов пластины

Для построения конечно-элементной модели болта зайдите в меню Mesh => Controls, выберите всю деталь. Затем во вкладке Element Shape выберите Hexdominated и тип Sweep. Нажмите OK. С помощью инструмента Mesh Part завершите процесс построения сетки.

Запуск на расчет

Откроем в списке модулей **Job.** В панели компонентов модулей выбираем **Job Manager** . В появившемся окне **Job Manager** нажимаем *Create*. В следующем диалоговом окне меняем наименование на *BoltTightening* и



нажимаем *Continue*. В следующем появившемся окне Edit Job нажимаем *OK*. Далее в окне Edit Job нажимаем *Submit* (Рисунок 2.53)

1	🔷 Job Manager				
	Name	Model	Туре	Status	Write Input
	BoltTightening	Model-1	Full Analysis	None	Data Check
					Submit
					Continue
					Monitor
					Results
					Kill
	Create	Edit Copy	Rename	Delete	Dismiss

Рисунок 2.53 – Статус работы в менеджере Јов

Анализ полученных результатов

После окончания расчета нажимаем *Results* и автоматически переходим в модуль *Visualization*. Нажимаем на *Plot Contours on Deformed Shape* (Рисунок 2.54 – 2.56).



Рисунок 2.54 – Распределение напряжений на пластинах

В результате максимальные напряжения на пластинах и на прокладке наблюдаются в отверстиях под болты. А максимальные напряжения на болтах наблюдаются вот втором сечении.





Рисунок 2.56 – Распределение напряжений на прокладке



Рисунок 2.55 – Распределение напряжений на болтах



8. Моделирование напряженно-деформированного состояния стального диска

Автор: Самигуллина Л.Г.

Организация: НМСУ "Горный"

В рамках данной задачи производится нахождение поля механических напряжений, возникающих при контактной деформации круглой стальной пластины. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема задачи.



Рисунок 1.1 – Постановка задачи

Перемещение инструмента составляет от 0.001 до 0.1 мм.

Граничные условия:

1. Пластина закреплена по контуру с возможностью угловых перемещений.

2. Инструменту запрещены перемещения вдоль осей Х и Ү.

Свойства материалов указаны в таблице 1.1.



	Молуль		Пластически	е свойства
	упругости, МПа	Коэф. Пуассона	Напряжение, МПа	Пластическая деформация
			200	0
			446.8	0.2
			503.8	0.4
			543.1669	0.6
Сталь Ст3 213 000			574.0994	0.8
			600	1
			622.4	1.2
	0.3	642.4	1.4	
	215 000	0.5	660.6	1.6
			677.1	1.8
			692.5	2
			706.7	2.2
			720.1	2.4
			732.8	2.6
			744.8	2.8
			756.2	3

Таблица 1.1 – Параметры материалов

Система координат модели и система единиц измерения

Построение расчетной модели и обработка результатов производится в декартовой системе координат. При моделировании принята система измерений, представленная в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – С	Система единиц	измерения
-----------------	----------------	-----------

Длина	Давление	Macca	Время	Температура	Плотность
mm	МРа	kg	S	°C	$kg \backslash mm^3$





б)

Рисунок 2.1 – Построение эскиза: а) диск; б) инструмент

Геометрическая модель

В дереве модели создадим 2 детали: Blank (диск) и Punch (инструмент). Для создания детали Blank установки следующие: *Axisymmetric*, *Deformable*, *Shell*. Осесимметричность используется в модели для возможности использования более плотной сетки и получения более достоверного решения. Для создания детали Punch используем установки: *Axisymmetric*, *Discrete rigid*, *Wire*. Инструмент моделируется как абсолютно жесткое тело, так как в рамках решаемой задачи распределение напряжений в инструменте нас не интересует. При помощи команды *Tools=>Reference Point* устанавливаем RP в центре окружности, как показано на рис. 2.1.



Модель материала

Для выполнения задачи необходимо задать значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, а также пластичные свойства материала пластины.

Создадим материал с необходимыми свойством в дереве модели. В окне *Edit Material* зададим имя BlankSteel. В меню редактора выберем *Mechanical=>Elasticity=>Elastic* и введем значение E=213000 MPa, μ =0.3. Для введения возможности пластического деформирования материала заполним *Mechanical=>Plasticity=>Plastic* значениями, представленными в таблице 1.1.

Теперь перейдём к определению сечения. Открываем диалоговое окно *Create Section* (вызов возможен либо из дерева модели, либо через иконку **1**). В диалоговом окне *Create Section* присвоим сечению диска имя BlankSection. Выберем в соответствующих списках *Solid, Homogoneous* и щелкнем *Continue*. В появившемся окне редактора сечений *Edit Section*, в качестве материала необходимо указать созданный ранее материал Blank Steel.

Следующим шагом присвоим построенное сечение ранее созданной детали. Для этого используем иконку **За** *Assign Section* в текущей панели инструментов (либо дважды щелкаем по элементу в дереве модели, либо используем команды меню: *Assign=>Section*).

Сборка

Перейдём к модулю *Assembly*. Для создания сборочной единицы необходимо нажать на иконку *Create Part Instance* (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу *stances*, либо воспользоваться командами: меню *Instance=>Create*). Появится окно со списком созданных деталей *Parts*. Выберем обе детали, поставив галочку напротив пункта «Auto-offset from other instances».

Для того чтобы переместить инструмент в правильное положение по отношению к диску, необходимо применить операцию *Translate Instance* (иконка в модуле *Assembly*). В ней необходимо выбрать сферическую часть



инструмента в качестве передвигаемой области, а затем последовательно указать нижнюю точку сферической части инструмента и угол диска.

Итоговая модель сборки представлена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Создание экземпляра сборки

Определение процедуры анализа

В контейнере *Step* создадим новый шаг анализа – Analysis типа *Static, General*. В появившемся окне *Edit Step*, включим функцию нелинейной геометрии: *Nlgeom=>On*, все остальные настройки решателя остаются без изменений.

Контактные взаимодействия

Зададим контактное взаимодействие пластины и инструмента. Для этого в окне *Create Interaction* (модуль *Interaction*) выберем тип *Surface-to-Surface*. В качестве главной поверхности выберем сферическую поверхность инструмента, а в качестве подчиненной – верхнюю поверхность диска.



<u>Interaction</u>	C <u>o</u> nstraint	Co <u>n</u> nector	Specia <u>l</u>	Feat <u>u</u> re	<u>T</u> ools	💠 Edit I	Interaction						23
			l ⊕	C 9	ि 🔁	Name:	Int-1						
					: 🕐	Туре:	Surface-to-s	urface cor	ntact (Standa	ard)			
Module:	Interaction	- Mode	l: 🗎 AxiSv	m Contac	t 🗕 S	Step:	Initial						
	4			-		🔰 Mas	ter surface:	(Picked)					
						👂 Slav	e surface:	(Picked)	•••				
률 📰						Sliding	formulation:	Finite	sliding 🔘 S	Small sliding			
-4 📰	VRP					Discretiz	zation metho	d: Surfac	e to surface	-			
1 -3	:					E 6	xclude shell/	membran	e element th	ickness			
× 6°						Deg	ree of smoot	hing for m	naster surfac	e: 0.2			
1						Use	supplementa	ary contac	t points: 🔘	Selectively	🔿 Never 🔘 A	lways	
1						Con	tact tracking	: 🖲 Two	configuratio	ons (path) 🔘	Single configu	uration (s	state)
1 14						Slave A	Adjustment	Surface	Smoothing	Clearance	Bonding		
÷ *						No	adjustment						
-						🛛 🔘 Adj	ust only to re	move ove	erclosure		_		
RР Х						Spe 🔘	cify tolerance	e for adjus	stment zone:	0	-		
+ /						🔘 Adj	ust slave nod	les in set:		-	r		
· · ·	z												
(XYZ)	T P							Γ					
을 其		Y				Contact	interaction p	property:	IntProp-1				Ŧ
		↓×				Options	Interferen	ce Fit		_			
						Contact	controls: (D	efault)		•			
						√ Activ	/e in this step)					
🗲 🗙 Fi	ll out the Edit i	Interaction di	alog				0	К			Cancel		

Рисунок 2.3 – Создание контактного взаимодействия

После этого необходимо создать свойства контакта Interaction Property типа Contact. В появившемся окне Edit Interaction Property необходимо задать следующие свойства: Mechanical=>Tangential Behavior=>Penalty и Friction Coeff=>0.2.



		Y
Edit Cont	tact Property	~
Name: IntP	Prop-1	
Contact Pr	Property Options	
Tangential	al Behavior	
Mechanic	cal <u>T</u> hermal <u>E</u> lectrical	
T (1)		
Tangential	al Behavior	
Friction fo	ormulation: Penalty	
Friction	Shear Stress Elastic Slip	
Direction	nality: 🔘 Isotropic 🔘 Anisotropic (Standard only)	
🔲 Use sli	lip-rate-dependent data	
🔲 Use co	contact-pressure-dependent data	
📃 Use te	emperature-dependent data	
Number	of field variables: 0	
Frictio	ion	
Coef	ff	
0.2	<u>′</u>	

Рисунок 2.4 – Определение свойств контактного взаимодействия

Нагрузки и граничные условия

В модуле *Load* необходимо задать граничные условия, действующие на модель. В окне *Create Boundary Condition* создадим следующие граничные условия:

1. «BlankFix» типа *Displacement, Rotation*, задающее отсутствие перемещений боковой грани диска на шаге анализа Analysis. Необходимо выбрать область, указанную на рис. 2.5, далее указать U1=0, U2=0, UR3=0.





Рисунок 2.5 – Иллюстрация к созданию граничного условия «BlankFix»

2. «PunchDispl» типа *Displacement, Rotation*, задающий перемещение на шаге анализа Analysis. Необходимо выбрать область, указанную на рис. 2.6 (RP детали Punch), далее указать U1=0, U2=-1, UR3=0.

🔶 Edit Boun	dary Condition	×
Name: Pun Type: Disp Step: Ana Region: (Pic	ichDispl blacement/Rotation ilysis (Static, General) ked) 🔉	
CSYS: (Glo	obal) 🔓 🙏	
Distribution:	Uniform	f(x)
V 1:	0	
V 2:	-0.1	
🔽 UR3:	0	radians
Amplitude:	(Ramp)	P P
Note: The d main	lisplacement value will b tained in subsequent ste	e eps.

Рисунок 2.6 – Иллюстрация к созданию граничного условия «PunchDispl»



Конечно-элементная модель

Следующим шагом было создание конечно-элементной сетки деталей в модуле *Mesh*. В рамках студенческой версии программного продукта, учитывая ограничение в 1000 элементов, для детали Blank была предложена сетка, состоящая из 855 элементов.

Для создания сетки используем операцию *Seed=>Edges* и выбрав боковые грани диска, устанавливаем значения, как это показано на рис. 2.7. Для верхней и нижней граней значения представлены на рис. 2.8.



Рисунок 2.7 – Установка узлов сетки на боковых гранях диска



Рисунок 2.8 – Установка узлов сетки на верхней и нижней гранях диска



Используя операцию *Mesh=>Part* получим конечно-элементную модель, представленную на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Создание конечно-элементной модели детали Blank

Для создания сетки элемента Punch используем операцию *Seed=>Edges* и устанавливаем значения, как это показано на рис. 2.10.

Method Bias By size None Single Double By number	
Sizing Controls	
Bias ratio (>=1): 5	
Flip bias: Flip	
Set Creation	

Рисунок 2.10 – Установка узлов сетки детали Punch

Для создания сетки используем, как и в случае с диском, *Mesh=>Part*.

Запуск на расчет

Перейдем в модуль *Job*. С помощью иконки *Create Job* (либо команд меню *Job=>Create*, или дважды кликнув по элементу в дереве модели) создадим задание на расчёт. В появившемся окне *Create Job*, присвоим заданию имя *Contact*.

Задание на расчёт сформировано. Запустим расчет, вызвав *JobManager*=>*Submit*. Надпись *Running* говорит о том, что расчет запустился.



Анализ полученных результатов

На рисунке 3.1 и 3.2 представлены распределения полей механических напряжений и перемещений модели.







Рисунок 3.2 – Распределение поля пластических деформаций

Для визуализации напряжений и деформаций в развертке можно использовать команду *ODB Display Options* (**P**)=>*Sweep/Extrude*, далее заполнить поля, как показано на рис. 3.3.



ODB Display Options
General Entity Display Constraints Sweep/Extrude Mirror/Pattern
General Sweep
Sweep elements
Sweep from: 0 To: 180
Number of segments: 50 🚔 Angle: 3.6
Sweep analytical rigid surfaces
Sweep from: 0 To: 180
Number of segments: 50 🚔 Angle: 3.6
Extrude
Note: No extrudable elements exist in the current model.



При значении угла поворота в 180°, получим распределение как на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Распределение поля напряжений по Мизесу в развертке

Если в созданной модели не вводить возможность пластического деформирования материала (пропустить пункт *Mechanical=>Plasticity=>Plastic* в окне *Edit Material* п. 2.3), напряжения в диске будут значительно больше несущей способности, что не соответствует действительности.





Рисунок 3.5 – Распределение поля напряжений по Мизесу в упругой модели

Таким образом, при моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) необходимо учитывать как упругие, так и пластические свойства задаваемых материалов. Это позволяет получить картину, соответствующую реальным распределениям напряжения.

Созданная модель позволяет оценивать НДС в условиях контактного взаимодействия.