

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

**В. Р. Каргин, Ф. В. Гречников, А. Г. Шляпугин**

### **Моделирование процессов ОМД**

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка современного программного обеспечения для комплексного моделирования процессов, включая литье, раскатку, термическую обработку деталей двигателей ЛА»  
Соглашение № 2/14 от 03.06.2013 г.

САМАРА  
2013

УДК 621.77  
К 218

Авторы: **Каргин Владимир Родионович**  
**Гречников Федор Васильевич**  
**Шляпугин Алексей Геннадьевич**

Редакторская обработка В. Р. Каргин  
Компьютерная верстка И. Р. Сулейманова  
Доверстка И. Р. Сулейманова

**Каргин, В.Р.** Моделирование процессов ОМД [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. Р. Каргин, Ф. В. Гречников, А. Г. Шляпугин; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. и граф. дан. (38,3 Мбайт). - Самара, 2013. -1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены краткие теоретические сведения об основных технологических процессах обработки металлов давлением. Приведены основные положения по использованию современного программного комплекса *DEFORM*, направленным на проведение конечно-элементного анализа различных технологических процессов металлообработки. Показана последовательность действий, выполняемых при компьютерном моделировании процессовковки и горячей объемной штамповки, волочения и прессования, холодной листовой штамповки и прокатки: создание задачи, построение математических моделей заготовки и инструмента, их разбиение конечными элементами, задание граничных условий, свойств материала заготовки и инструмента, проведение и анализ результатов моделирования.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки 150400.62 «Металлургия» в 7 семестре, а также аспирантов и научных работников, занимающихся проблемами компьютерного моделирования процессов пластической деформации.

Разработано на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Программный комплекс DEFORM .....	8
1.1 Общие положения.....	8
1.2 Метод конечного элемента.....	12
1.3 Последовательность действий.....	15
1.4 Геометрическая модель объекта моделирования .....	18
1.5 Задание свойств материала.....	23
1.6 Граничные условия .....	33
1.7 Выбор параметров расчета .....	34
1.8 Анализ результатов моделирования .....	3
2 Ковка.....	5
2.1 Осадка поковок плоскими бойками .....	5
2.2 Осадка поковок на подкладном кольце.....	34
2.3 Протяжка .....	67
2.4 Раскатка .....	10
3 Листовая штамповка .....	40
3.1 Вытяжка осесимметричной детали .....	40
3.2 Гибка полосы П-образной формы.....	6
3.3 Раздача трубной заготовки .....	20
3.4 Вырубка и пробивка.....	32
4 Прессование.....	56
4.1 Прессование круглого профиля.....	56
4.2 Выбор метода прессования профилей.....	89
4.3 Проектирование конструкций матриц .....	109
4.4 Обоснование температурных режимов прессования .....	131
4.5 Прессование труб.....	154
4.6 Прессование профиля сложного поперечного сечения .....	178
5 Волочение .....	205

5.1 Волочение круглого сплошного профиля .....	205
5.2 Волочение круглой заготовки .....	231
5.3 Безоправочное волочение тонкостенных труб в блок волок .....	248
5.4 Изучение влияния величины угла рабочей зоны волокни на процесс волочения круглого сплошного изделия .....	272
6 Горячая объемная штамповка.....	291
6.1 Штамповка поковки "шестерня" .....	291
6.2 Влияние объема заготовки на качество заполнения ручья штампа при открытой штамповки .....	319
6.3 Штамповка в открытых и закрытых штампах.....	358
6.4 Проектирование технологии изготовления поковки на молотах .....	399
7 Листовая прокатка.....	416
7.1 Условия захвата заготовки валками.....	416
7.2 Холодная листовая прокатка .....	437
7.3 Уширение при прокатке .....	467
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	489
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	491
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	497
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	500
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	503
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	504
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	507
ПРИЛОЖЕНИЕ Е .....	508
ПРИЛОЖЕНИЕ И .....	509
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж .....	512
ПРИЛОЖЕНИЕ З.....	534

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование технологических процессов обработки металлов давлением на современном уровне предлагает решение целого ряда весьма сложных задач. Основная цель состоит в том, чтобы выявить закономерности процесса, существенные факторы и параметры, влияющие на его протекание, оценить их возможные воздействия на эксплуатационные свойства получаемых изделий. Полученные данные позволяют сформировать информационное поле конкретной технологии и, таким образом, иметь возможность управления, как процессом, так и свойствами изделий.

Компьютерное моделирование позволяет получить большой объем информации, провести всестороннее исследование процесса пластического деформирования, определить его особенности, рассмотреть и сопоставить большое количество альтернативных вариантов технологических процессов.

Большими возможностями в этом плане обладает компьютерная программа *DEFORM* – мощная система моделирования технологических процессов, предназначенная для анализа трехмерного (*DEFORM-3D*) и двухмерного (*DEFORM-2D*) поведения металла при различных процессах обработки давлением. *DEFORM* предоставляет важную информацию о течении материала в штампе и распределении температур во время процесса деформирования. *DEFORM* позволяет моделировать такие процессы как: ковка, горячая, и холодная штамповка, волочение, прессование, прокатка, вытяжка и многие другие процессы.

*DEFORM* использует последние достижения в области моделирования технологических процессов и основан на методе конечных элементов, одном из самых известных, надежных и применяемых в настоящее время расчетных методов. Мощный решатель модуля *DEFORM* способен анализировать сложные взаимодействия нескольких деформируемых объектов с различными свойствами при различных процессах обработки металлов давлением. Это позволяет точно и реалистично моделировать процессы деформирования

металла в условиях производства.

*DEFORM* применяется по всему миру, как на промышленных предприятиях, так и в научно-исследовательских институтах и технических университетах, является самым распространенным программным комплексом для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Преимущества *DEFORM*:

- универсальность – программа *DEFORM* позволяет моделировать широкий круг технологических процессов, применяемых на производстве;
- совместимость с большинством программных пакетов для создания геометрических моделей и генерации конечно-элементной сетки;
- большие возможности по самостоятельной генерации конечно-элементной сетки;
- возможность использования различных моделей пластичности материала;
- большая база данных по характеристикам материалов и кузнечно-прессового оборудования, а так же широкие возможности по их редактированию и добавлению;
- возможность моделирования различных условий трения между заготовкой и инструментом;
- широкие возможности моделирования различных видов движения инструмента;
- простой и удобный интерфейс.

После создания проекта в *DEFORM*, возможно, потребуется ответить на следующие вопросы: может ли деталь разрушиться; каким образом она будет деформирована; можно ли использовать меньший объем материала без ущерба эксплуатационным характеристикам изделия. В отсутствие инструментов анализа ответ на эти вопросы можно найти, только пройдя все дорогостоящие и занимающие массу времени циклы разработки изделия:

- 1) построение и анализ модели изделия в системе автоматизированного проектирования *DEFORM*;

- 2) создание опытного образца проекта;
- 3) производственные испытания опытного образца;
- 4) оценка результатов производственных испытаний;
- 5) изменение проекта на основе результатов производственных испытаний.

Этот процесс продолжается до получения удовлетворительного решения.

С помощью анализа можно выполнить следующие задачи:

- 1) снизить затраты, выполнив тестирование модели на компьютере, а не в процессе дорогостоящих производственных испытаний;
- 2) сократить время, необходимое для представления продуктов на рынок, путем уменьшения количества циклов разработки изделия;
- 3) оптимизировать проект, быстро смоделировав нескольких концепций и сценариев перед принятием окончательного решения и отведя большее время на обдумывание новых проектов.

Авторы выражают благодарность: Воронину Сергею Васильевичу, Глущенкову Владимиру Александровичу, Ерисову Ярославу Александровичу, Звонову Сергею Юрьевичу, Маслову Валентину Дмитриевичу, Мельникову Алексею Александровичу, Ненашеву Валерию Юлиановичу, Нестеренко Елене Сергеевне, Носовой Галие Мягтуовне, Носовой Екатерине Александровне, Осиновской Ирине Васильевне, Хардину Михаилу Викторовичу, Черткову Геннадию Вячеславовичу, Чурикову Вячеславу Максимовичу за предоставленный материал и активное участие в работе над пособием.

# 1 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС DEFORM

## 1.1 Общие положения

DEFORM – специализированный программный комплекс, созданный для моделирования процессов обработки металлов давлением, а в дальнейшем расширенный для моделирования процессов термической обработки и процессов резания. DEFORM позволяет описывать не только процессы протекающие в материале (например, изменение структурного состава), но и работу технологического оборудования и проверять разработанный технологом процесс не экспериментально «в железе», а сидя за столом в офисе на компьютере [1].

В большинстве случаев, спроектировать инструмент, позволяющий получать изделия требуемого качества и с необходимыми эксплуатационными характеристиками, с первой попытки не возможно. Требуется проводить натурные эксперименты, инструмент часто приходится дорабатывать, изменять его геометрию, корректировать параметры процесса, а иногда и полностью перерабатывать технологию, что требует больших временных и финансовых затрат. Использование системы DEFORM позволяет избежать подобных затрат. С помощью этой программы технолог может быстро, всего за несколько часов, провести моделирование и, на его основе, внести изменения в параметры технологического процесса. При этом можно изменить не один – два параметра, как это обычно бывает в цеховых условиях, а попробовать десятки вариантов и получить действительно оптимальный технологический процесс – как по качеству, так и по затратам на его производство.

Компания Scientific Forming Technology Corporation (SFTC, США), разработчик программного комплекса DEFORM уже более 20 лет занимается внедрением систем моделирования процессов ОМД. DEFORM, является лидером в области моделирования задач обработки металлов давлением [2].

Математической основой программы является метод конечных элементов (МКЭ). Отличительная особенность DEFORM заключается в том, что программа разработана для технологов и не требует глубоких знаний о методе

конечных элементов. Простой и удобный интерфейс позволяет быстро подготовить задачу и выполнить ее расчет, при этом нет необходимости ждать завершения расчета, результаты можно оценивать уже по ходу его выполнения.

DEFORM описывает пластическое течение материала для горячих, полугорячих и холодных процессов, как изотермических, так и неизотермических. Теплопередача между объектами и внутри них может быть проанализирована как отдельный процесс или совместно с процессом деформирования по сопряженной схеме. При моделировании могут рассматриваться все факторы, оказывающие влияющие на процесс штамповки: теплообмен (конвективный и лучистый), выделение тепла при трении и фазовых переходах, потери тепла в зоне контакта между заготовкой и инструментом, др. [3].

Отсутствие ограничений по количеству участвующих в процессе объектов (как деформируемых, так и деформирующих) позволяет описывать сложные технологические операции с участием композиционных заготовок и любого количества инструментов. Используемый инструмент может быть как неподвижным, так и перемещаться в любом направлении (в том числе совершать вращательное движение).

В программе можно описывать характер воздействия любого оборудования – прессов (гидравлических, винтовых, кривошипных) молотов, прокатных станов и др. Заданные один раз характеристики модели оборудования могут использоваться повторно, с помощью библиотеки оборудования.

Система обладает широкими возможностями для обработки результатов моделирования и оценки полученной детали на наличие дефектов (образование трещин, складок, незаполнение штампа и др.). Для этого результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков, полей распределения (напряжений, деформаций, температуры) и табличных данных. Можно так же отследить движение отдельных точек материала деформируемой среды [4].

Файловая структура системы DEFORM обладает следующими особенностями: все начальные данные и результаты расчета хранятся в одном файле; каждый рассчитанный шаг можно использовать как исходный, для дальнейшего расчета. Такая структура хранения данных позволяет пользователю продолжить любой остановленный ранее расчет (при этом неважно, по какой причине расчет был прерван), вернуться на любой шаг расчета, внести изменения и после этого продолжить расчет.

Наличие отдельных модулей позволяет подобрать наиболее оптимальную конфигурацию программы для конкретного предприятия. Программа содержит следующие модули:

- DEFORM-2D – модуль, позволяющий моделировать осесимметричные или близкие к осесимметричным процессы, процессы плоских деформаций или плоских напряжений, осесимметричные процессы с кручением. Позволяет моделировать такие технологические процессы как: ковка, горячая и холодная объемная штамповка, прокатка, прессование, вытяжка, высадка, гидроштамповка и др. Используемые модели материалов: пластическая, упругая, упруго-пластическая, пористая, жесткая. Возможна совместная работа с модулем DEFORM-HT.

- DEFORM-F2 – упрощенный и более дешевый модуль, предназначенный для моделирования 2-х мерных процессов (осесимметричных, или близких к осесимметричным, и плоских деформаций). Расчеты осуществляются с помощью математического ядра DEFORM-2D. Модуль позволяет описывать такие технологические процессы как: ковка, горячая и холодная объемная штамповка, прессование, вытяжка, высадка и др. Используемые модели материалов: пластическая, упруго-пластическая (только для расчета напряжений в инструменте) и жесткая.

- DEFORM-3D – модуль, аналогичный DEFORM-2D, но описывающий трехмерное поведение металла при различных процессах обработки давлением. Описывает процессы изготовления деталей, имеющих любую форму. Используемые модели материалов: пластическая, упругая, упруго-

пластическая, пористая, жесткая. Возможна совместная работа с модулем DEFORM-HT.

- DEFORM-F3 – упрощенный и более дешевый модуль, предназначенный для моделирования 3-х мерных процессов, аналогичный модулю DEFORM-F2, имеющий математическое ядро DEFORM-3D. Используемые модели материалов: пластическая, упруго-пластическая (только для расчета напряжений в инструменте) и жесткая.

- DEFORM-HT – модуль, позволяющий описывать процессы, протекающие в изделии при термообработке, такие как фазовые превращения, изменение размера и формы зерна, диффузионные процессы, процессы индукционного нагрева и нагрева электросопротивлением. Позволяет моделировать такие процессы как старение, закалка, отпуск, цементация и пр. Есть возможность совместной работы с модулями DEFORM-2D и DEFORM-3D.

Программный комплекс DEFORM имеет так же ряд специализированных модулей, разработанных под решение узкого типа задач:

- DEFORM-Ring Rolling – специализированный модуль, предназначенный для моделирования процессов раскатки колец. Имеет специализированный ALE-решатель, позволяющий считать раскатку колец в короткие сроки.

- DEFORM-Cogging – специализированный модуль, предназначенный для моделирования процессов протяжки слитков. Позволяет задавать десятки и сотни ударов молота (или пресса) как одну операцию, что существенно упрощает моделирование таких процессов.

-DEFORM-Shape Rolling – специализированный модуль, предназначенный для моделирования процессов фасонной прокатки.

Для более удобной работы пользователя и его освобождения от восприятия избыточной на текущий момент работы информации программа разделена на препроцессор, процессор и постпроцессор, переход к которым осуществляется из одного окна.

## 1.2 Метод конечного элемента

Моделирование технологических задач ОМД требует численного интегрирования системы уравнений равновесия для тела. Вместо интегрирования системы дифференциальных уравнений в ряде случаев решают задачу отыскания функции являющейся результатом интегрирования указанной системы. В качестве функции, как правило, используют зависимость, описывающую энергетическое состояние тела. Для поиска значений параметров зависимости используют перебор различных вариантов состояния отдельных частиц тела, в связи, с чем методы подобного решения называются вариационными. Очевидно, что для использования данных методов необходимо однозначно определить положение отдельных частиц тела друг относительно друга. Поскольку в реальных телах сложно однозначно выбрать частицы с помощью которых будет осуществляться подбор параметров, то описываемое тело заменяют на модель состоящую из отдельных частиц [7].

Вариационные способы позволяют решать любые задачи обработки металлов давлением без принципиальных ограничений.

К недостаткам вариационных методов можно отнести необходимость расчета большого количества вариантов решения задачи с целью отыскания наиболее точного значения удовлетворяющего принципу минимизации энергии в системе (принцип Лагранжа). В этой связи широкое применение данные способы нашли в компьютерных программных пакетах, причем наибольшее распространение получил метод (группа методов) конечных элементов (МКЭ).

Универсальность МКЭ позволила создать на его основе большое количество программных продуктов для различных областей науки и техники.

Для моделирования в DEFORM исходная динамическая задача разбивается на серию статических задач (шагов). На каждом временном шаге, на основе заданных граничных условий, термомеханических свойствах материала заготовки и решениях на предыдущих шагах, определяются ключевые параметры, такие как скорость, перемещение и температура каждого узла в конечной элементной сетке. Другие параметры, как напряжения и

деформации – это производные от этих величин, они пересчитываются для каждого шага отдельно [5].

Поведение всех материалов описывается с помощью диаграммы «напряжения - деформация».

В системе DEFORM, напряжения и деформации, используемые в диаграмме «напряжение-деформация» – это эквивалентные напряжения (интенсивность напряжений)  $\bar{\sigma}$  и эквивалентные деформации  $\bar{\varepsilon}$  (интенсивность деформации), определяющиеся по зависимостям:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1.1.1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (1.1.2)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения;  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – касательные напряжения;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – нормальные деформации.

В DEFORM используется концепция напряжения течения. Так как материал деформируется пластически, сумма напряжений определяется из пошаговой суммы деформации по кривой напряжения течения (относительно зоны пластичности на диаграмме напряжений – деформаций).

Этот метод наиболее точно описывает истинное поведение материала. Необходимо задать значения напряжения потока для различных значений эквивалентных деформаций, скорости эквивалентных деформаций и температуры.

Для вычисления упругих деформации, используется уравнение Леви-Мизеса, которое связывает тензор напряжений  $\sigma_{ij}$  и тензор скорости деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  уравнение.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\lambda} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (1.1.3)$$

где коэффициент  $\lambda$  – это функция, зависящая от напряженно-деформированного состояния и свойств материала.

Расчет течения металла проводится на основе принципа минимальной работы, который звучит так : распределение скорости, которое прогнозирует

самую низкую величину потребной работы, является наилучшей аппроксимацией реального распределения скорости (металл течет в направлении наименьшего сопротивления).

Принцип минимальной работы может быть выражен математически, в виде (4) и (5), где (4) – это упрощенный баланс между массовыми силами (первый член) и силами сцепления поверхностей (второй член). Способ записи этого уравнения через скорости представлен в (5).

$$\pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_S F_i u_i dS \quad (1.1.4)$$

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV - \int_S F_i \delta u_i dS + K \int_V \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V dV = 0 \quad (1.1.5)$$

где  $\pi$  - работа;  $\bar{\sigma}$  - напряжение течения;  $\dot{\epsilon}$  - скорость эквивалентных деформаций;  $\delta$  – вариация;  $V$  – объем;  $F_i$  – силы;  $u_i$  – перемещения;  $S$  – площадь поверхности;  $K$  – константа.

Решения в скоростях может быть получено только тогда, когда вариация в функционале равна нулю. Отметим, что там же присутствует дополнительный член, который описывает несжимаемость в решении. Он получен путем интегрирования скорости объемной деформации и умножением на большую константу. Решение стремится поддерживать низкие значения объемной скорости деформаций для того, чтобы значение этого интеграла было близко к нулю [6].

Процесс поиска решения, выполняемый программой можно разделить на следующие этапы:

1. Ввод геометрии и граничных условий
2. Генерация начального приближения поля скоростей (для первого шага)
3. Расчет поведения элементов, базируясь на поле скоростей и других переменных (деформации, температуре и т.д.)
4. Расчет силовых граничных условий
5. Составление и решение матрицы уравнений
6. Расчет ошибки

7. Если ошибка велика, то процесс решения возвращается на шаг 3, если ошибка является удовлетворительной осуществляется переход на шаг 8
8. Обновление геометрии
9. Расчет изменения температуры
10. Расчет новых скоростей, если необходимо
11. Если выполнен критерий остановки - расчет завершен, иначе переход на шаг 3.

### 1.3 Последовательность действий

Работа пользователя в DEFORM осуществляется в следующей последовательности:

- I. Создание геометрической модели и ее дискретизация.
- II. Задание свойств материала.
- III. Задание граничных условий.
- IV. Выбор параметров расчета.
- V. Осуществление расчета (автоматически).
- VI. Анализ полученных результатов.
  1. Выявление ошибок расчета.
  2. Принятие решения о повторном расчете.

Пункты I-IV выполняются в препроцессоре – модуле программы отвечающем за задание исходных данных.

Расчет задачи осуществляется автоматически процессором (пункт V). Для анализа полученных результатов используется постпроцессор. Запуск препроцессора, процессора и решателя осуществляется через главное окно (рисунок 1.1).

В верхней части Главного окна находится **Панель меню**, содержащая меню: **Файл, Моделирование, Инструменты, Вид, Настройки, Справка**. Рассмотрим наиболее часто используемые команды меню – **Файл** и **Моделирование**.

Меню **Файл** содержит команды, используемые для создания новых задач,

и перемещения между директориями каталога операционной системы.

Команда **Новая задача** (New Problem, ) позволяет создать новую задачу и запустить препроцессор, позволяющий задавать исходные данные.

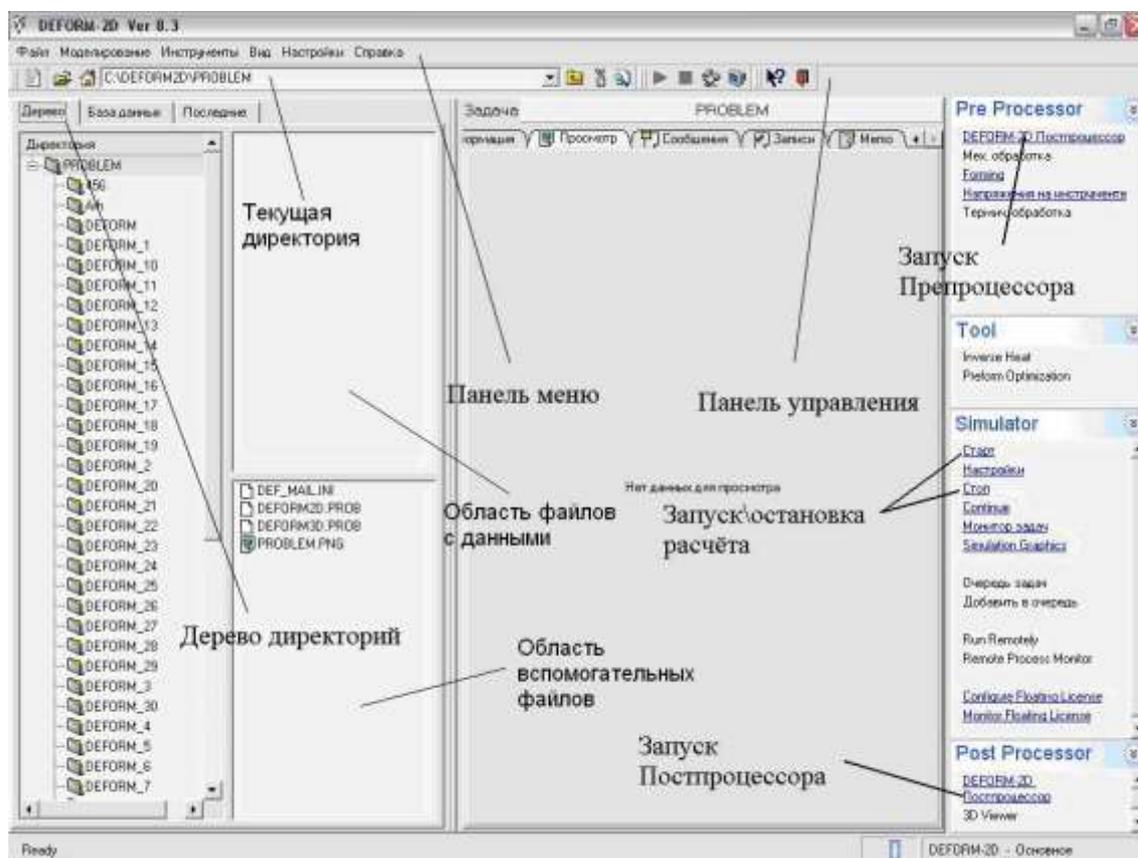


Рисунок 1.1 - Главное окно DEFORM-2D

Выбор текущей директории в **Дереве директорий** осуществляется с помощью левой кнопки мышки (ЛКМ) при этом осуществляется выделение указанной директории серой полосой. Расположения в текущей директории файлы с расширением “bd” “key” автоматически появляются в области файлов сданными. При необходимости можно выбрать файл, который в дальнейшем будет закрыт. Вспомогательные файлы программы и файлы, созданные в других программах, появляются в области вспомогательных файлов.

Команда **Выход**  позволяет выйти из программы.

Меню **Моделирование** необходимо для запуска задачи на расчет и управления задачами в ходе расчета. Для запуска задачи на расчет и аварийной

остановки расчета используются команды **Старт** [Старт](#) и **Стоп** [Стоп](#) .

Команды этих меню для более быстрого доступа вынесены на **Панель управления** расположенную непосредственно под **Панелью меню**.

В левой части экрана в **Главном окне** расположено **Дерево директорий**, которое отражает текущее расположение задачи по отношению к **Дереву каталогов**, используемому в операционной системе.

В активной строке **Текущая директория** указана директория (папка) являющаяся корневой в окне **Дерево директорий**. Для изменения текущей **Директории** используются команды, **Изменить директорию** в **Дереве**, переход на команды ввода из контекстного меню, сделать текущей Директорией. Назначить домашней директорией. Использование команд изменения директорий в **Дереве** и **Переход на вверх**  аналогичны командам операционной системы.

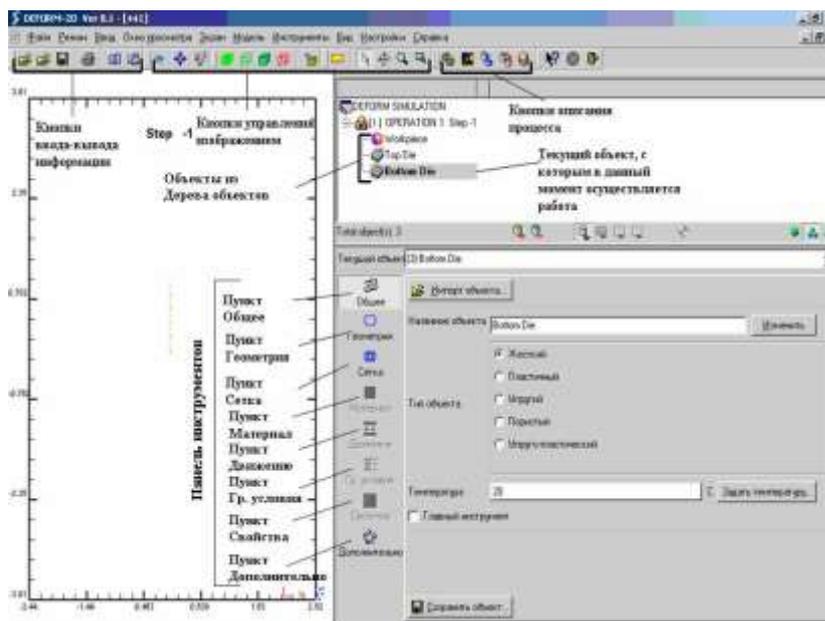


Рисунок 1.2 - Интерфейс препроцессора

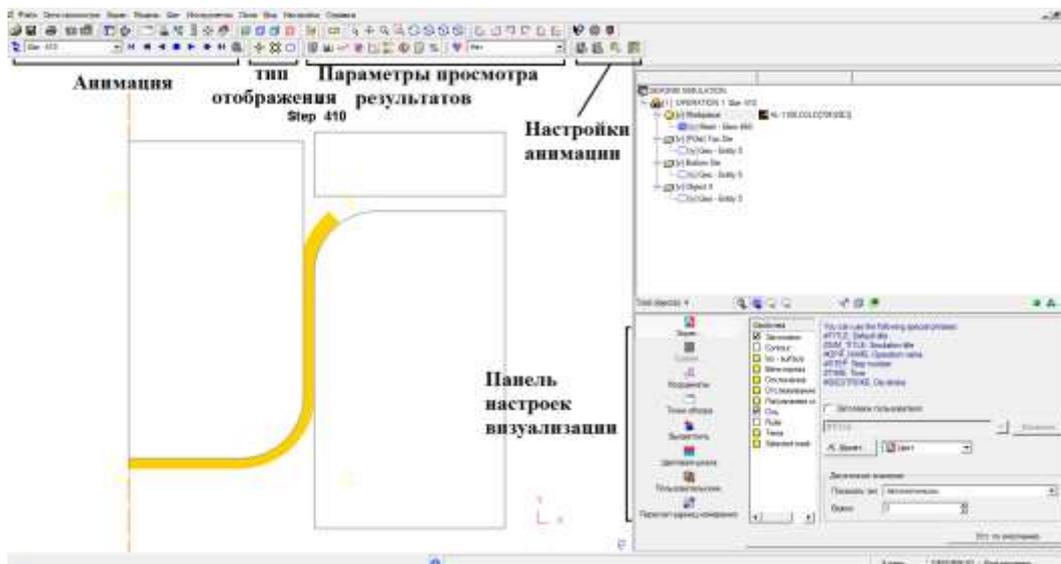


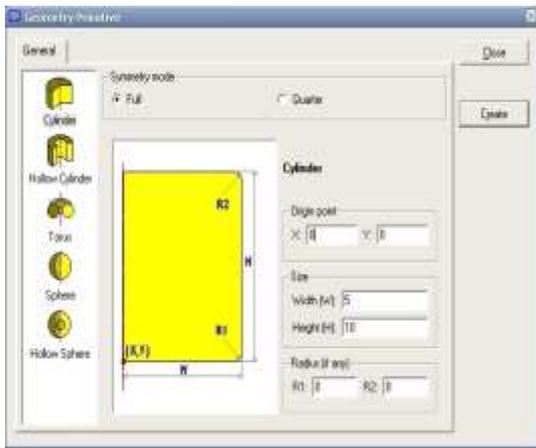
Рисунок 1.3 - Интерфейс постпроцессора

#### 1.4 Геометрическая модель объекта моделирования

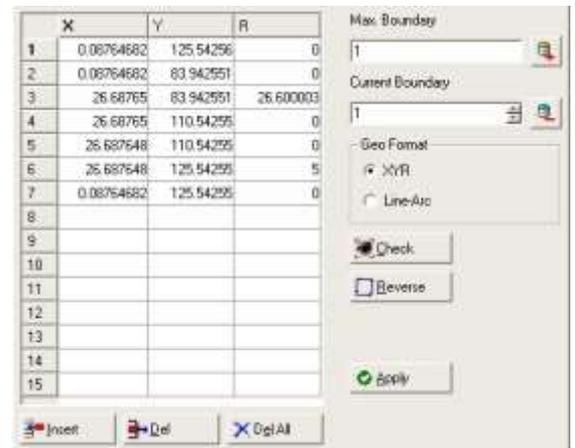
Для решения любой задачи с помощью компьютера необходимо, прежде всего, создать геометрическую модель, описывающую пространственные характеристики моделируемого объекта.

Геометрическая модель может быть построена как собственными средствами программы DEFORM, так и в другой программе специализирующиеся на создании геометрических моделей. В роли таких программ выступают CAD-системы, которые имеют больше возможностей для геометрического моделирования. Для переноса геометрической модели из CAD-системы в DEFORM используются форматы STL, IGES, и др.

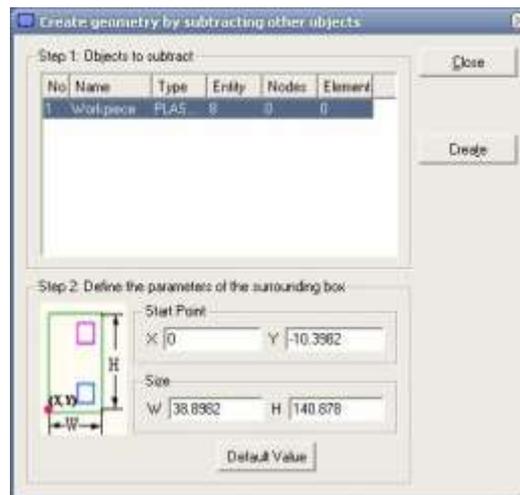
Построение геометрической модели в DEFORM-2D можно осуществить несколькими способами: с помощью геометрических примитивов (для простых по форме объектов – цилиндр, сфера, тор и т.д. рисунок 1.4, а), с помощью геометрических элементов, в качестве которых могут выступать отрезки или дуги (рисунок 1.4, б) и другие плоские объекты. В последнем случае для создания геометрии используются геометрические операции (рисунок 1.4, в).



а



б



в

а – окно позволяющее создавать геометрические примитивы; б – область задания данных геометрических элементов; в – логические операции  
Рисунок 1.4 - Инструментарий, используемый для построения геометрии объектов

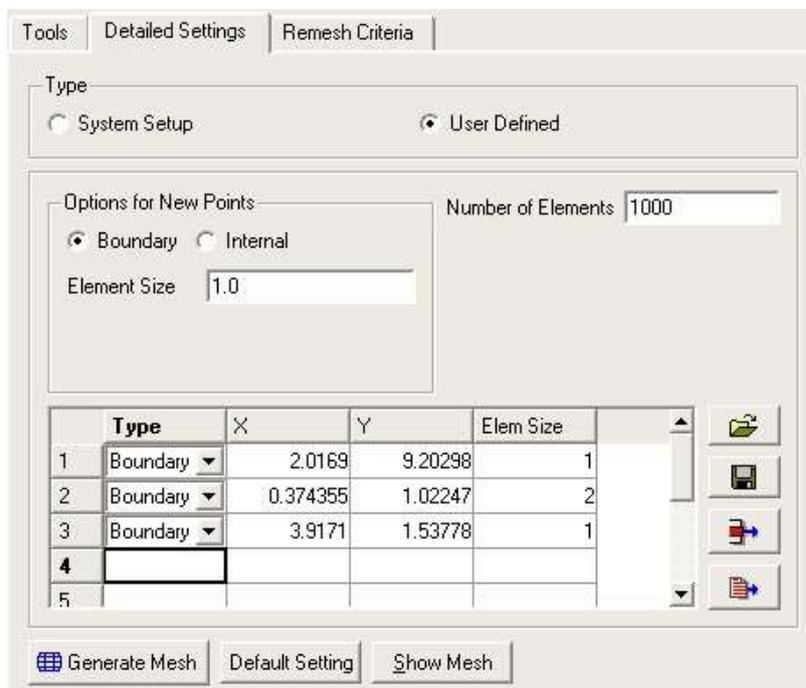
Построенная геометрическая модель является непрерывной и определяется с помощью линий, ограничивающих внутреннее пространство и направление обхода, т. е. за счет задания направления последовательности построения геометрической модели. «Правильным» направлением в DEFORM считается движение против часовой стрелки. В случае «правильного» задания геометрии серая полоса, определяющая внутреннюю часть тела, должна располагаться по внутреннему контуру геометрической модели.

Построенная геометрия для использования в расчетах должна быть разбита на сетку конечных элементов. В качестве конечных элементов (КЭ),

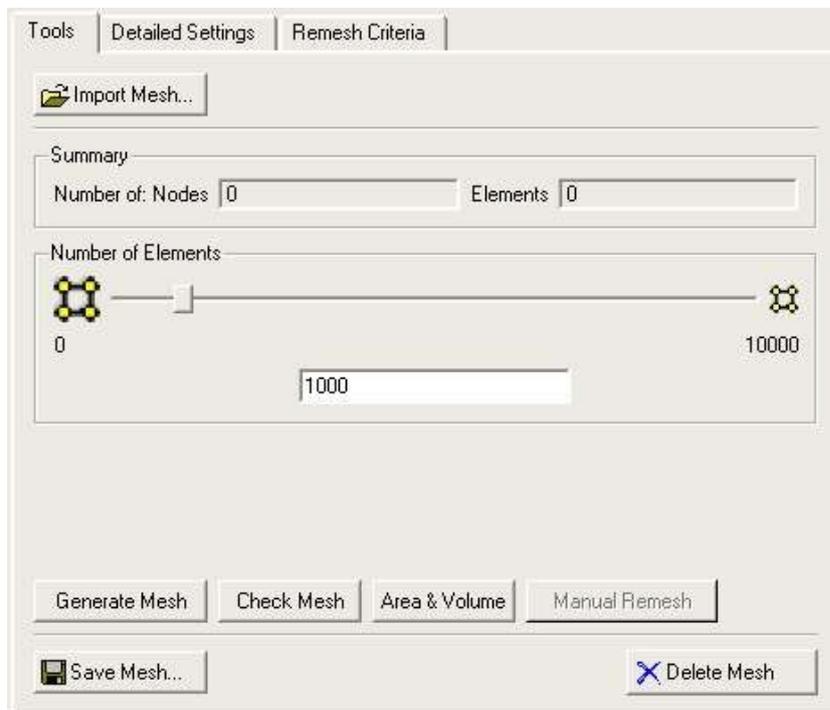
используемых для построения сетки в DEFORM-2D используется плоский четырех узловой КЭ.

В DEFORM реализуется несколько вариантов построения сетки, так как увеличение возможностей создания сетки дает инженеру, использующему программу, более гибкий инструмент для решения более широкого класса задач.

Существует два направления связанных с построением сетки: явное и неявное. При осуществлении процесса явного построения пользователь должен полностью определить параметры сетки и ее локальные особенности. Для осуществления подобной работы программа оснащена специальными средствами, позволяющими редактировать отдельные фрагменты и всю сетку в целом (рисунок 1.5, а). Использование подобных средств не требует глубокого знания МКЭ, достаточно лишь знание его основ. Поэтому пользователь DEFORM не должен обладать высокой квалификацией.



а



б

а – панель настройки свойств создаваемой сетки;

б – панель задания количества КЭ

Рисунок 1.5 - Панели задания параметров сетки КЭ

В случае использования неявного построения работа пользователя ограничивается заданием количества КЭ в модели. Для изменения количества КЭ используется бегунок (рисунок 1.5, б).

Взаимосвязь между количеством КЭ в сетке и их размерами очевидна: количество КЭ в геометрической модели определяет их размеры и наоборот размер КЭ определяет их количество в сетке.

Поскольку точность расчета напрямую зависит от того, какие размеры имеет КЭ то необходимо придерживаться следующих рекомендаций.

В тех местах, где ожидаются большие величины напряжений деформаций необходимо, сгущать сетку. Обычно такие места на заготовке соответствуют концентраторам напряжений на инструменте. С другой стороны в местах, где не ожидается интенсивное течение металла и больших давлений сетка может иметь большие размеры КЭ.

- Размеры КЭ сетки должны быть минимум в три раза меньше чем

наименьший концентратор напряжений на данном участке. Это требование создает необходимость строить сетки с большим количеством КЭ при наличии небольших концентраторов напряжений, однако DEFORM позволяет создавать локальные сгущения сетки и тем самым уменьшать суммарное количество КЭ в модели.

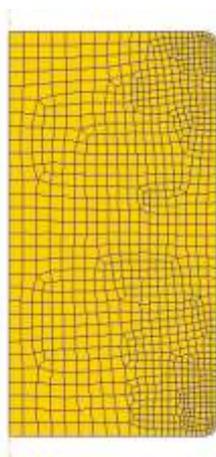


Рисунок 1.6 - Сетка КЭ построенная с учетом особенностей деформирования заготовки

- На точность расчета влияет также форма КЭ. Нежелательно использовать в сетке конечные элементы, имеющие один из размеров значительно больше и меньше других размеров.

- При моделировании процессов листовой штамповки необходимо, чтобы по толщине заготовки было не менее пяти КЭ.

Очевидно, также и то, что чем больше число КЭ в сетке, тем дольше ЭВМ будет осуществлять вычисления. При этом с ростом числа КЭ будет расти и погрешность вычисления связанная с погрешностью округления результатов расчета на ЭВМ. С другой стороны грубое описание исходной геометрической модели крупной сеткой тоже создает значительные ошибки. Грубая сетка дает заниженный результат рассчитанных напряжений, что необходимо учитывать. Следовательно, ошибка вычисления всегда будет присутствовать независимо от размера КЭ [8].

В этом случае целесообразно поступать в соответствии с методом последовательного приближения: сначала осуществить расчет на более грубой

сетке, т.е. сетке с малым количеством КЭ, затем, получив предварительные расчеты, увеличить количество конечных элементов и рассчитывают задачу снова. Полученные данные анализируют, если разница, полученная в результате двух последних расчетов отличается менее чем на устраивающую исследователя погрешность, то для анализа результатов моделирования используют вариант с последней рассчитываемой сеткой.

Для решения ряда задач с интенсивным течением металла с целью повышения точности расчета в программе предусмотрена адаптивная сетка. Использование адаптивной сетки позволяет процессору автоматически перестраивать сетку в ходе расчета при достижении критических значений определенных параметров, в качестве которых выступают - величина проникновения сетки в инструмент и величина перемещения узлов сетки за один шаг.

При этом рассчитанные значения параметров автоматически перераспределяются со старой сетки на новую. Использование адаптивной сетки позволяет рассчитывать значительное деформирование сетки при высокой точности.

### **1.5 Задание свойств материала**

Для моделирования конструкторско-технологических процессов необходимо знать зависимость между деформациями и напряжениями которая учитывает особенность поведения материала нагружаемого внешними усилиями. При этом надо учесть тот факт, что свойства различных материалов сильно отличаются друг от друга [9].

Например, хрупкие материалы разрушаются практически сразу после начала пластических деформаций. Пластичные металлы могут значительно деформироваться с момента нагружения до момента образования шейки.

Поэтому для описания зависимости между напряжениями и деформацией пользуются несколькими моделями, которые можно выделить три группы: модели, описывающие упругое и пластическое состояние тела, а также жесткие

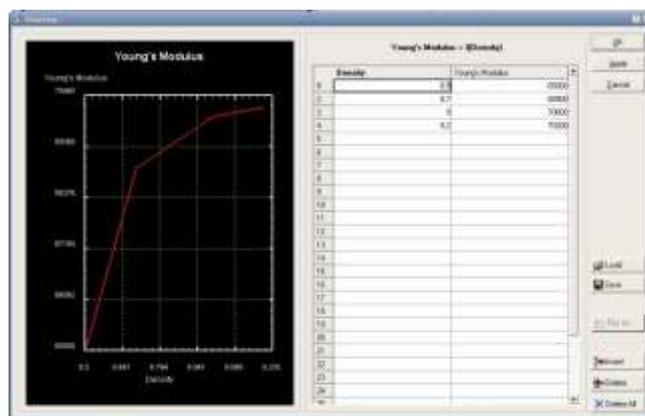
тела [10].

Жесткие тела описываются с помощью физической модели идеально жесткого тела, т.е являются телами изменение формы которых не происходит . при любом значении напряжений и сил действующих по поверхности.

В DEFORM задание упругих свойств осуществляется полинейной и мультилинейной моделям за счет указания модуля Юнга или введения данных с помощью таблицы (рисунок 1.7). Подобные модели могут использоваться для описания свойств инструментов участвующих в процессе деформирования заготовки.



а



б

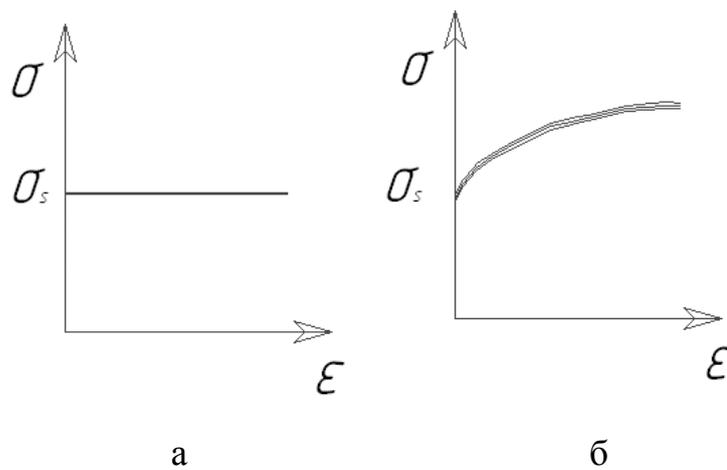
а – по линейной модели; б – по мультилинейной модели

Рисунок 1.7 - Данные необходимые для задания упругих свойств материала в DEFORM

Модели, описывающие пластическое состояние тела являются более

сложными и наиболее часто применяемыми для решения задач деформирования. В DEFORM возможно задание следующих моделей пластического течения:

- Жесткопластическая не упрочняемая модель – материал начинает деформироваться по достижению интенсивности напряжения, значения напряжения текучести без упругого деформирования на начальном этапе (рисунок 1.8). Упрочнение не учитывается. Напряжение не зависит от деформаций.



а – жесткопластическая; б – несжимаемая упрочняемая;

$\sigma_s$  - интенсивность напряжения,  $\epsilon$  - интенсивность деформаций,

$\sigma_s$  - предел текучести

Рисунок 1.8 - Модели, описывающие пластические свойства материалов

Жесткопластическая не упрочняемая модель часто используется для описания технологических процессов горячей обработки металлов, в этом случае процессы упрочнения и разупрочнения протекают в материале одновременно и упрочнением можно пренебречь.

- Жесткопластическая упрочняемая модель – упругие деформации отсутствуют, пластические деформации появляются по достижению заданного



отрезков, что позволяет более точно описать поведение реального материала при деформировании (рисунок 1.9, б).

Задание пластических свойств материала в программе DEFORM осуществляется в табличном виде (рисунок 1.10). Это зачастую наиболее простой режим задания пластических свойств материала основанный на легко доступных экспериментальных данных, в ходе которого осуществляется построение графика модели по точкам, при этом построение зависимости осуществляется для заданной температуры (например, при холодной листовой штамповке при температуре 20°). В случае если при моделировании процесса надо учитывать влияние температуры на свойства материала (например, как в горячей штамповке), то вводится график еще для нескольких температур лежащих в интервале изменения температуры тела по ходу процесса (рисунок 1.10 столбец Temperature).

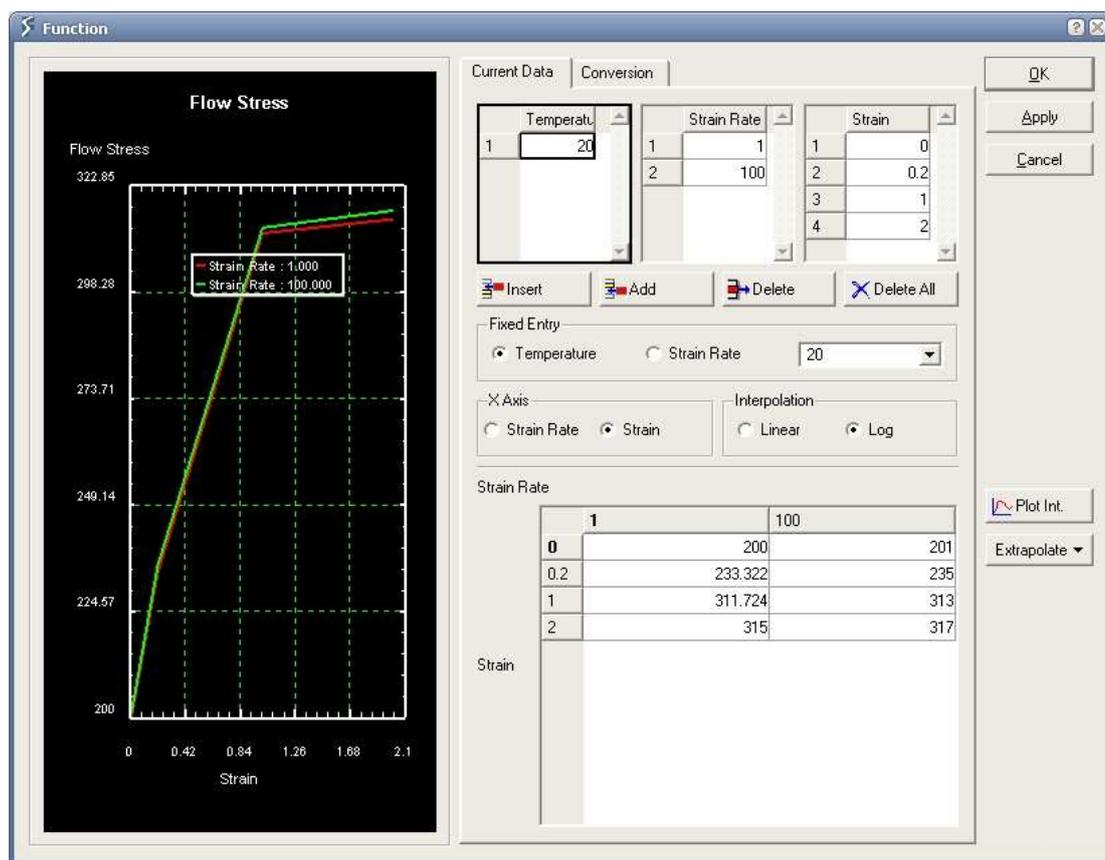


Рисунок 1.10 - Таблица задания свойств материала программе DEFORM

В DEFORM возможно моделирование процессов ОМД быстро протекающих во времени (штамповка на ВСМ, и т.д.). В этом случае модель учитывает фактор скорости протекания процесса во времени (рисунок 1.10 столбец Strain Rate).

Правильный выбор модели, описывающий свойства объекта позволяет значительно сэкономить время расчета и получить при этом достоверные результаты.

Например, при расчете процесса штамповки деталей в открытых штампах пренебрегают деформацией инструмента, считая его абсолютно жестким. В этом случае расчет осуществляется быстрее, поскольку ЭВМ приходится рассчитывать деформации только одного тела – заготовки, а не трех как в случае учета упругой деформации инструмента.

Присвоение свойств материала в DEFORM, какому либо объекту осуществляется с помощью кнопки **Load** (Задание материала). Кнопка **Load** (Задание материала) становится активной при переходе к закладке **Material** (расположена на **Панели инструментов** в правой части) после выбора марки материала из списка материалов хранящихся в библиотеке (рисунок 1.11).

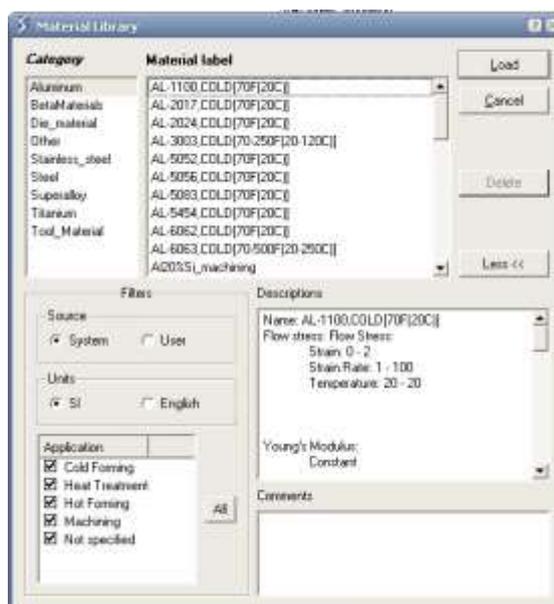


Рисунок 1.11 - Список материалов хранящихся в библиотеке материалов

Для задания свойств нового материала необходимо вызвать окно **Material**  и создать новый материал, который в дальнейшем будет храниться в библиотеке DEFORM.

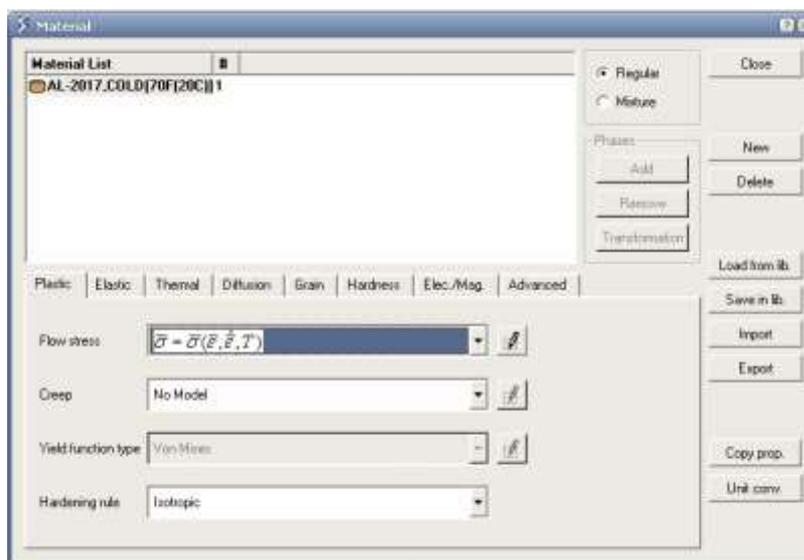


Рисунок 1.12 - Окно **Material** после задания свойств нового материала

Перевод используемых при задании свойств материала терминов представлен в таблице 1.1.

Задание различных свойств материала осуществляется за счет вызова соответствующей закладки в окне **Material**. На рисунке 1.13 показана закладка температурных свойств, на которой задаются свойства теплопроводности, теплоемкости и степени черноты.



Рисунок 1.13 - Закладка **Thermal** (Температурные свойства) окна **Material**

Таблица 1.1-Термены, используемые при задании свойств материала

Тип свойств	Термин	Пояснения
Plastic (Пластические)	Flow stress (закон течения)	Позволяет описывать кривую упрочнения с помощью нескольких вариантов аппроксимации или задания данных в виде таблицы. При задании данных в виде таблицы активным должен быть значок $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$ .
	Creep	Ползучесть
	Hardening rule	Функция упрочнения
Elastic (Упругие)	Young's modulus	Модуль Юнга
	Poisson's Ration	Коэффициент пуансона
	Thermal expansion	Коэффициент термического расширения
Thermal (Температурные)	Thermal conductivity (теплопроводность)	Позволяет задать свойства теплопроводности материала.
	Heat carability (Теплоемкость)	Позволяет задать свойства теплоемкости материала
	Emissivity (коэффициент излучения, степень черноты тела)	Позволяет задать коэффициент излучения материала
Diffusion (Диффузионные)	Diffusion coefficient	
Grain (Размер зерна)	Recrystallization model	

Для задания поведения материала при его пластической деформации на

закладке **Plastic** используется кнопка  - **Define** напротив надписи “Flowstress”  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$ . После нажатия кнопки **Define** вызывается окно, в котором в виде таблицы необходимо ввести данные о напряжениях и деформациях возникающих в материале в зависимости от температуры и скорости деформации (рисунок 1.14).

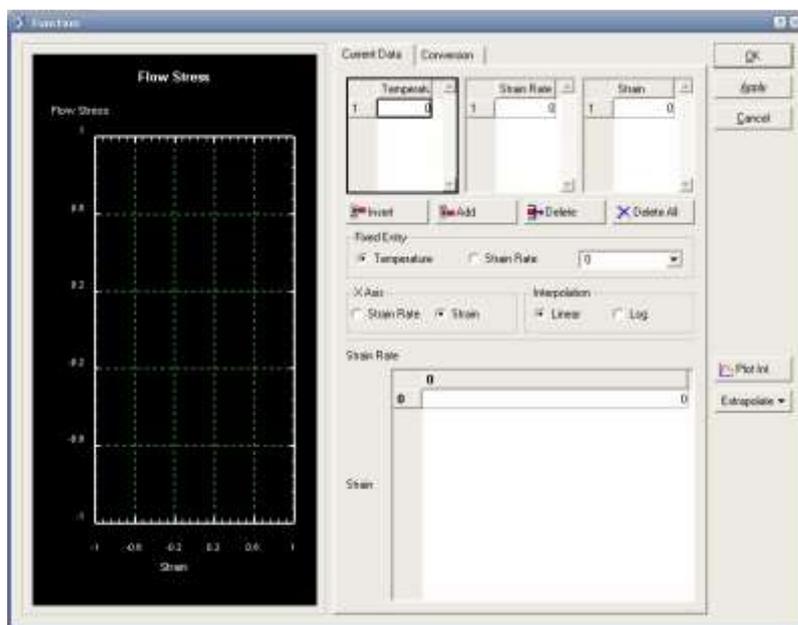


Рисунок 1.14 - Окно **Function** пластических свойств материала до введения данных о пластических свойствах материала

Результат задания свойств материала для случая, при котором скорость деформации (Strain rate) в ходе процесса не изменяется (в соответствующем столбике стоит единица) и пластические свойства материала заданы для трех температур 800, 1000 и 1200°C, показан на рисунке 1.15.

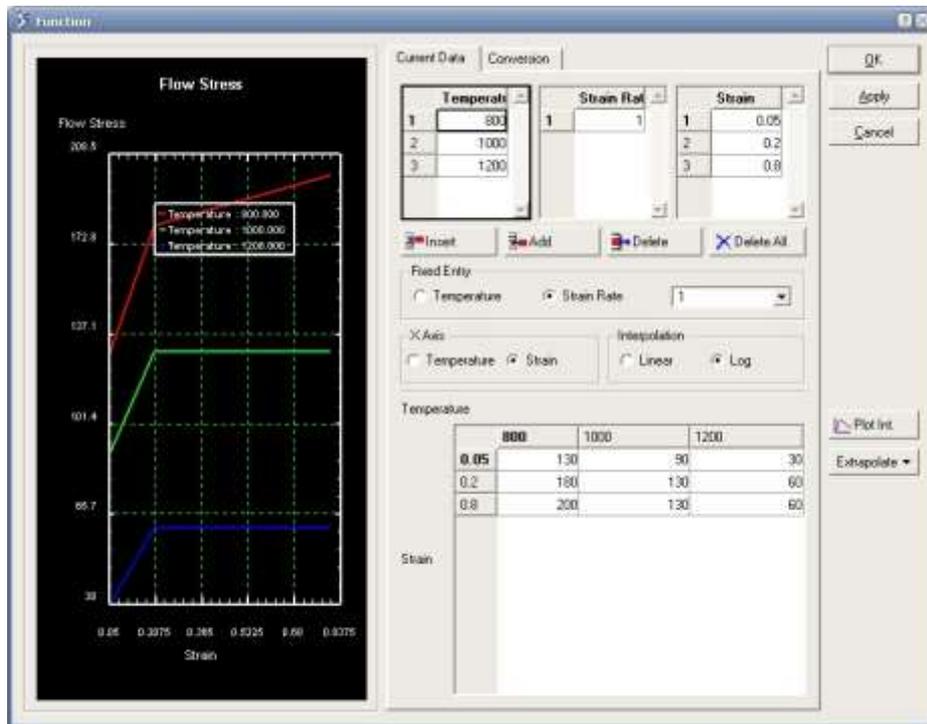


Рисунок 1.15 - Окно **Function** пластических свойств материала после введения данных о пластических свойствах материала

Для сохранения материала в библиотеке материалов программы используется кнопка **Save in lib**, которая вызывает окно **Save Material in Library**(рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 - Окно **Save Material in Library**.

## 1.6 Граничные условия

Задание граничных условий в DEFORM очень упрощено, например, для задания плоскостей симметрии при осадке достаточно указать поверхность симметрии на теле модели, а система сама распознает и накладывает ограничения на те узлы, которые принадлежат к этой плоскости. В случае использования программы граничные условия могут быть приложены к узлу, линии, поверхности или объему, но следует помнить, что с линии, поверхности и объема граничные условия будут перераспределены на узлы.

Для задания граничных условий используется панель граничных условий (рисунок 1.17). В таблице 1.2 перечислены основные граничные условия, которые задаются в программе.

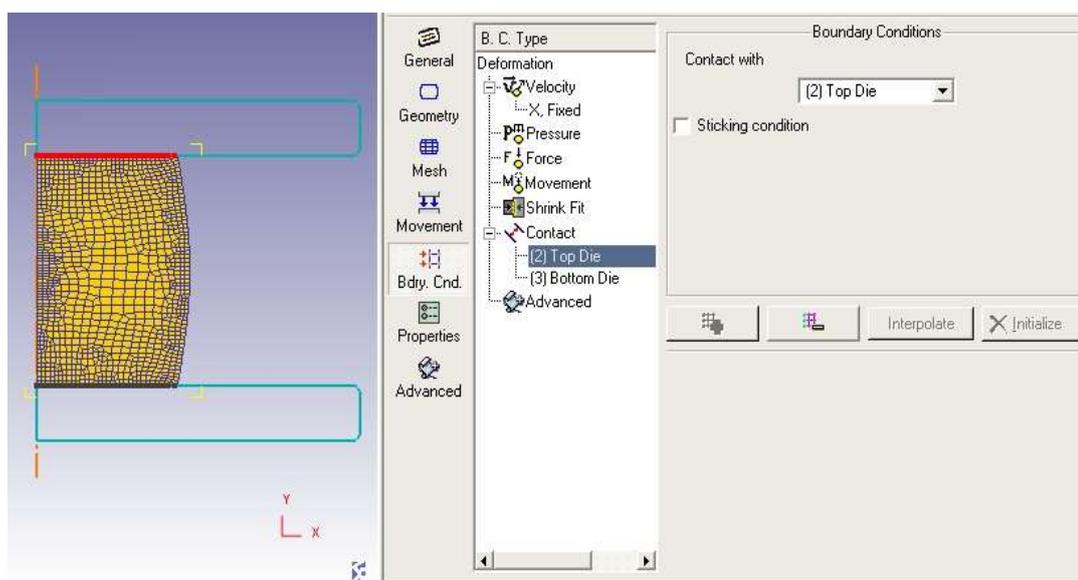


Рисунок 1.17 - Граничные условия, используемые в DEFORM

Особенностью задач ОМД является наличие больших контактных поверхностей. Так для исследования прочностных характеристик ротора двигателя, необходимо определить контакт на небольшой поверхности в подшипнике, в то время как в случае описания осадки цилиндрической заготовки контактной поверхностью является поверхность двух её торцов, размеры которых в ходе процесса изменяются.

Таблица 1.2 - Основные граничные условия, используемые в программе

Раздел	Граничное условие	Примечания
Deformation (деформация)	Velocity Pressure Force Movement Shrink Fit Contact	скорость давление сила перемещение посадка контакт
Temperature (Температура)	Heat Exchange with Environment Temperature Heat HeatFlux Advanced	Теплообмен с окружающей средой Температура Тепло Тепловой поток Другие условия

Следует заметить, что контактные задачи являются наиболее сложными задачами, решаемыми с помощью МКЭ. Общая последовательность решения таких задач сводится к дополнительному заданию граничных условий действующих на контактных поверхностях. Очевидно, что для задания этих условий необходимо определить контактную пару.

Отличительной особенностью DEFORM является то, что программа сама учитывает появление взаимодействия в контактных парах.

### 1.7 Выбор параметров расчета

Для осуществления расчета необходимо помимо граничных условий определить еще дополнительные условия расчета связанные с заданием числа шагов необходимых для расчета, условий (дополнительных) остановки расчета, выбором метода расчета, др. условий необходимых для решения конкретной задачи.

Первое что необходимо определить это размер шага задачи для квазистатического анализа. Напомним, понятие квазистатической задачи: для упрощения исследования процессов ОМД исходный, протекающий во времени процесс, рассматривают как набор дискретных статических подзадач, при этом результаты расчёта предыдущей подзадачи являются исходными данными для расчёта последующей подзадачи. Каждая такая задача не рассматривает протекание процесса во времени, а осуществляет статический анализ для одного шага.

Задание шага задачи можно осуществлять по времени или по перемещению инструмента, при этом перемещение узлов на каждом шаге не должно составлять более  $1/3$  длины наименьшего ребра КЭ участвующего в решении задачи.

Задавая число шагов, фактически задается величина перемещения инструмента в ходе процесса (его положение по окончанию процесса).

При необходимости в программе можно задать дополнительные условия позволяющие остановить процесс расчета. В качестве таких условий, как правило, выступают значения перемещения рабочих поверхностей инструмента друг относительно друга или максимальное потребное усилие деформирования (наибольшее усилие развиваемое оборудованием).

В зависимости от поставленной задачи осуществляется выбор способа (по перемещению или по времени) позволяющего наиболее точно решить данную задачу.

После завершения задания всех условий и исходных данных осуществляется подготовка данных к расчету. Этот этап включает в себя автоматическое создание базы данных, которая содержит всю необходимую для расчета информацию. При задании исходных данных используются препроцессорная часть программы, которая работает со своим файлом.

Основная задача препроцессорного файла (имеет расширение key) хранить информацию в таком виде, чтобы пользователю удобно было задавать исходные данные, и перемещать данный файл. Файл базы данных (расширение

db) имеет другую структуру, поскольку он используется для расчета и работы с постпроцессором. Структура хранения информации в файле базы данных организована таким образом, чтобы процессор в ходе расчёта мог быстро обратиться к этому файлу, взять из него нужную информацию, использовать её для расчёта и записать в него полученные результаты. Поскольку в ходе расчёта процессор выполняет такую последовательность действий неоднократно, то от того, на сколько быстро выполняются данные операции, зависит то, насколько быстро пользователь получит результат расчёта.

В ходе подготовки файла базы данных осуществляется и автоматическая проверка исходных данных с указанием возможных ошибок.

Запуск расчета задачи осуществляется с помощью команды **Start** или **Run**.

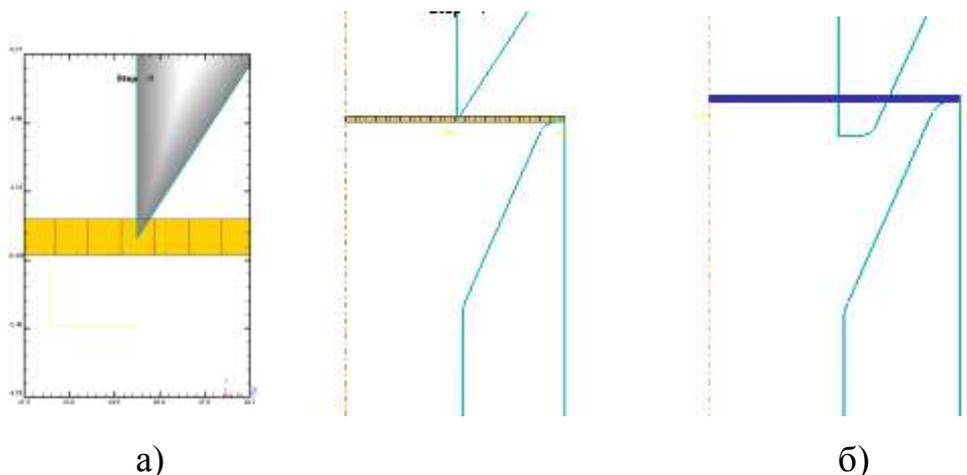
На следующем этапе осуществляется расчет задачи. В ходе расчета программа выводит текущую информацию о состоянии расчёта и возникающих ошибках (рисунок 1.18).

Большинство ошибок, возникающих в ходе расчёта, связано с некорректным заданием данных. Можно выделить следующие ошибки, которые наиболее часто встречаются:

1. Инструмент “не видит” заготовку, т.е. проходит сквозь заготовку, не изменяя её форму. Подобная ошибка возникает в двух случаях: в первом – вследствие того, что не были заданы контактные поверхности (или поверхности были заданы неверно рисунок 1.18, а), во втором – не задано скругление острых кромок у инструмента (рисунок 1.18, б). В первом случае возникновение ошибки может быть связано с неправильным заданием направления обхода на жестких объектах.

Во втором случае инструмент “не видит” заготовку, поскольку взаимодействие между ним и заготовкой осуществляется по узлам, а в начальный момент касания инструмента и заготовки таких узлов нет, что позволяет инструменту пройти сквозь заготовку. После чего положение инструмента уже не может быть интерпретировано программой однозначно и

инструмент продолжает проникать сквозь заготовку.



а – не заданы контактные поверхности; б – нет скругления острой кромки

Рисунок 1.18 - Неверное назначение поверхности контакта

2. Образование “локальных прострелов” (рисунок 1.19) – возникает вследствие неправильного задания шага расчёта.

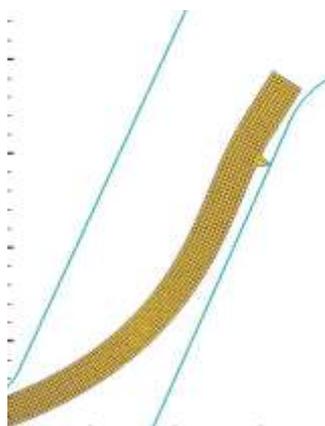


Рисунок 1.19 - Ошибка расчета, возникающая при неправильном задании шага расчета

В этом случае подбор параметров уравнений, описывающих состояние сетки, осуществляемый в соответствии с принципом минимизации энергии, происходит таким образом, что “локальный прострел” для узлов одного из КЭ более энергетически выгоден, чем перемещение узлов нескольких элементов.

Причиной “локального прострела” узла сетки является наличие у функционала потенциальной энергии нескольких минимальных значений. В этом случае программа находит первое решение, удовлетворяющее условию минимизации энергии и считает его оптимальным.

При уменьшении шага расчета число “локальных прострелов” может увеличиться, а до достижения корректного значения шага расчёта “локальные прострелы” исчезают.

3. Утонение без обрыва в опасном сечении – возникает в случае исчерпания пластических свойств, на каком либо участке. Подобная ситуация возникает, когда не заданы критерии разрушения материала. В месте локального утонения сетка перестраивается многократно (в случае, если построены подобные установки для автоматического расчёта), но разрушения как у реального тела не происходит (рисунок 1.20).

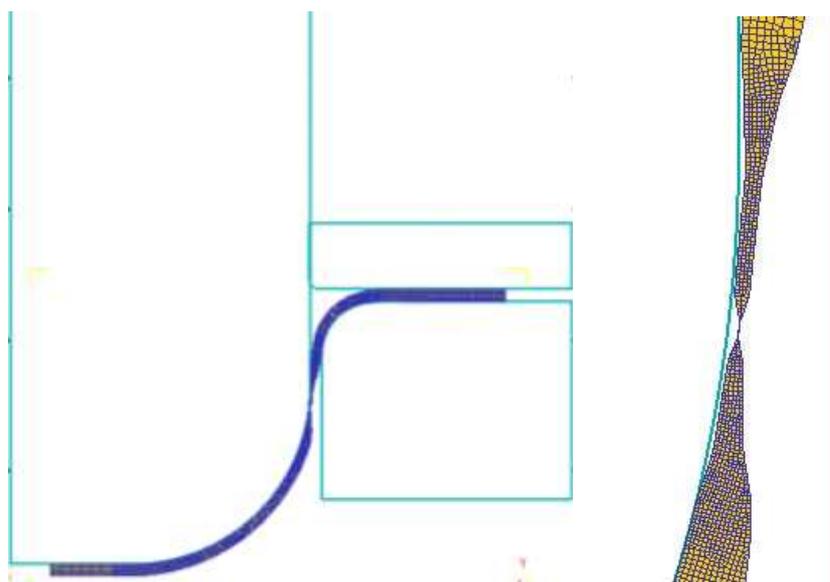
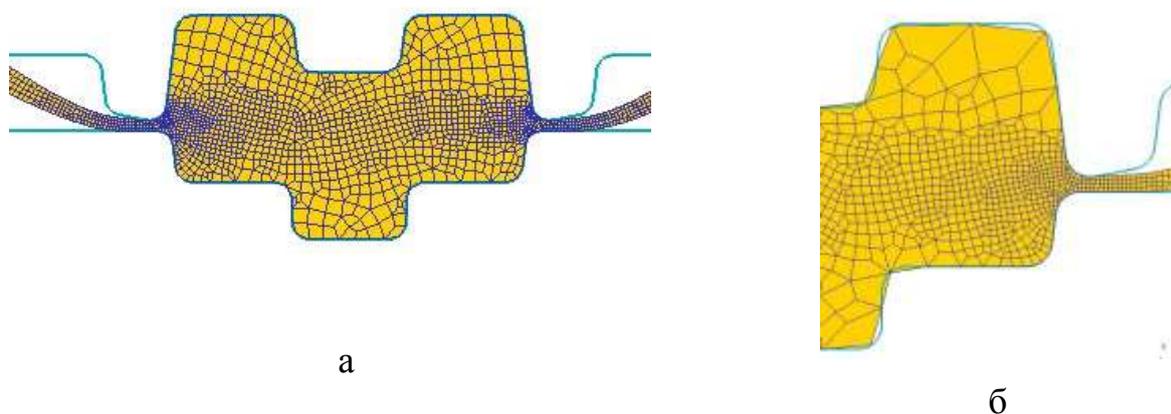


Рисунок 1.20 - Исчерпание пластичности в опасном сечении заготовки при осуществлении процесса вытяжки цилиндрического стаканчика с прижимом

4. Укрупнение сетки при малом количестве конечных элементов недостаточном для корректного описания деформируемого тела. Подобная ошибка возникает в том случае, когда программа расчёта может перестраивать сетку в автоматическом режиме. На рисунке 1.21,а показана сетка до

автоматического перестроения. В зоне облойной канавки наблюдается интенсивное течение материала, что приводит к значительному искажению сетки. Для избежания больших погрешностей расчёта, связанных с искажением формы КЭ программа автоматически перестраивает сетку, с параметрами, ориентированными на участок наиболее интенсивного течения металла. Поскольку общее число КЭ недостаточно для корректного описания заготовки в целом, то в полости штампа с менее интенсивным течением металла возникают грубые искажения геометрии заготовки (рисунок 1.21, б).

Для того чтобы избежать подобную ошибку в ряде случаев можно использовать локальное сгущение сетки, которое позволяет построить сетку с небольшим количеством КЭ но при этом в областях интенсивного течения металла, за счёт смещения КЭ друг относительно друга их деформация будет небольшой и необходимость перестроения сетки не будет возникать.

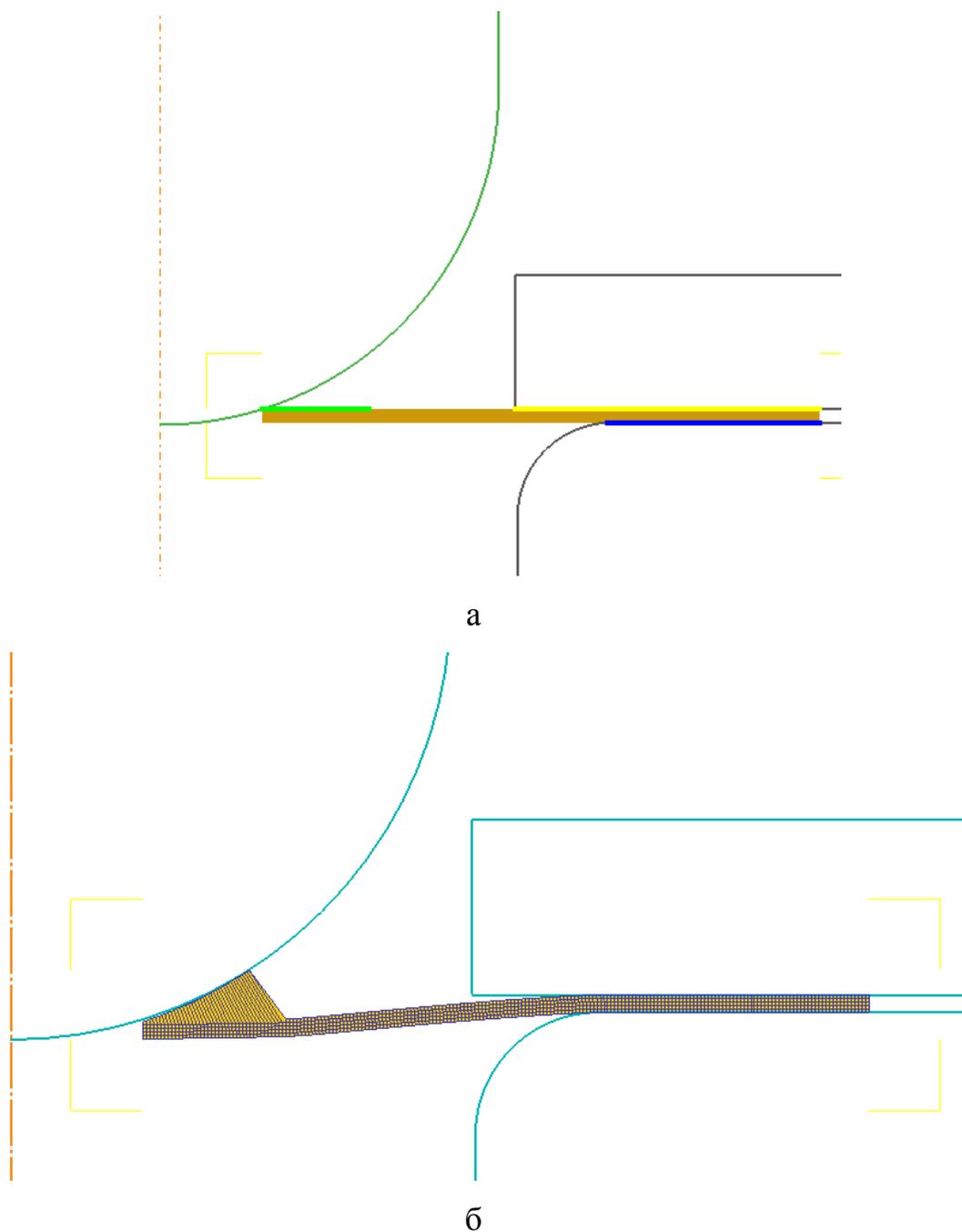


а – сетка до перестроения; б – сетка после перестроения

Рисунок 1.21 - Укрупнение сетки при автоматическом перестроении в ходе расчета

5. Прилипание сетки КЭ из-за перестроения геометрии объектов без корректировки контактной поверхности. Ошибка может появиться, в случае если не была создана новая контактная поверхность при замене геометрии инструмента. На рисунке 1.22 показана иллюстрация ошибки: на рисунке 1.22,а

– первый шаг расчета вытяжки с неправильно заданной контактной поверхностью, на рисунке 1.22,б - результат расчета.



а – заданная контактная поверхность; б – результат расчета

Рисунок 1.22 - Ошибка задания контактных поверхностей

```

Summary Preview Message Log Memo
ORIGINAL COLUMN HEIGHT (SUM) = 138940
RENUMBERED COLUMN HEIGHT (SUM) = 137884

DIRECT METHOD

ITERATION VELOCITY RELATIVE VELOCITY RELATIVE FORCE
NUMBER NORM ERROR NORM ERROR NORM

1 0.2083385643E+02 0.2772906911E-02 0.5754265744E+02

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATION VELOCITY RELATIVE VELOCITY RELATIVE FORCE
NUMBER NORM ERROR NORM ERROR NORM

1 0.2085278279E+02 0.1162941878E-02 0.7588559995E-02
2 0.2085716664E+02 0.2982912188E-02 0.3132950700E-02
3 0.2083311830E+02 0.2113302352E-03 0.2443611684E-03

UPDATED TIME/STROKE = 0.297065E+01 0.297065E+01
TIME/STROKE INCREMENT = 0.300000E-01 0.300000E-01

STEP NUMBER = 101

PROFILE REDUCTION!
ORIGINAL COLUMN HEIGHT (SUM) = 138940
RENUMBERED COLUMN HEIGHT (SUM) = 137884

DIRECT METHOD

ITERATION VELOCITY RELATIVE VELOCITY RELATIVE FORCE
NUMBER NORM ERROR NORM ERROR NORM

1 0.2083146856E+02 0.2817002403E-02 0.6339166074E+02

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

```

Рисунок 1.23 - Сведения о текущем этапе выполнения расчета

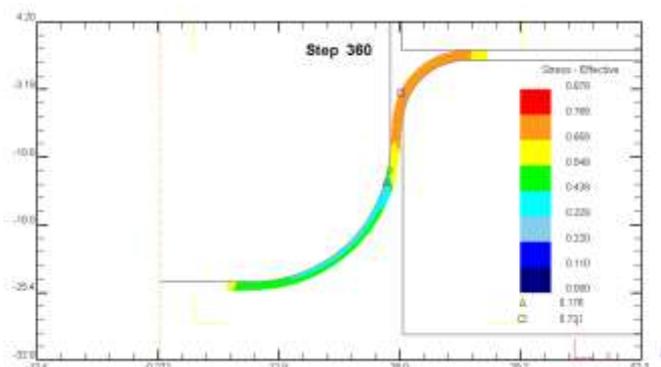
По окончании расчета выводится сообщение (Message) «Simulation is completed and stopped at the user specified time step» - Остановка расчета завершена в соответствии с настройками пользователя.

### 1.8 Анализ результатов моделирования

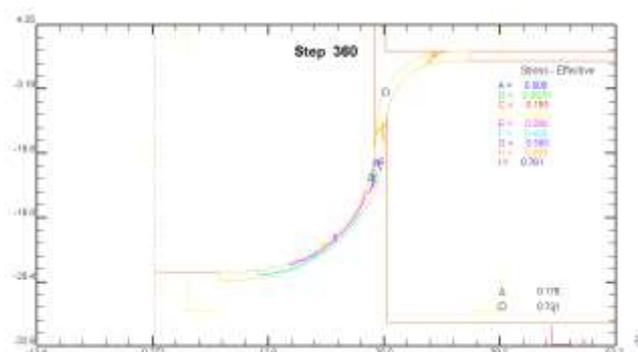
После завершения расчета для оценки результатов используются постпроцессор, который позволяет представить полученную информацию в наглядном и удобном для анализа виде.

В качестве исследуемых величин, как правило, выступают: деформации, напряжения, усилия, скорости течения металла и др. При этом информация может быть представлена в векторном или скалярном виде, с помощью графиков, картинок или таблиц. Как правило, при представлении данных в виде

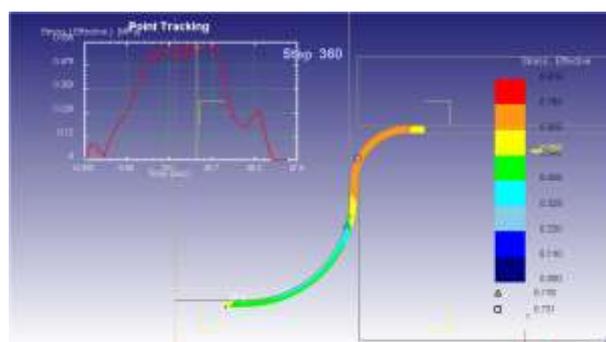
картинок используется режим изолиний или полутоновый режим. При этом информация может быть отражена для текущего шага как без учета других шагов, так и с их учетом.



а



б



в

а –напряжения в заготовке при вытяжке-отбортовке в полутоновом режиме;

б – то же в режиме изолиний; в – график изменения напряжений в точке

Рисунок 1.24 - Представление полученной в результате расчёта информации

## 2 КОВКА

### 2.1 Осадка поковок плоскими бойками

Цель работы: компьютерное моделирование холодной осадки цилиндрических заготовок из алюминия с помощью программного комплекса *DEFORM-2D* и анализ технологических параметров процесса, влияющих на характер распределения напряженно-деформированного состояния.

#### Краткие теоретические сведения

Осадка металла поковок плоскими бойками является простейшей и наиболее распространенной операцией обработки металлов давлением.

подавляющее большинство кузнечных слитков перед дальнейшей ковкой проходит операцию осадки. Осадка используется также при ковке дисков, валов с фланцами, плит и т.д.

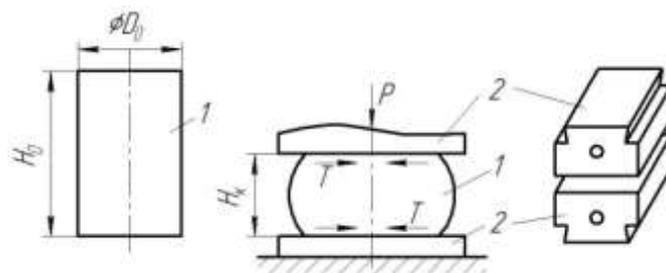
Помимо этого, элементы осадки имеют место почти во всех других кузнечных операциях, кузнечной протяжке, первых стадиях выдавливания, прессования и прошивки в закрытых матрицах, открытой прошивки, первой стадии штамповки тел самой разнообразной формы.

Операция осадки имеет два самостоятельных значения:

- 1) получение в кованном изделии требуемых физико-механических свойств;
- 2) получение поковки требуемых размеров.

Сущность процесса осадки заключается в уменьшении размера в направлении действия приложенной активной силы  $P$  и одновременном увеличении поперечного сечения осаживаемой заготовки 1 (рисунок 2.1).

В качестве инструмента при осадке используют параллельно расположенные бойки 2, один из которых крепится к подвижному органу кузнечной машины, а второй закрепляется на столе прессы или молота. Верхний боек совершает возвратно-поступательное движение [11].



1 – заготовка, 2 – бойки

Рисунок 2.1. Схема осадки цилиндрических заготовок

Течение металла в процессе осадки происходит неравномерно вследствие влияния сил трения  $T$  (рисунок 2.1), возникающих на контактной плоскости между металлом и бойками. Эти силы трения тормозят смещение слоев металла, примыкающих к плоскости инструмента в радиальном направлении. Слои металла, удаленные от контактных плоскостей, деформируются интенсивнее. Важнейшим проявлением этой неравномерности является превращение свободной боковой поверхности осаживаемой заготовки, ранее бывшей прямолинейной, в криволинейную. Цилиндрическая заготовка приобретает бочкообразный вид. Чем больше силы трения на контактных поверхностях, тем сильнее отстает течение слоев металла, примыкающих к контактным плоскостям, от течения центральных слоев металла, и тем больше кривизна боковой поверхности осаживаемой заготовки после деформации.

При осадке заготовки с отношением исходной высоты  $H_0$  к исходному диаметру  $D_0$  менее двух, наибольший диаметр бочки получается обычно на середине высоты (рисунок 2.1). При неодинаковых условиях трения (температуры) на торцах заготовки наибольший диаметр может смещаться вверх или вниз.

Весь объем деформируемой заготовки можно условно разбить на три зоны деформации (рисунок 2). Зона *I* состоит из двух областей «затрудненной» деформации, прилегающих к торцам заготовки. Зона *II* в осевом сечении заготовки имеет крестообразную форму, в этой зоне наблюдается наиболее интенсивная деформация. В зоне *III* интенсивность деформации больше, чем в

зоне *I*, но меньше, чем в зоне *II*. При осадке заготовок из малопластичных материалов в зоне *III* возможно образование трещин, расположенных вдоль образующей [12].

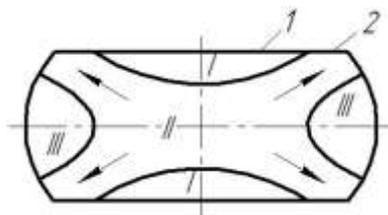


Рисунок 2.2 - Зоны деформации при осадке

Области деформации *I* и *II* образуют на каждом торце заготовки две зоны: внутреннюю 1, в которой металл практически не перемещается, и наружную кольцевую 2, в которой происходит интенсивное течение металла в радиальном направлении.

При  $H_0/D_0 > 1$  увеличение торцевой поверхности исходной заготовки происходит главным образом за счет перетекания металла с боковой поверхности заготовки.

По мере увеличения степени осадки и сближения между собой зон *I*, последние сливаются с зоной *II*, а торцевые поверхности при  $H/D < 1$  начинают увеличиваться главным образом за счет течения поверхностных слоев металла в радиальном направлении, причем переход боковой поверхности на торцы уменьшается. При этом также значительно уменьшается зона *III* – деформация по всему объему тела становится более однородной и бочкообразность заготовки уменьшается.

При  $H_0/D_0 > 2$ , т.е. когда зоны *I* весьма удалены друг от друга в начальный момент осадки можно наблюдать образование двойной бочки, а при  $H_0/D_0 > 2,5$  – образование двух бочек с недеформированной еще цилиндрической частью между ними (рисунок 2.3). В обоих случаях по мере сближения зон *I* заготовка постепенно принимает вид обычной бочки. Однако при  $H_0/D_0 > 2,5-3,0$  осадка цилиндрической заготовки, как правило, сопровождается продольным изгибом.

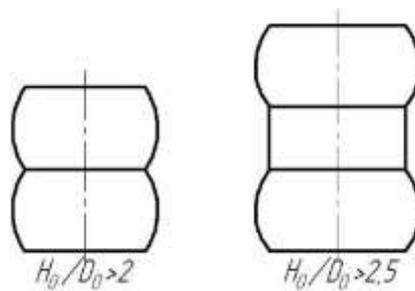


Рисунок 2.3 - Схемы деформации высоких заготовок

С увеличением степени деформации при осадке

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_k}{H_0} 100\%$$

бочкообразность заготовки сначала увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается. Бочкообразность у низких заготовок меньше, чем у высоких. Повышение контактного трения во всех случаях увеличивает бочкообразность.

Для анализа процесса осадки цилиндрической заготовки применяют осесимметричное напряженное состояние. При его рассмотрении удобно пользоваться взамен декартовых цилиндрическими координатами, в которых положение любой точки  $A$  определяется радиус-вектором  $R$ , полярным углом  $\theta$  и аппликатой  $z$ , как представлено на рисунок 2.4.

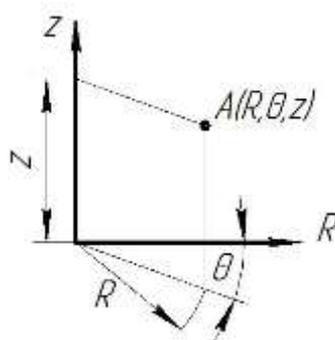


Рисунок 2.4. Цилиндрическая система координат

Напряженно-деформированное состояние в любой точке деформируемой заготовки в цилиндрической системе координат описывается симметричными тензорами напряжений и деформаций

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_R & 0 & \tau_{Rz} \\ 0 & \sigma_{\theta} & 0 \\ \tau_{zR} & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_R & 0 & \frac{1}{2}\gamma_{Rz} \\ 0 & \varepsilon_{\theta} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{zR} & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix},$$

где  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_z$  – радиальное, тангенциальное и осевое нормальные напряжения соответственно;

$\tau_{Rz}$  – касательное напряжение;

$\varepsilon_R$ ,  $\varepsilon_{\theta}$ ,  $\varepsilon_z$  – радиальная, тангенциальная и осевая деформации соответственно;

$\gamma_{Rz}$  – угловая деформация.

Интегральными характеристиками напряженно-деформированного состояния в рассматриваемой точке деформируемой заготовки являются:

- 1) интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_R - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_R)^2 + 6\tau_{Rz}^2}$$

- 2) интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_{\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_R)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{Rz}^2}$$

Схема главных нормальных напряжений при осадке представляет собой схему всестороннего неравномерного сжатия. По схеме деформации осадка представляет собой сжатие – деформация в направлении активного усилия отрицательна, а две другие деформации положительны (рисунок 2.5).

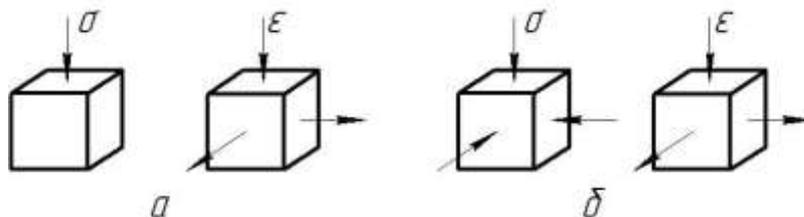


Рисунок 2.5. Схемы главных напряжений и деформаций при осадке без контактного трения (а) и с контактным трением (б)

Об эпюрах распределения нормальных напряжений на контактных

поверхностях можно судить по высоте гребешков, получаемых в процессе осадки цилиндрических образцов в бойках с вертикальной узкой щелью (рисунок 2.6).

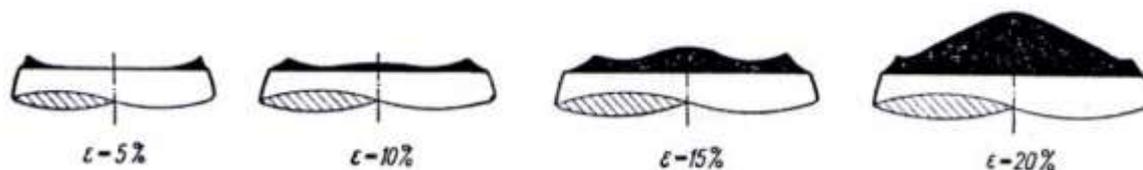


Рисунок 2.6. Изменение высоты гребешка в зависимости от степени осадки

При малых степенях деформации и высоких заготовках эпюры распределения нормальных контактных напряжений могут иметь вогнутый характер, т.е. напряжения в периферийных областях контактной плоскости больше, чем в центре. При большой степени деформации и низких заготовках напряжения в центральной области превосходят напряжения на периферийных областях контактной плоскости.

Из изложенного следует, что процесс деформации металла при осадке цилиндрических заготовок плоскими параллельными бойками весьма сложен.

## Порядок выполнения работы

### Описание программного комплекса *DEFORM-2D*

Программный комплекс *DEFORM-2D* предназначен для моделирования процессовковки, объемной штамповки, волочения, прокатки, прессования и содержит следующие особенности:

1. Условное деление на препроцессор, процессор (решатель) и постпроцессор, что позволяет сделать работу для пользователя наиболее удобной и наглядной.

2. Представление всей информации в файле базы данных с расширением «*bd*», который создается в препроцессоре и содержит необходимую для расчёта информацию, а после осуществления моделирования

дополняется результатами расчета и может быть использован для работы в постпроцессоре.

3. Поскольку в файле базы данных информация представляется в виде, удобном для расчёта, т.е. таком виде, чтобы решатель мог быстро прочитать этот файл и дописать в него полученную информацию, то файл базы данных имеет большой объём, поэтому перемещать и копировать файл базы данных в большинстве случаев неудобно. Поэтому в программе *DEFORM-2D* формируется небольшой файл с расширением «*key*», который в компактном виде содержит всю информацию, необходимую для создания базы данных.

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D*, указав левой кнопкой мыши (ЛКМ) последовательно **Пуск** → **Программы** → *DEFORM-2D*. Будет вызвано **Главное окно** *DEFORM-2D*, показанное на рисунок 2.7.

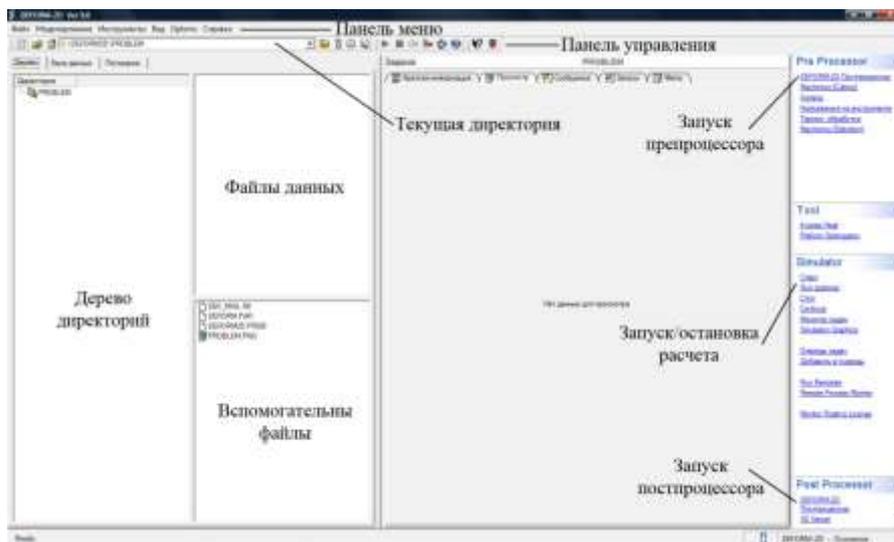


Рисунок 2.7. -Главное окно *DEFORM-2D*

Рассмотрите расположение панелей и кнопок. В верхней части окна находится **Панель меню**, содержащая меню: **Файл**, **Моделирование**, **Инструменты**, **Вид**, **Настройки**, **Справка**. Рассмотрим наиболее часто используемые команды меню – **Файл** и **Моделирование**.

Меню **Файл** содержит команды, используемые для создания новых задач,

и перемещения между директориями каталога операционной системы. Команда **Новая задача**  позволяет создать новую задачу и запустить препроцессор, позволяющий задавать исходные данные. Команда **Выход**  позволяет выйти из программы.

Меню **Моделирование** необходимо для запуска задачи на расчет и управления задачами в ходе расчета. Для запуска задачи на расчет и аварийной остановки расчета используются команды **Старт**  и **Стоп** , вынесенные на **Панель управления**, расположенную непосредственно под **Панелью меню**.

В левой части экрана в **Главном окне** расположено **Дерево директорий**, которое отражает текущее расположение задачи по отношению к **Дереву каталогов**. В активной строке **Текущая директория** указана директория (папка) являющаяся корневой в окне **Дерево директорий**.

Создайте новую задачу, выбрав из меню **Файл** пункт **Новая задача** или нажав кнопку  на **Панели управления**.

Появится окно **Параметры задачи**, в котором необходимо определить особенности моделируемого процесса. Не указывая тип решаемой задачи, нажмите кнопку **Next**, для того чтобы запустить препроцессор (тип задачи можно определить в препроцессоре).

В следующем окне снова нажмите на кнопку **Next**, приняв, что задача создается в "домашней" директории (по умолчанию это директория «*PROBLEM*», расположенная в папке «*DEFORM-2D*»).

В появившемся окне необходимо указать название задачи. Название задачи должно быть набрано английскими литерами без пробелов. Дайте название задачи, набрав *OSADKA*.

Нажмите кнопку **Finish**, произойдет запуск препроцессора *DEFORM-2D*. Его интерфейс состоит из нескольких частей (рисунок 2.8), а именно: **Окно-дисплей** (*Display window*), **Дерево Объекта** (*Object Tree*) и **Данные объекта** (*Object Data*). Также вверху экрана находится **Панель меню** и **Панель управления**, содержащие ряд кнопок. Наиболее часто используемые кнопки, расположенные на **Панели управления** представлены в приложении А.

Нажмите кнопку **Simulation controls**  (настройки задачи), появится окно **Simulation controls**, в котором по умолчанию будет активна закладка **Основное** (рисунок 2.9). Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» (напротив надписи «СИ» должен стоять флажок) и выбран режим расчета деформаций (галочка напротив надписи «Деформирование»), а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (флажок напротив «Осесимметричная»). Для завершения работы с окном **Настройки задачи** нажмите кнопку **ОК**.

Обратите внимание на то, что в **Дереве объектов** после создания задачи был создан всего один исходный объект, а именно *Workpiece* (заготовка). Этот объект выделен в **Дереве объектов**, а на **Панели инструментов** активен пункт

**Общее**  **Общее** (рисунок 2.10).

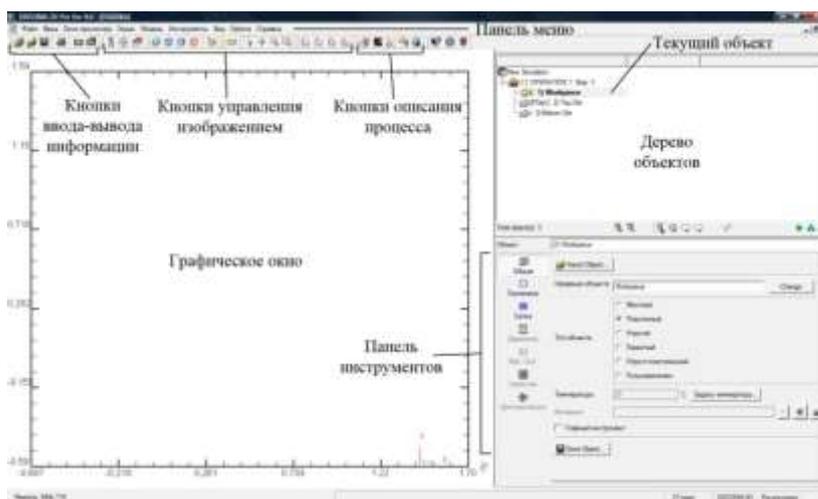


Рисунок 2.8 - Интерфейс препроцессора

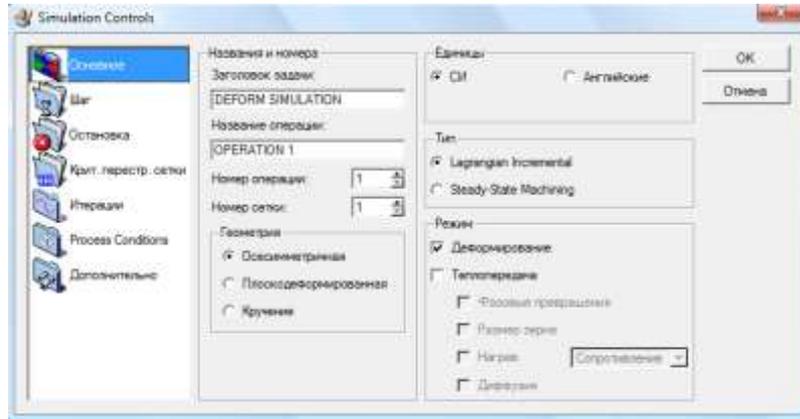


Рисунок 2.9 - Окно **Настройки задачи**

Пункт **Общее** позволяет:

- 1) выбрать тип объекта участвующего в расчете (жесткий, упругий, пластичный, пористый и упруго-пластичный);
- 2) выбрать марку материала из библиотеки;
- 3) указать исходную температуру объекта;
- 4) сохранять в отдельном файле и импортировать объект из задач, которые решались ранее.

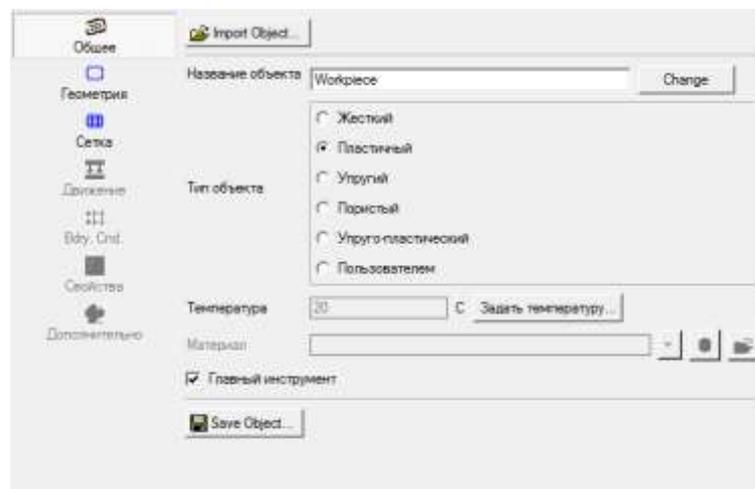


Рисунок 2.10 - Пункт **Общее** из **Панели инструментов**

Все типы объектов используемые в *DEFORM-2D* кроме жесткого объекта, должны иметь сетку конечных элементов.

Непосредственно под пунктом **Общее** на **Панели инструментов**

располагается пункт **Геометрия**  Геометрия, позволяющий работать с геометрией моделируемых объектов.

### Построение модели заготовки

По умолчанию при создании новой задачи программа сама создает в **Дереве объектов** один объект – заготовку. Геометрия объектов может быть получена построением по точкам, с помощью геометрических примитивов или импортирована из «*dxf*» и «*igs*» файлов.

Пункт **Геометрия** содержит четыре закладки (рисунок 2.11). Наиболее часто используемые кнопки пункта **Геометрия** представлены в приложении Б. По умолчанию осуществляется переход на закладку **Инструмент**, которая позволяет импортировать геометрию объекта из других программ, создавать геометрию с помощью примитивов, сохранять уже имеющуюся геометрию и т.д. Для создания и редактирования геометрии с помощью средств *DEFORM-2D* служит закладка **Edit** (редактирование), содержащая **Поле ввода геометрии** (пустая табличка) и вспомогательные кнопки. Построение геометрии может осуществляться по точкам (*XYR*) или с помощью отрезков-дуг (*Line-Arc*).

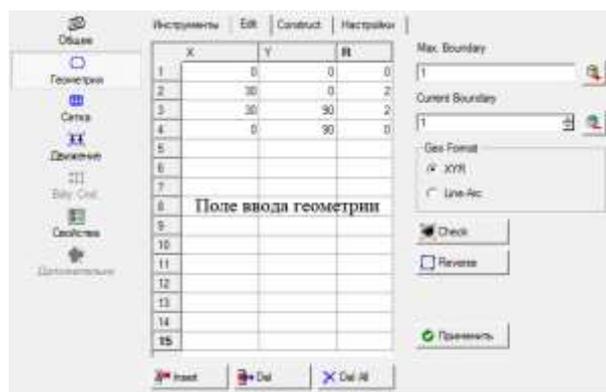


Рисунок 2.11 - Пункт **Геометрия** из **Панели инструментов**

Так как исходная заготовка диаметром 60 мм и высотой 90 мм осесимметричная (рисунок 2.12, а), то для моделирования достаточно

рассмотреть ее правую часть.

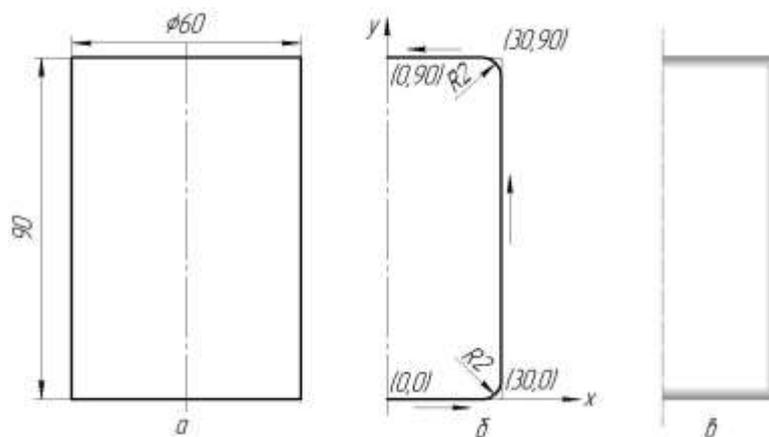


Рисунок 2.12 - Геометрия заготовки

Перейдите к закладке **Edit** (рисунок 2.11). Нажмите ЛКМ на верхнюю левую ячейку **Поля ввода геометрии**, после чего последовательно введите значения, представленные на рисунок 2.12, б. После ввода очередного значения, соответствующего данной ячейке, нажимайте на клавишу *Enter*, для перехода к следующей ячейке. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить**  Применить.

Разделение десятых долей осуществляется с помощью точки. При правильном вводе информации, введенные ранее значения должны выравниваться по правому краю ячейки.

Нажмите кнопку **Во весь экран**  на **Панели управления** для автоматического масштабирования изображения (функция этой команды будет объяснена ниже).

Рассмотрите полученную геометрию цилиндрической заготовки на рисунок 2.12, в. Обратите внимание на то, что с внутренней стороны поверхности располагается серая полоса, которая показывает направление обхода от начальной точки к конечной против часовой стрелки (определяет внутреннюю область объекта). Если серая полоса располагается с внешней стороны, то необходимо изменить направление обхода, нажав на кнопку

**Reverse**  Reverse (разворот). Если серую полосу не видно, то необходимо выбрать ЛКМ пункт **Общее** затем выбрать ЛКМ пункт **Геометрия**.

После того как геометрия построена, ее желательно проверить. Нажмите кнопку **Check**  Check (проверить), а затем в появившемся окне (рисунок 2.13) нажмите на кнопку **Check&Correct Geometry** (проверить и исправить геометрию). Должно появиться сообщение «*Geometry is legal*», которое сообщает о том, что геометрия была построена верно. Для возвращения к пункту **Геометрия** нажмите ЛКМ клавишу **ОК** и еще раз **ОК**.

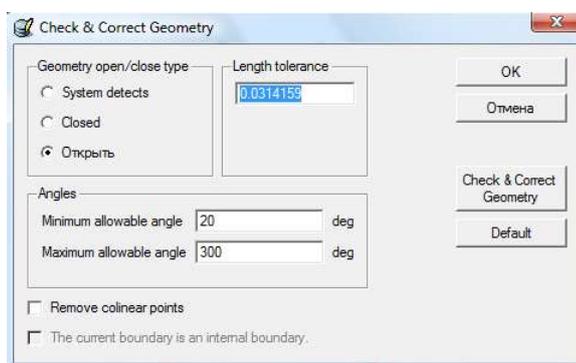


Рисунок 2.13 - Окно **Check&Correct Geometry**

Вызовите для редактирования заготовку (укажите ЛКМ в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece*) и убедитесь в том, что в пункте **Общее** стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка**  Сетка, задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**. Обратите внимание на то, что после редактирования сетки конечных элементов напротив надписи *Workpiece* в **Дереве объектов** появилась надпись «*undefined*». Значок  (*undefined*) означает, что необходимо присвоить материал заготовке (определить свойства материала заготовки).

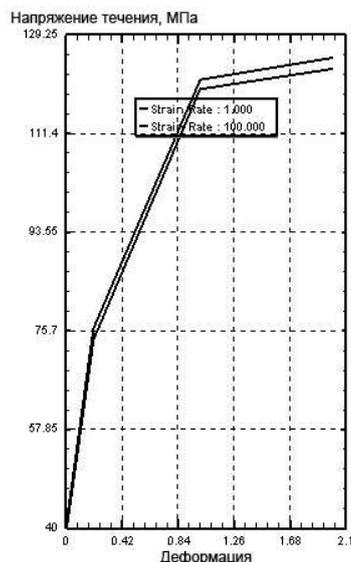


Рисунок 2.14 - Диаграмма «напряжение-деформация» сплава AL-1100

Перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library**  (загрузить материал из библиотеки), расположенную в строке **Материал**. Появится окно **Material Library** (библиотека материалов), в котором выберите группу материалов «*Aluminum*» (алюминиевые сплавы) и марку сплава «*Al-1100, COLD[70F(20C)]*», после этого нажмите ЛКМ на кнопку **Загрузить**. Обратите внимание на то, что вместо надписи «*undefined*» в **Дереве объектов** появилось название марки материала.

Просмотреть и отредактировать свойства выбранного материала можно, нажав на кнопку **Материал**  на **Панели управления**. Появится окно **Материал**, в котором на соответствующих закладках заданы все свойства материала. Например, нажав на кнопку  в строке **Flow Stress** (напряжение течения) на закладке **Пластичный**, можно просмотреть и отредактировать диаграмму «напряжение-деформация» (Ошибка! Источник ссылки не найден.).

### Построение модели инструмента

Для добавления в решаемую задачу дополнительного объекта (инструмента) воспользуйтесь кнопкой **Добавить объект** , которая находится под **Деревом объектов**. После добавления объекта в **Дереве объектов** появится

объект *Top Die* (верхний инструмент). Добавьте по аналогии с предыдущим пунктом объект *Bottom Die* (нижний инструмент). Инструмент (бойки) моделируют недеформируемым (тип объекта «Жесткий» в пункте **Общее**).

Каждый из объектов, созданных в программе, обладает набором индивидуальных свойств. В рассматриваемой нами задаче геометрия верхнего и нижнего объекта будет различной. Для задания геометрии тому или иному объекту необходимо выделить его щелчком ЛКМ в **Дереве объектов**, после чего система будет присваивать свойства (геометрию) именно этому объекту.

Сделайте активным верхний инструмент *Top Die* (укажите ЛКМ *Top Die* в **Дереве объектов**). С помощью геометрических примитивов, доступ к которым осуществляется через пункт **Геометрия** на **Панели инструментов** (закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**), постройте нижний инструмент с размерами по высоте 10 мм и радиусом 60 мм (рисунок 2.15). Для этого в окне **Geometry Primitive** (геометрические примитивы) необходимо выбрать тип объекта «*Cylinder*» и ввести при помощи клавиатуры в области **Размер** в строках **Width** (ширина) и **Height** (высота) значения, соответственно, 60 и 10 мм (рисунок 2.16). Нажать ЛКМ на кнопку **Create** (создать), а затем **Заккрыть**. Изображение в окне **Display** после задания геометрии верхнего инструмента приведено на рисунок 2.17, а.

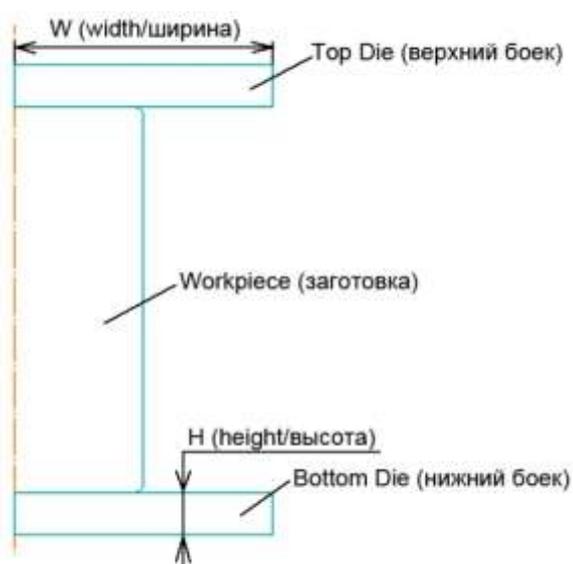


Рисунок 2.15 - Модель осадки

Для расположения объектов по отношению друг к другу необходимо воспользоваться пунктом **Object positioning**  (позиционирование объектов), который располагается на **Панели управления**. Описание команд данного пункта приведено в приложении В.

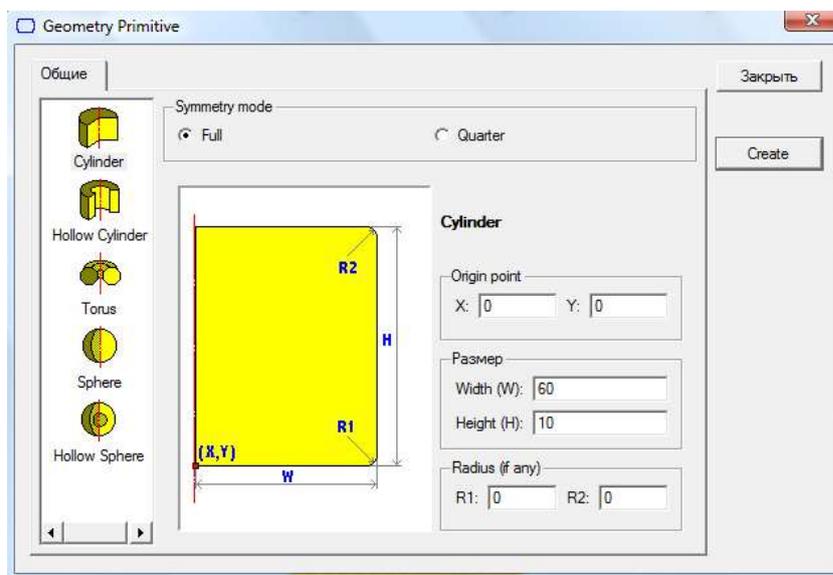


Рисунок 2.16. Окно **Geometry Primitive**

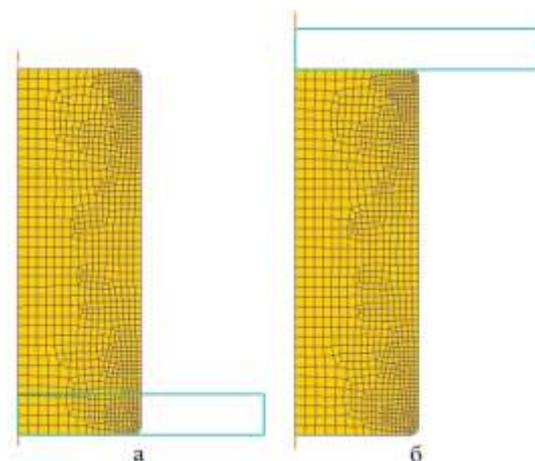


Рисунок 2.17. Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а) и позиционирования (б) верхнего инструмента

Для наиболее точного и быстрого расположения объектов так, как это показано на рисунок 2.17, б, воспользуйтесь командой **Интерференция** окна

**Позиционирование объектов.** Для использования команды необходимо установить флажок напротив надписи «Интерференция».

Затем нужно выбрать позиционируемый объект (в нашем случае *Top Die*) и объект, относительно которого будут размещены другие объекты (удобно использовать *Workpiece*). Определите объект, который будет размещаться или позиционироваться, нажатием ЛКМ на треугольник  в строке **Позиционируемый объект** и выберите *Top Die*. В строке **Относительно**, с помощью меню вызываемого нажатием ЛКМ на треугольнике , выберите объект *Workpiece*.

Далее необходимо определить часть позиционируемого объекта, которая касается объекта, относительно которого осуществляется позиционирование (часть *Top Die*, которая касается *Workpiece*). Поскольку верхний инструмент (*Top Die*) касается заготовки (*Workpiece*) своей нижней частью, то необходимо поставить флажок напротив надписи «-Y» в блоке **Approachdirection** (направление сближения). Нажмите ЛКМ кнопку **Применить**. Произошло расположение объектов так, как это показано на рисунок 2.17, б. Нажмите ЛКМ на кнопку **ОК**.

Сделайте активным нижний инструмент *Bottom Die* (укажите ЛКМ *Bottom Die* в **Дереве объектов**). По аналогии с верхним инструментом постройте с помощью геометрических примитивов нижний инструмент, приняв значения в строках **Width** и **Height**, соответственно, 60 и 10 мм.

По аналогии с верхним инструментом осуществите позиционирование нижнего инструмента. Только за направление сближения выберите «Y» в блоке **Approachdirection**, а в качестве позиционируемого объекта *Bottom Die*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунок 2.18.



Рисунок 2.18. Расположение заготовки и бойков на начальном этапе осадки

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  (взаимодействие объектов), расположенную на **Панели управления**, и на запрос системы о необходимости создания контактных пар, в появившемся окне ответьте положительно (нажмите кнопку **Yes**).

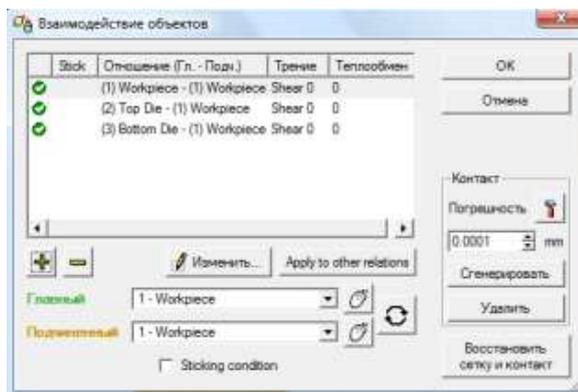


Рисунок 2.19 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

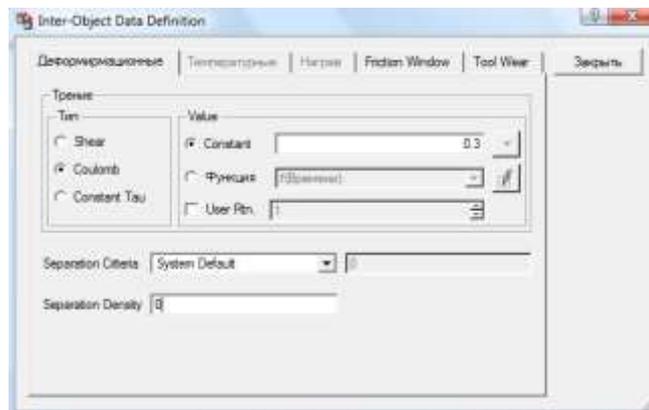


Рисунок 2.20 - Окно **Inter-Object Data Definition**

В окне **Взаимодействие объектов** (рисунок 2.19) нажмите кнопку **Изменить**  **Изменить...**, в появившемся окне поставьте флажок напротив надписи «*Coulomb*» (закон трения по Кулону) и укажите коэффициент трения равный 0,3 (рисунок 2.20). Нажмите кнопку **Закреть** в окне **Inter-Object Data Definition** (определение свойств взаимодействия объектов). Нажмите на кнопку **Apply to other relations** (применить к другим парам) для того, чтобы присвоить значения коэффициента трения (условия взаимодействия объектов) всем контактными парам.

Для генерации величины точности, с которой компьютер может создать контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта, при этом в окне **Display** появится изображение мест контакта (разноцветные точки в местах взаимодействия объектов). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

### **Задание движения верхнего инструмента**

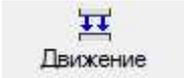
В программе *DEFORM-2D* двигаться может любой объект, причём нет ограничений по количеству двигающихся объектов. Двигаться объекты могут как под действием приложенного усилия (т.е. двигаться с определённым усилием), так и с заданной скоростью.

По умолчанию все объекты являются неподвижными, т.к. приложенные к

ним усилие и скорость равны нулю. Однако, если рассматривается процесс деформирования, то обязательно необходимо определить перемещение главного инструмента. Главным инструментом называется инструмент, под непосредственным перемещением которого осуществляется деформация заготовки.

В рассматриваемой нами задаче главным инструментом является *Top Die*, о чём свидетельствует значок «*PDie*», расположенный перед значком *Top Die* в **Дереве объектов**. При необходимости сделать главным инструментом можно любой объект с помощью постановки галочки в пункте **Главный инструмент** на закладке **Общее**.

Сделайте активным верхний инструмент *Top Die* для задания характеристики приложенного к верхнему инструменту движения (укажите *Top Die* в **Дереве объектов**).

Нажмите кнопку **Движение**  на **Панели инструментов**. Убедитесь, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в активное окно, расположенное в самом низу, 1 мм/с (рисунок 2.21).

В соответствии с заданными условиями нагружения верхний инструмент будет перемещаться вниз с постоянной скоростью 1 мм/с.

### Задание числа шагов расчета

Задание шага решения задачи может быть ограничено по времени и по перемещению главного инструмента. Для определения величины шага по перемещению необходимо произвести замер наименьшего размера сетки конечных элементов заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , расположенных на **Панели управления**, и данное значение разделить на три.

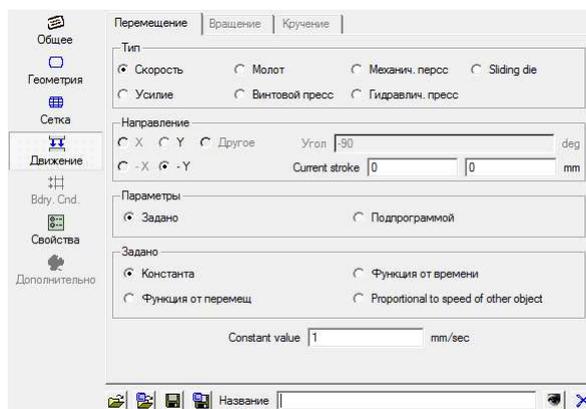


Рисунок 2.21 - Пункт Движение из Панели инструментов

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  на **Панели управления** и в появившемся окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг**. Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 2.22).

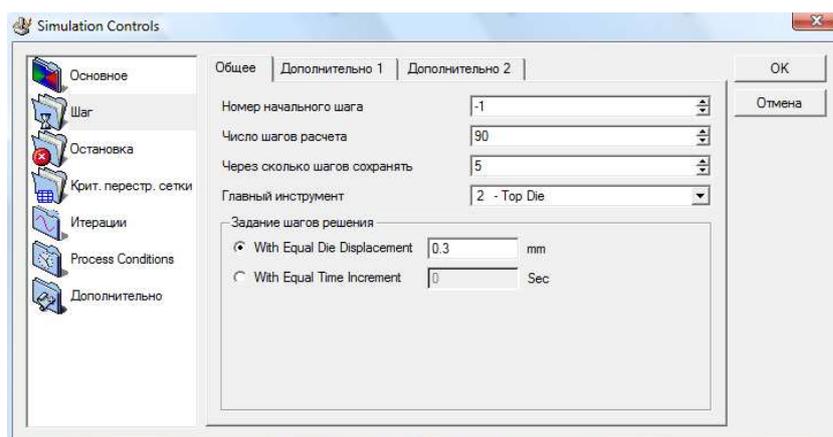


Рисунок 2.22 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Для того, что бы задать число шагов расчета необходимо перемещение главного инструмента разделить на размер шага по перемещению и полученное значение внести в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 2.22). Перемещение главного инструмента определяется величиной степени деформации  $\varepsilon = 30\%$  при осадке.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.



«*DEFORM-2D* Постпроцессор» (при локализации программного комплекса допущена ошибка в переводе). Произойдет запуск препроцессора.

Нажмите кнопку **Data base generation** . В появившемся окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**, в поле создания базы данных появится сообщение «Запись базы данных завершена», свидетельствующее о том, что база данных была успешно создана (после проверки исходных данных (а) и создания базы данных (б)

рисунок 2.23, б).

Выйдете из препроцессора, нажав ЛКМ на кнопку **Выход** , и убедитесь в том, что рядом с файлом с расширением «*key*» появился файл с расширением «*db*».

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** нажмите кнопку **Старт** или кнопку  на **Панели управления**. В появившемся окне с сообщением «*The simulation has been submitted*» нажмите ЛКМ на кнопку **ОК**.

Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных (файл с расширением «*db*») скрыт зелёной полосой с красной надписью **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается. Прежде чем перейти к следующему пункту работы, дождитесь, пока расчет закончится, т.е. исчезнет зелёная полоска и надпись **Running**.

### Анализ результатов моделирования

Для вывода информации полученной в ходе моделирования используется постпроцессор. Что бы открыть решаемую задачу в постпроцессоре нажмите ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

После загрузки задачи в постпроцессоре с помощью кнопок, представленных в приложении Г и Д, проведите анализ полученных

результатов моделирования. Перейдите на последний шаг расчета, нажав на кнопку **Last step**  (последний шаг) на **Панели управления**.

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 2.24) и векторному полю перемещений (рисунок 2.25). Для построения координатной сетки (рисунок 2.24) нажмите кнопку **Flow Net**  (динамическая сетка) на **Панели управления** и в появившемся окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* (прямоугольная) и снова нажмите **Next**. В новом окне укажите параметры сетки – введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 4 и 9. Нажмите ЛКМ кнопку **Next**, а затем **Finish**.

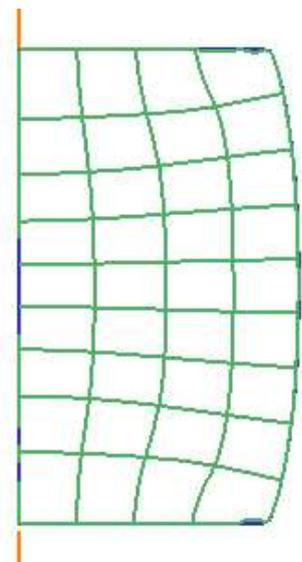


Рисунок 2.24 -  
Координатная сетка

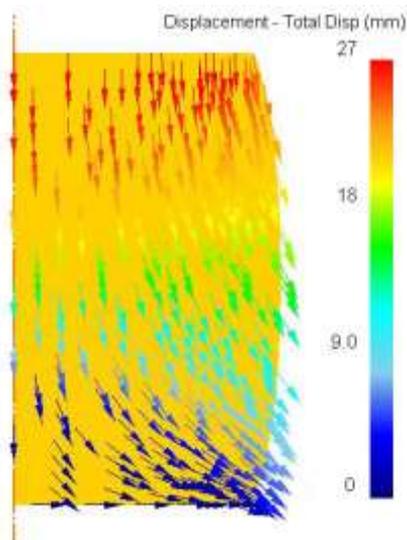
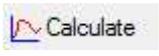


Рисунок 2.25 - Векторное  
поле перемещений

Для отображения векторного поля перемещений (рисунок 2.25) нажмите кнопку **Параметры**  на **Панели управления**, затем в окне **Параметры** в дереве переменных выберите тип переменной «*Displacement*» (перемещение) и подтип «*Total Disp*» (суммарное перемещение). В разделе **Экран** установите флажок напротив надписи «*Vector plot*» (векторное поле). Нажмите **Apply**, а затем **Close** для закрытия окна.

Опишите характер изменения усилия осадки (рисунок 2.26) и нормальных

напряжений на контактной поверхности (рисунок 2.27). Для построения графика усилия нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** , а затем в разделе **X-axis** (ось X) установите флажок напротив надписи «Перемещ». Нажмите **ОК**.

Перед построением графика изменения нормальных напряжений на контактной поверхности (рисунок 2.27) необходимо отобразить распределение этих напряжений в деформируемой заготовке. Для этого нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Stress*» (напряжение) и подтип «Z» (осевое). В разделе **Scaling** (масштаб) установите флажок напротив надписи «*Local*» (локальный масштаб для текущего шага). Нажмите **Apply**, а затем **Close**. Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Following Boundary** (по границе) и в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 1000. В окне **Display** щелчком ЛКМ укажите крайние точки контактной поверхности заготовка-боек (верхний или нижний). Нажмите на кнопку **Calculate**  (расчет), а затем **Заккрыть**.

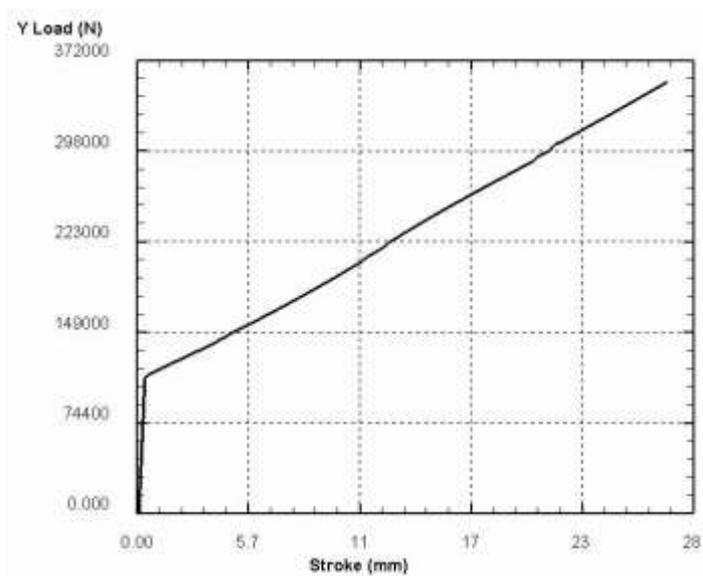


Рисунок 2.26 - График усилия осадки в зависимости от перемещения верхнего бойка

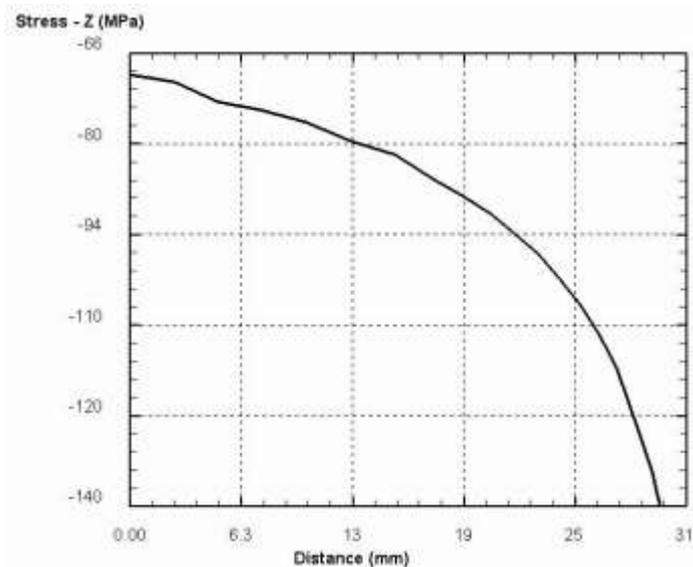


Рисунок 2.27 - График распределения нормальных напряжений на контактной поверхности заготовка-боек

Дайте анализ напряженно-деформированного состояния по рисунок 2.28 и рисунок 2.29. Как и в предыдущем случае для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций (рисунок 2.28) нажмите на кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*»). В разделе **Экран** установите флажок напротив надписи «*Solid*» (сплошной), а в разделе **Scaling** установите флажок напротив надписи «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

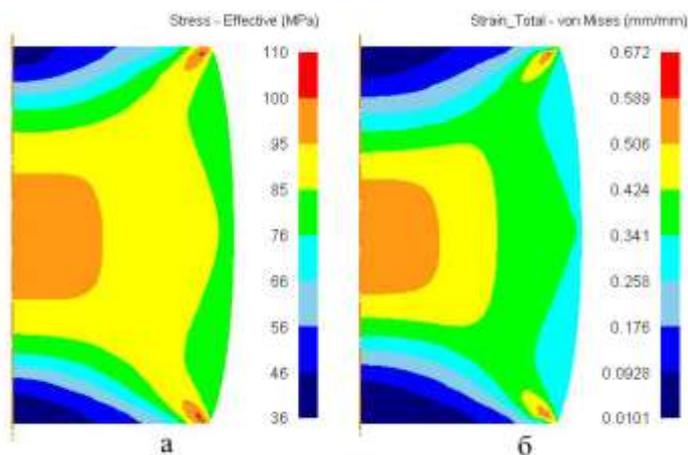


Рисунок 2.28- Распределение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б)

Для того чтобы узнать напряженное состояние в точке (рисунок 2.29, а), нажмите на кнопку **Элементы объекта**  и в появившемся окне перейдите на закладку **Stress** (напряжение). Затем щелчком ЛКМ в окне **Display** укажите анализируемую точку заготовки, при этом выбранный элемент изменит цвет на зеленый. В окне **ElementData** в строках **X/R**, **Y/Z**, **Z/Theta** и **XY/RZ** отображаются текущие значения соответственно радиального, осевого, тангенциального и касательного напряжений в МПа.

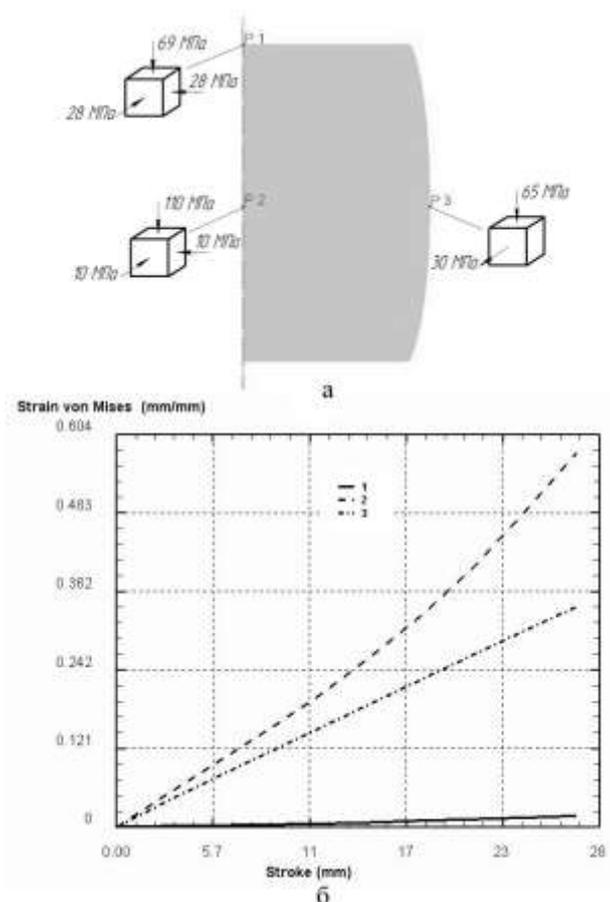


Рисунок 2.29 - Напряженное состояние (а) и характер изменения  $\varepsilon_i$  в зависимости от перемещения (б)

Перед построением графика изменения интенсивности деформаций (рисунок 2.29, б) необходимо отобразить распределение этих деформаций в деформируемой заготовке, используя кнопку **Параметры** . Затем нажать на кнопку **Отслеживание точек** , щелчком ЛКМ в окне **Display** указать нужные точки на заготовке и в окне **Отслеживание точек** нажать **Next**, а потом **Finish**.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса осадки;
  - схема осадки цилиндрической заготовки плоскими бойками.
4. Результаты моделирования осадки:
  - компьютерная модель осадки;
  - искажение координатной сетки и векторное поле перемещений при осадке;
  - график усилия осадки в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций;
  - схемы главных нормальных напряжений в центре осаженной заготовки и в области наибольшей бочкообразности;
  - график распределения нормальных напряжений на контактной поверхности заготовка-боек.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение процесса осадки заготовок между плоскими параллельными бойками.
2. Перечислите области использования осадки.
3. Перечислите основные зоны деформации при осадке.
4. Что можно наблюдать при осадке высоких заготовок?

5. Как влияют силы трения на течение металла при осадке?
6. Опишите схемы главных нормальных напряжений и деформаций при осадке.
7. В каких областях при осадке могут возникнуть трещины?
8. Как распределяются нормальные напряжения на контактной поверхности?
9. Для моделирования каких процессов ОМД используется программ *DEFORM-2D*?
10. Перечислите способы построения геометрии заготовок и деформирующего инструмента в *DEFORM-2D*.
11. За что отвечает окно **Simulation controls** (настройки задачи)?
12. Как расположить объекты по отношению друг к другу?
13. Как задают условия трения на контактных поверхностях заготовка-инструмент?
14. Как подсчитать число шагов по перемещению главного инструмента?
15. Зачем нужно создавать базу данных?
16. Какой инструмент называют главным?

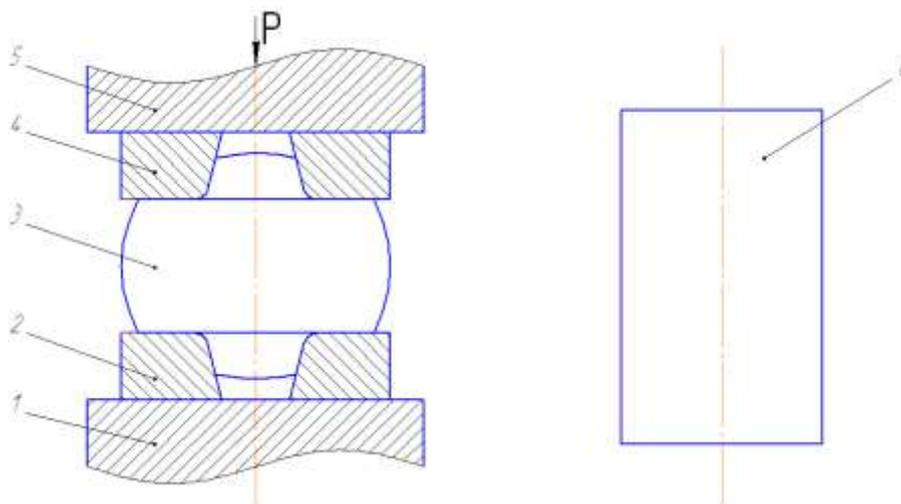
## **2.2 Осадка поковок на подкладном кольце**

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе осадки на подкладном кольце цилиндрической заготовки из алюминиевого сплава АД31 и привитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-2D.

### **Краткие теоретические сведения**

Осадка металла – операция обработки металлов давлением, в результате которой уменьшается высота, и одновременно увеличиваются поперечные размеры заготовок. Осадку применяют для получения формы поковки, с целью уменьшения глубины прошивки, для обеспечения соответствующего расположения волокон в будущей детали (при изготовлении шестерней обеспечивается повышенная прочность зубьев в результате радиального расположения волокон), как контрольную операцию (из-за значительной деформации по периметру на боковой поверхности вскрываются дефекты).

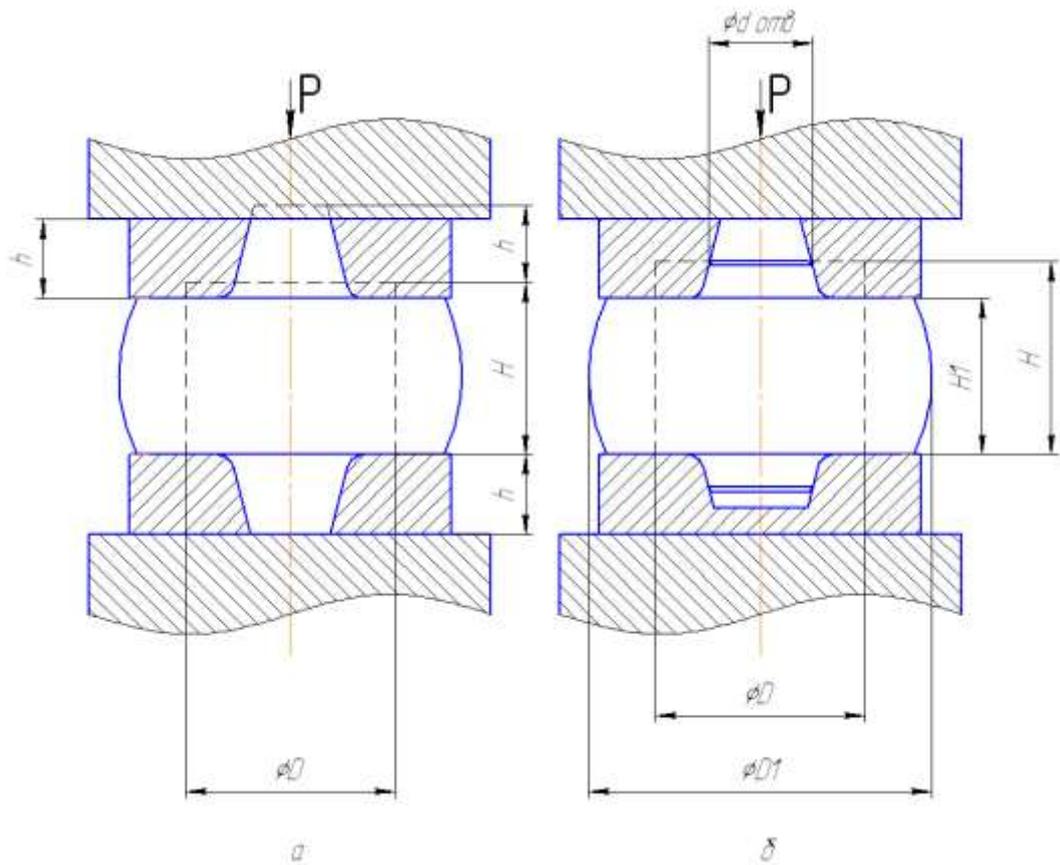
При выполнении осадки требуется, чтобы инструмент перекрывал заготовку. Вследствие трения боковая поверхность осаживаемой заготовки приобретает бочкообразную форму, это характеризует неравномерность деформации. Повторяя осадку несколько раз с разных сторон, можно привести заготовку к первоначальной форме или близкой к ней, получив при этом более высокое качество металла и одинаковые его свойства по всем направлениям.



1 – нижний боёк, 2 - нижнее кольцо, 3 – заготовка после осадки,  
 4 – верхнее кольцо, 5 – верхний боёк, 6 – заготовка  
 Рисунок 2.30 - Схема осадки в подкладных кольцах

Разновидностью осадки является осадка в подкладных кольцах (рисунок 2.31). Она позволяет выдавить отростки одновременно с обоих торцов заготовки, в результате чего поковка приобретает ступенчатую форму с утолщенной серединой. Осадку в подкладных кольцах (на плитах с отверстиями) производят по двум вариантам: с предварительной оттяжкой хвостовиков, которые помещаются в отверстия колец, и с затеканием металла в отверстия колец (рисунок 2.31).

Осадку в кольцах с затеканием металла применяют для получения изделий типа глухих шестерен, фланцев и дисков с бобышками, в тех случаях, когда высота бобышек сравнительно мала, так что оттяжка их затруднительна или нежелательна.

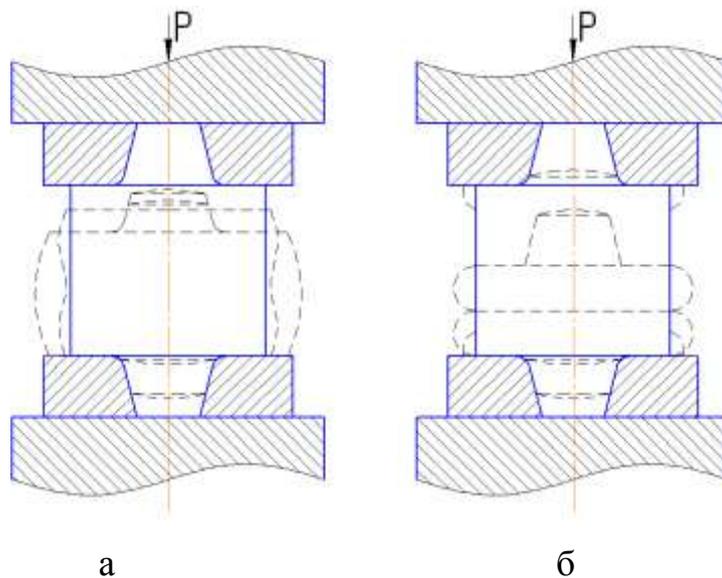


а – с предварительно протянутыми бобышками;

б – с затеканием металла в отверстия

Рисунок 2.31 - Осадка в подкладных кольцах

Осадке подвергают заготовки, для которых высота не превышает 2,5...3 диаметра. В противном случае возможен или продольный изгиб заготовки, или образование седлообразности. При осадке в кольцах высокой заготовки ( $H/D \geq 1$ ) с изменением соотношения  $d_{отв}/D$  формоизменение заготовки происходит по-разному. Так, при  $d_{отв}/D \leq 0,5$  вначале получается двойная бочка, но без зажима, при  $d_{отв}/D \geq 0,75$  – резкая двойная бочка, переходящая в зажим (рисунок 2.32).



а – без образования зажима; б – с образованием зажима

Рисунок 2.32 - Осадка в кольцах с затеканием металла в отверстия

Изменение высоты таково, что осадка примерно до 50% идёт с уменьшением общей высоты заготовки ( $d_{отв}/D \leq 0,5$ ). При  $d_{отв}/D \approx 0,5$  большая степень осадки (порядка 70%) даёт увеличение высоты. Это наглядно видно на рисунке 2.33, где показано изменение высоты заготовки в зависимости от величины сближения колец для разных отношений  $d_{отв}/D$ . Образцы были изготовлены из свинца и имели начальные размеры  $H_0 = 53$  мм и  $D_0 = 35$  мм.

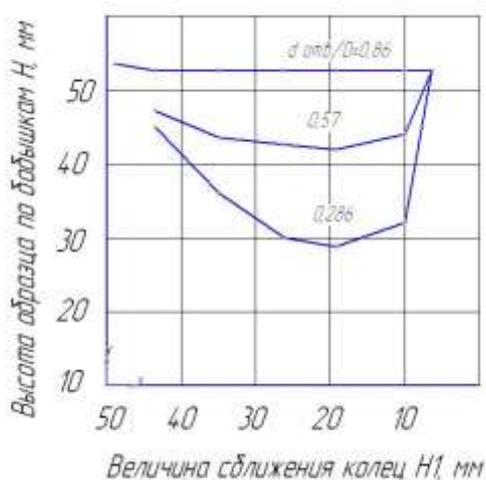


Рисунок 2.33 - Изменение высоты  $H$  заготовки в зависимости от расстояния  $H_1$  между кольцами при разных отношениях  $d_{отв}/D$

При осадке в кольцах с затеканием металла в отверстия бобышки получают именно затеканием. Толщину кольца берут равной высоте бобышки. Для облегчения удаления заготовки из колец после осадки стенки отверстий имеют уклон от  $1^{\circ}30'$  до  $7^{\circ}$  (угол  $\beta$ ). Размеры заготовки выбирают такими, чтобы полностью произошло оформление бобышек. В процессе осадки в кольцах общая высота заготовки, как правило, уменьшается, поэтому заготовку выбирают с большей высотой.

Кольца делают со сквозными или глухими отверстиями. Для фланцев с малой высотой бобышек кольца получаются излишне тонкими, непрочными. В этих случаях делают глухие подкладные кольца. При осадке в кольцах слитков глухие кольца делают, когда высота бобышки меньше 350 – 400 мм.

Если необходимо получить одну бобышку, применяют одно подкладное кольцо (рисунок 2.34), глухое или сквозное в зависимости от высоты бобышки.

При осадке в кольцах мелких заготовок из проката диаметр подкладных колец выбирают равным конечному диаметру фланца поковки с тем, чтобы после осадки можно было ликвидировать бочкообразность обкаткой, причём кольца служат ограничительными плитами.

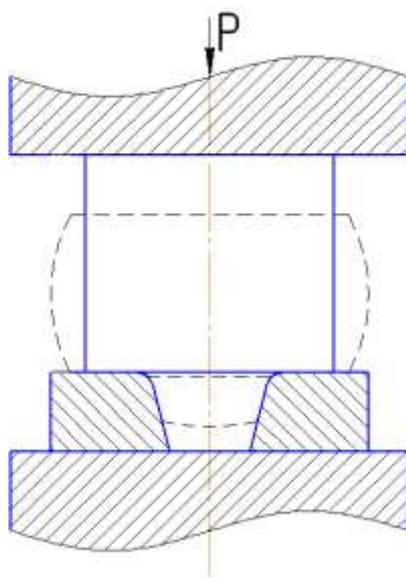
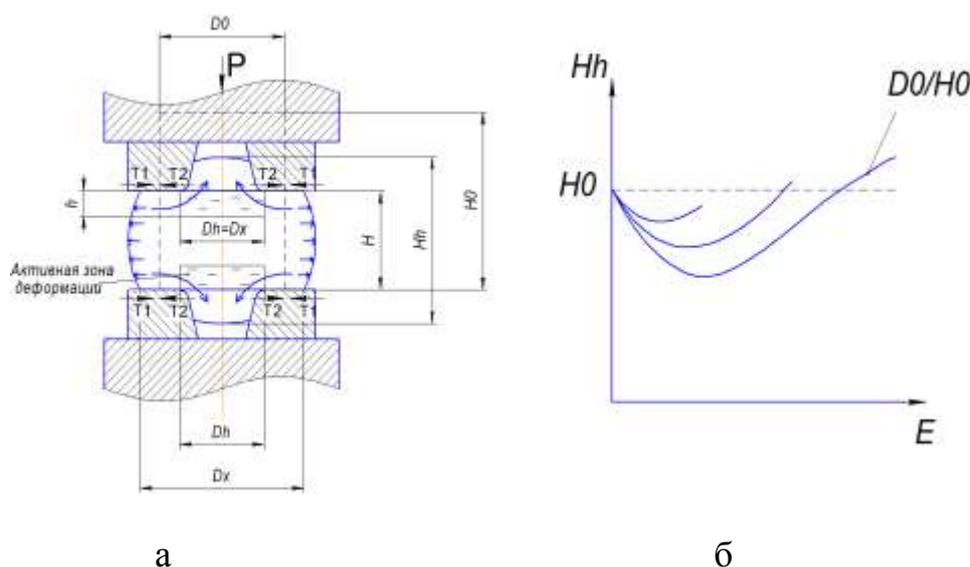


Рисунок 2.34 - Осадка на подкладном кольце

Схема течения материала при осаживании в кольцах отличается от схемы течения при обычном осаживании гладкими плитами наличием двух потоков. Первый поток (радиальное течение металла от оси), как и при осаживании сплошными плитами, наблюдается на периферии заготовки. Это течение металла тормозится силами трения  $T_1$ , направленными к центру колец. Поверхность раздела течения металла проходит вблизи отверстий. Основной металл расходуется на увеличение диаметра (при этом  $D_x = D_h$ ).

Второй поток металла, направленный, наоборот, к оси заготовки и вдоль нее (в отверстие каждой плиты), сдерживается встречными силами трения  $T_2$ , действующими на поверхности плиты. Попадая в отверстия и передвигаясь по ним, металл преодолевает силы трения и на стенках отверстий. При наличии уклонов в отверстиях плит затрудняется перемещение металла, поскольку уменьшаются размеры поперечного сечения бобышек по мере увеличения их высоты. При увеличении степени деформации величина  $h$  увеличивается до  $H/2$ , поверхность раздела течения характеризуется отношением  $D_x > D_h$ . Происходит интенсивное образование отrostков (рисунок 2.35).



а – схема течения металла при осадке в подкладных кольцах;

б – зависимость высоты поковки с отrostками от степени деформации

Рисунок 2.35 – Процесс осадки на подкладных кольцах

Поверхность раздела течения между двумя рассмотренными потоками металла условно можно аппроксимировать цилиндрической поверхностью, (рисунок 2.36) с образующей ОО (критическая поверхность).

В зависимости от соотношения размеров исходной заготовки ( $H/D$ ), относительных размеров отверстия в плитах ( $d_{отв}/D$ ), а также контактных сил трения необходимая осадка для получения заданной высоты бобышек различна. Расчет осадки, необходимой для получения отростков заданной длины, усложняется тем, что к моменту их оформления средняя часть поковки (фланец) должна иметь вполне определенный размер.

За степень деформации (в процентах) здесь принимают отношение

$$E = \frac{H - H_1}{H} 100,$$

где  $H$  — начальная высота заготовки;

$H_1$  — конечная высота средней части поковки (фланца).

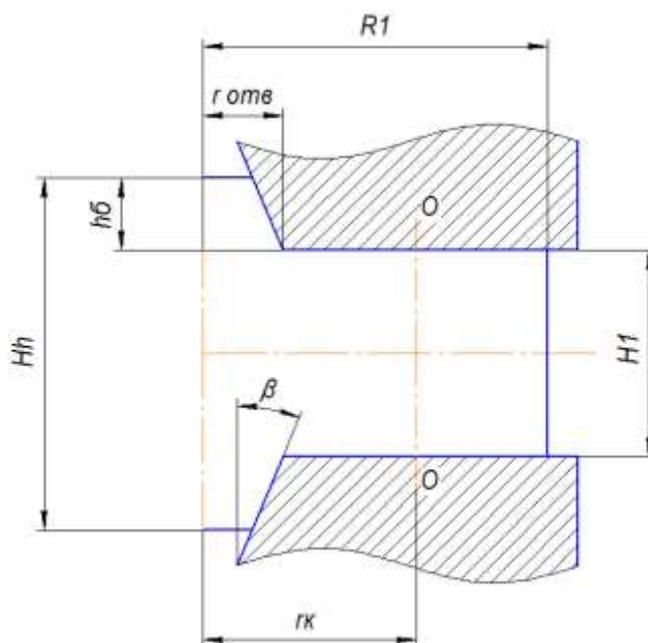


Рисунок 2.36 - Схема осаживания в кольцах (к расчёту основных параметров)

Общие закономерности процесса проявляются в трех основных возможных случаях (на примере осаживания с односторонним выдавливанием

металла).

1. По мере осаживания суммарная высота бобышки и фланца непрерывно уменьшается, а конечная высота поковки меньше начальной высоты заготовки  $h_6 + H_1 < H$ , и следовательно,  $h_6 < EH$ ; здесь  $h_6$  — глубина затекания металла в отверстие, т. е. высота бобышки.

2. В начале процесса суммарная высота поковки уменьшается, а затем с некоторого момента начинается ее рост, пока она не станет равной начальной высоте заготовки  $(h_6 + H_1) = H$  и  $h_6 = EH$ .

3. Суммарная высота поковки растет с начала осаживания, а конечное ее значение больше начальной высоты заготовки  $(h_6 + H_1 > H$  и  $h_6 > EH)$ .

Интенсивность смещения металла в бобышку и конечная высота поковки возрастают с уменьшением относительной высоты заготовки  $H/D$ . Рассмотренные выше случаи в той или иной мере могут проявляться и при осаживании одной и той же заготовки на разных стадиях ее деформирования (в зависимости от соотношений размеров заготовки и степени деформации). Встречаются также условия, когда осаживание в кольцах не будет сопровождаться затеканием металла в полости (возможный четвертый случай формоизменения). Такой характер формоизменения поковки свидетельствует о сложном и неодинаковом характере течения металла на различных стадиях процесса.

При изучении деформаций различают центральную часть поковки с диаметром, равным диаметру полости кольца, и периферийную.

Уменьшение высоты центральной части поковки, свидетельствует о том, что она осаживается вместе с периферийной, причем осадка ее меньше, чем последней, за счет чего металл затекает в полость, а высота бобышек определяется разностью осадок периферийной и центральной частей поковки.

Увеличение высоты центральной части поковки указывает на течение металла из периферийной части поковки в полость кольца, так как только при этом условии высота поковки по бобышкам может получить положительное приращение.

Следовательно, необходимо различать два вида течения металла в полость кольца: 1) из центральной части поковки вследствие разности ее осадки с периферийной частью или вследствие сдвига; 2) из периферийной части поковки. Последний вид течения в полость кольца вызывается исключительно трением на контактных поверхностях поковки и колец. Другими словами, увеличение высоты поковки по бобышкам невозможно при полном отсутствии контактного трения.

Схема осаживания цилиндрической заготовки в кольцах с принятыми и используемыми в последующих зависимостях обозначениями представлена на рисунке 2.36. Ниже приведены некоторые зависимости, полученные Л. А. Шофманом, в удобном для использования безразмерном виде.

Условие превращения поверхности раздела течения в осевую линию ( $r_k = 0$ ):

$$(R_1 - r_{\text{отв}})/H_1 \leq 1/(8\mu m \bar{r}) - 2\bar{r}, \quad (2.2.1)$$

где  $\bar{r} = r_{\text{отв}}/H_1$  — относительный радиус внутренней контурной поверхности;  $\mu$  — коэффициент трения;  $m = 2$  — при осаживании с истечением металла в два расположенных один против другого отверстия одинакового диаметра;  $m=1$  — при осаживании с истечением металла в одно отверстие (вторая плита сплошная).

При соблюдении неравенства (2.2.1) затекание металла в отверстия отсутствует.

Относительный радиус поверхности раздела течения ( $\bar{p} = r_k/r_{\text{отв}}$ ) принимает значения:

$$\begin{cases} \bar{p} = 1 \text{ при } 1,3 + 1/4m\bar{r} \geq (\bar{R} - 1)\bar{r}2\mu \geq 0,3 + 1/4m\bar{r} \\ \bar{p} > 1 \text{ при } \bar{p} = (\bar{R} + 1)/2 - (1,31g\bar{R} + \bar{q})/4\mu\bar{r}, \end{cases} \quad (2.2.2)$$

где  $R = R_1/r_{\text{отв}}$  — относительный радиус внешней контурной поверхности;  $q = 1 + \frac{1}{4m\bar{r}}$ .

При выводе приведенных выше формул были приняты осредненные значения сопротивления металла деформации.

При холодном осаживании в кольцах это допущение может привести к существенной погрешности. Так, например, при  $\bar{p} = 1$  в зоне затрудненной деформации, расположенной вблизи отверстий, упрочнение металла практически отсутствует. В то же время материал кольцевого фланца интенсивно упрочняется по мере уменьшения его толщины. Неоднородность деформированного состояния при  $\bar{p} = 1$  существенно сказывается на характере формоизменения заготовки при осаживании в кольцах. Поэтому для условий холодной обработки формулы (2.2.2) непригодны.

Расчет размеров заготовки на следующих друг за другом элементарных этапах процесса осаживания в кольцах можно производить по выражениям, характеризующим безразмерные текущие геометрические параметры деформируемого тела:

$$\bar{r}_n = r_{\text{отв}}/H1_n = r_{\text{отв}}/[(1 - \sum E_n)H];$$

$$H_{h_n}/H = H_{h_{n-1}}/H + (\bar{p}_{n-1}^2 - 1)E_n(1 - \sum E_n);$$

$$R_n = \sqrt{\frac{R_0^2 - H_{h_n}/H}{1 - \sum E_n} + 1},$$

где  $E_n = (H1_{n-1} - H1_n)/H1_{n-1}$ ;  $\sum E_n = (H - H1_n)/H$ .

По приведенным формулам можно определять траекторию движения любой точки тела.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите Deform-2D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой New problem , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей лабораторной работы (фамилия\_группа\_1) и затем нажмите .

Нажмите кнопку , появится окно Simulation controls (настройки задачи), в котором по умолчанию будет активна закладка Main (основное).

Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (рисунок 2.37). Нажмите ОК.

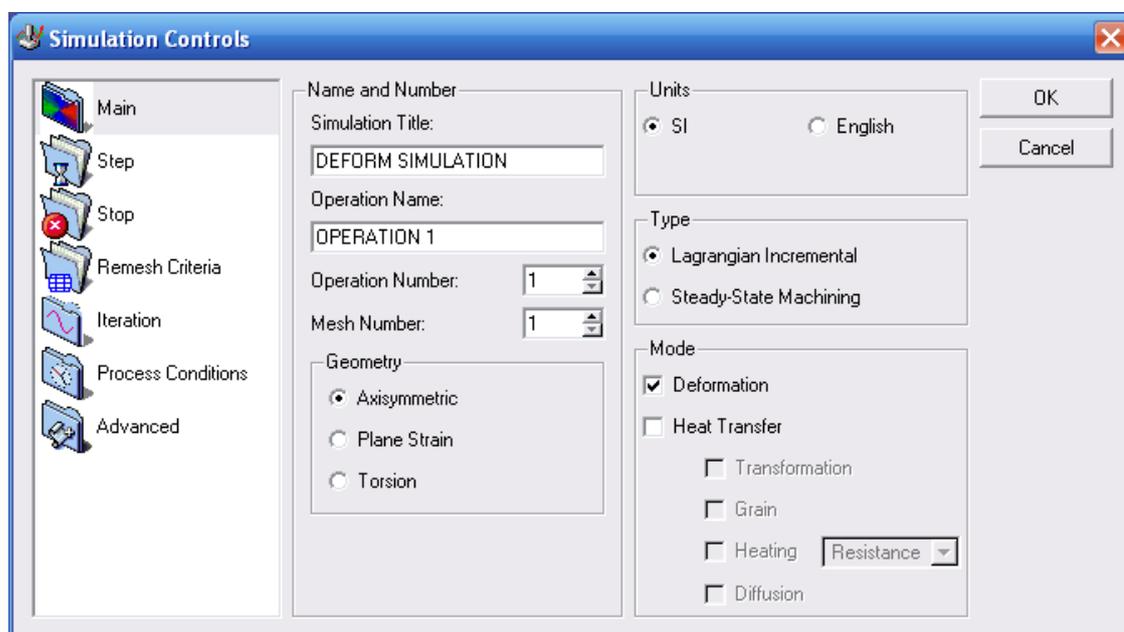


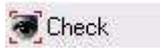
Рисунок 2.37 - Настройки задачи

### Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов.

Выделите в дереве объектов Bottom Die, это будет нижний боек.

Нажмите  Геометрия, выберите закладку  Edit. Введите данные, указанные на рисунке 2.38.

Щелкните  Check чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку

 Check & Correct Geometry.

Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

Нажмите кнопку  Apply (применить).

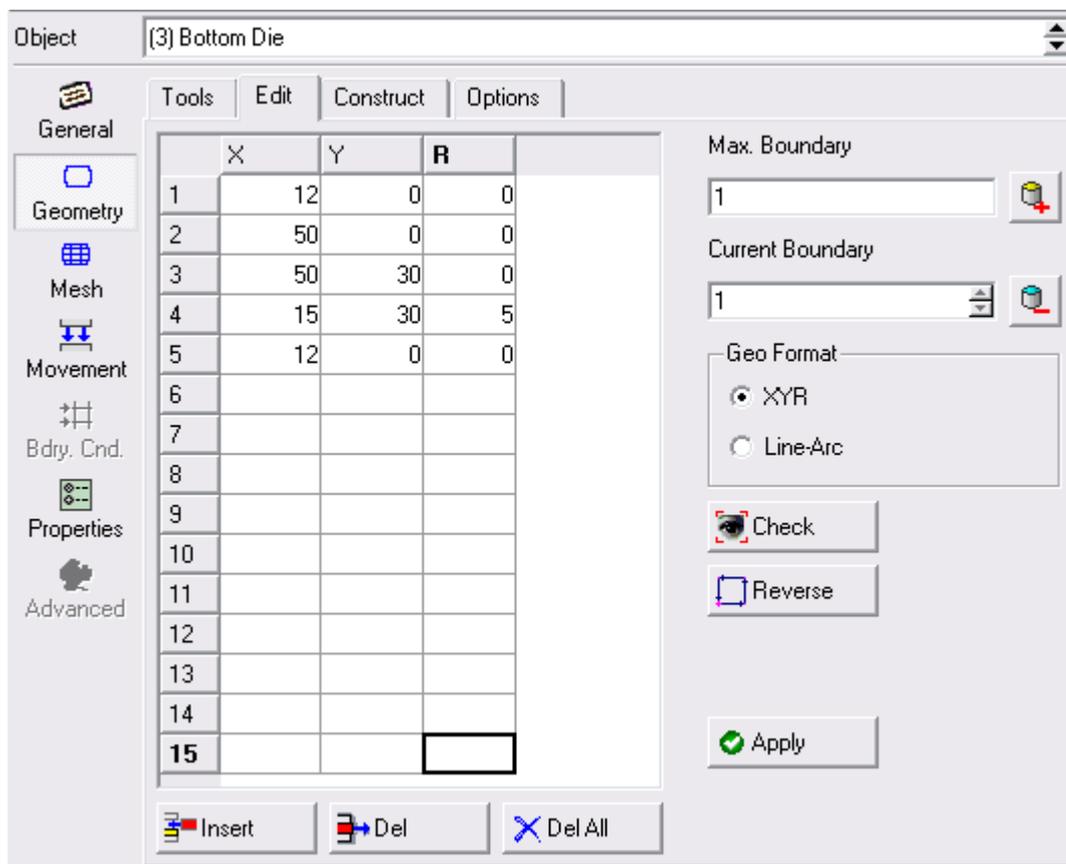
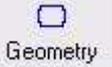
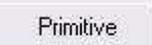
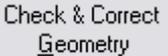


Рисунок 2.38 - Создание геометрии инструмента

Выделите в дереве объектов Workpiece, это будет заготовка. Нажмите  (геометрия), выберите закладку  (геометрические примитивы). Введите данные, указанные на рисунке 2.39.

Введите указанные данные и нажмите кнопку  (создать).

Щелкните  чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку



Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

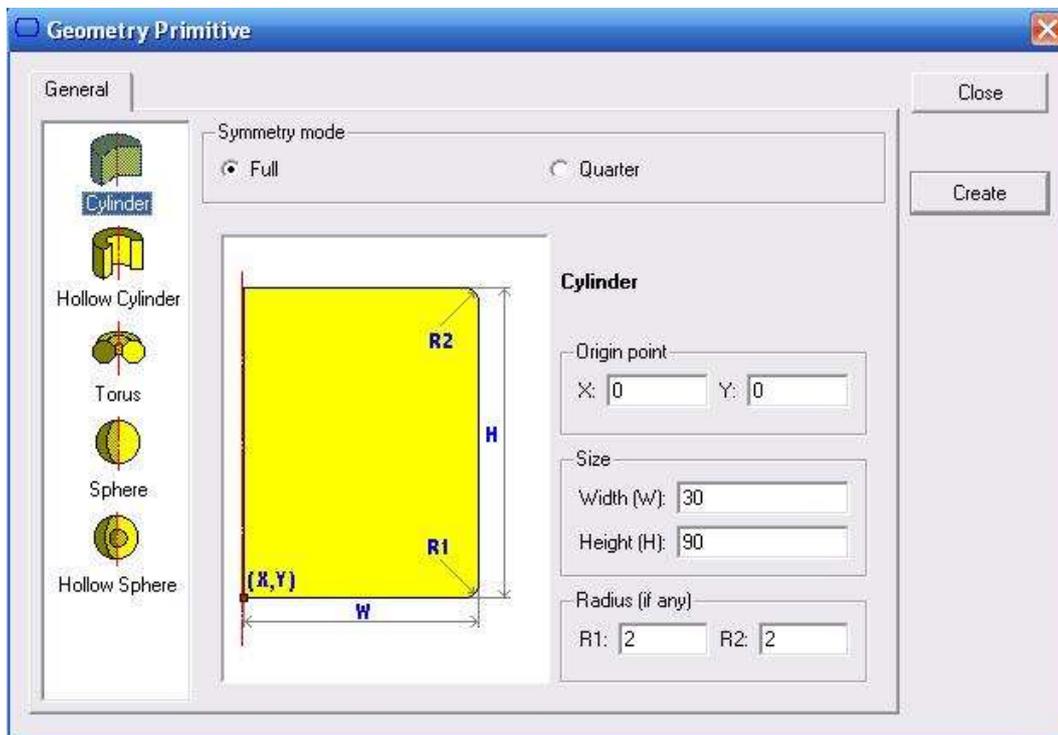
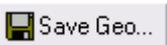


Рисунок 2.39 - Создание геометрии заготовки

Аналогичным образом вводим геометрию верхнего инструмента TopDie. Координаты:  $W=60$  мм,  $H=20$  мм,  $R1=0$  мм,  $R2=0$  мм.

Проверьте геометрию объекта. Сохраните геометрию верхнего инструмента Top Die под именем 1.GEO, нажав на кнопку .

Добавьте в дерево объектов нижнюю плиту (Object 4). Импортируйте геометрию верхнего инструмента Top Die, нажав на кнопку  и выделив файл 1.GEO.

### Позиционирование

Откройте окно «Object Positioning» (позиционирование объектов), показанное на рисунке 2.40, нажав кнопку , и используйте перемещение интерференцией верхнего бойка относительно заготовки, выбрав Interference (интерференция).

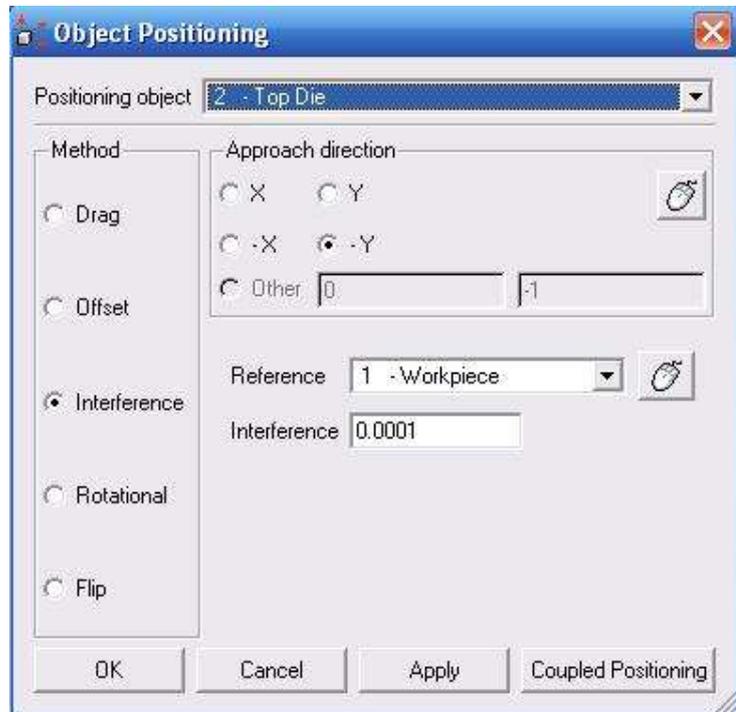
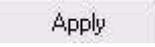


Рисунок 2.40 - Окно «Object Positioning»

Нажмите  (применить). Аналогичным образом сместите нижний бок относительно заготовки и расположите нижнюю плиту, как показано на рисунке 2.41.

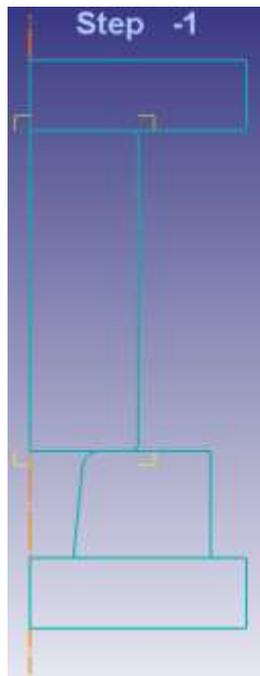
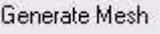


Рисунок 2.41 - Позиционирование объектов

## Создание сетки конечных элементов

Для создания сетки разбиения заготовки, выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece) и нажмите  Mesh (сетка), выберите количество конечных элементов равное 1000 и нажмите  (сгенерировать сетку).

## Задание материала заготовки

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку  General (общее), откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 2.42.

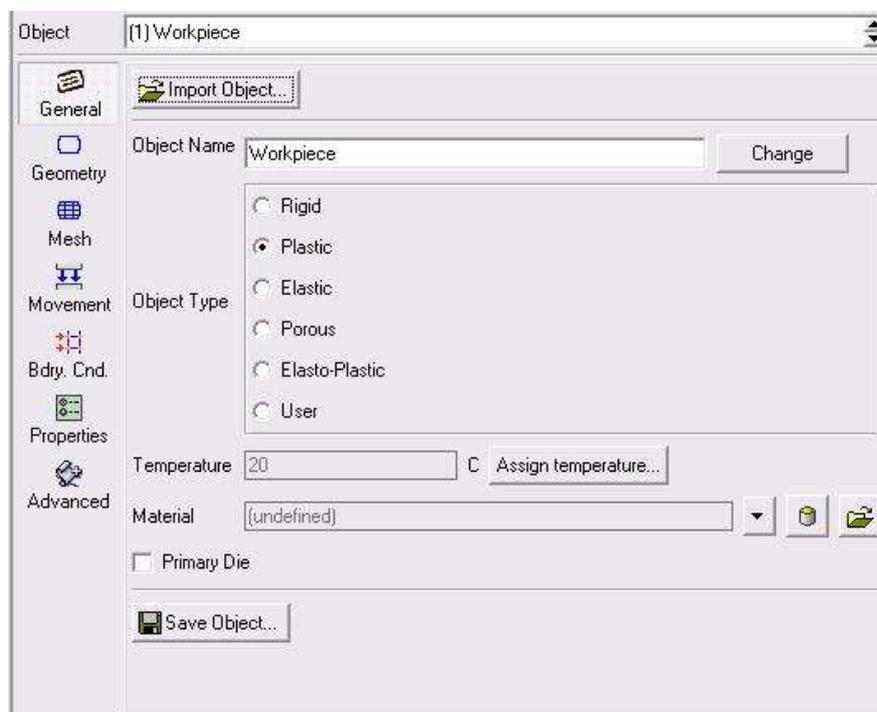


Рисунок 2.42 - Основное окно объекта

Убедитесь, что для заготовки установлены свойства пластического объекта.

Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку , откроется окно «Material Library», которое показано на рисунке 2.43. В том же Aluminum выберите материал  $\text{DIN-AlMgSi}[550-950\text{F}(300-500\text{C})]$  (АД31) и нажмите кнопку  (загрузить).

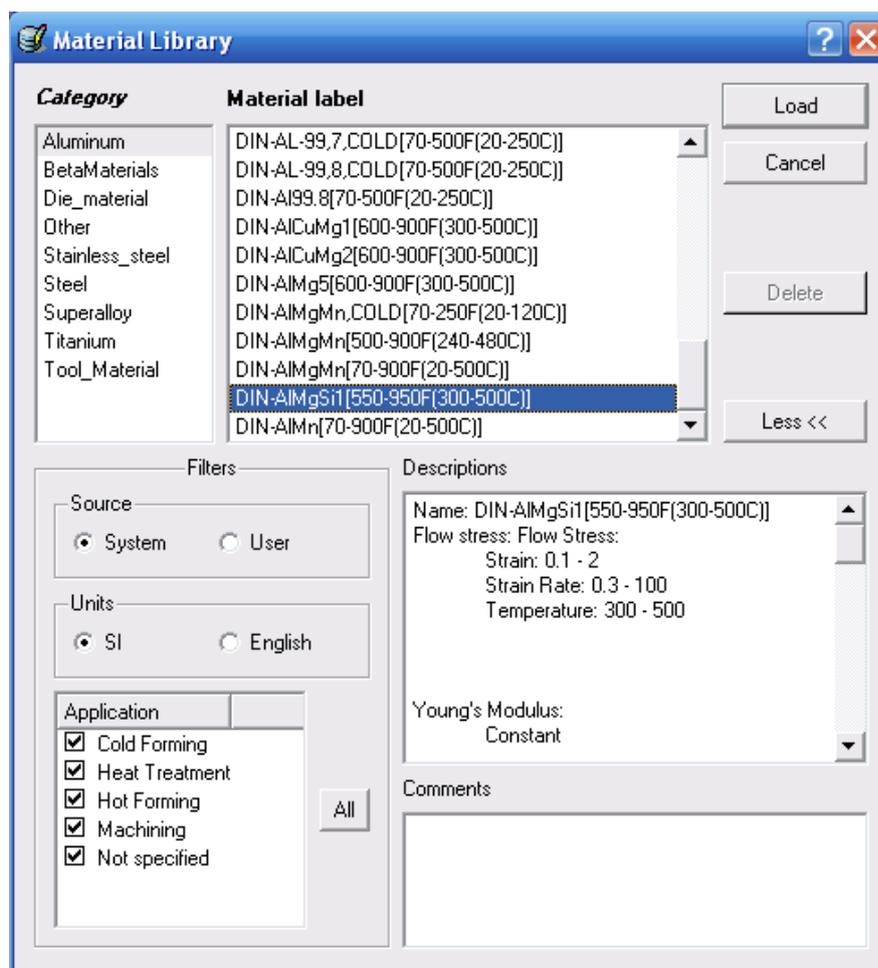
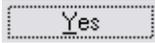


Рисунок 2.43 - Окно «Material Library»

### Назначение связи между объектами

Для определения связи между объектами нажмите кнопку .

Так как никакие отношения в настоящее время не определены, появится сообщение, спрашивающее, хотите ли вы, чтобы система добавила отношения по умолчанию за вас.

Нажмите кнопку .

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными четырьмя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется между двумя жёсткими инструментами. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как Подчинённый

объект. Если не появится отношение Заготовка - Заготовка, то необходимо его добавить.

Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений. Так как в этом расчете не будет приниматься во внимание никакой передачи температуры, единственное свойство, которое должно быть определено – трение.

Нажмите кнопку «Edit» (изменить). В секции трения есть выпадающее меню, показанное на рисунке 2.44, которое позволяет пользователю выбирать соответствующее условие трения обычных процессов деформирования. В выпадающем меню выберите Aluminum. Автоматически будет выбран коэффициент трения 0,4.

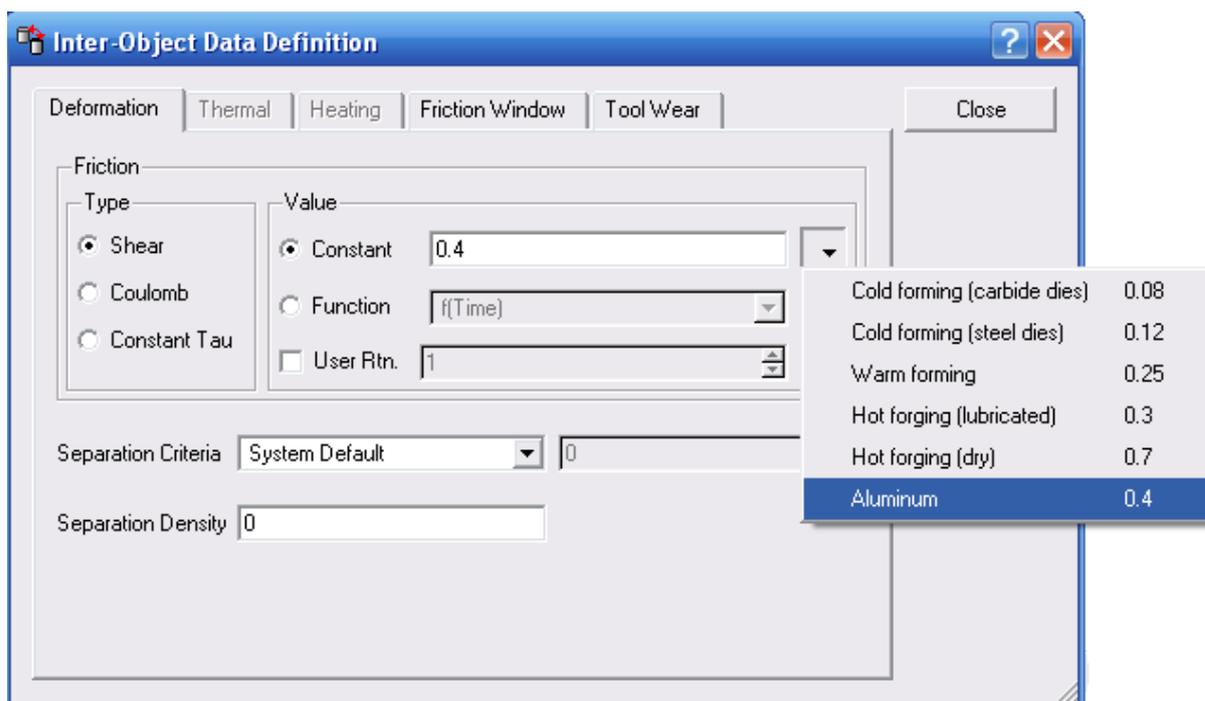
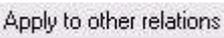


Рисунок 2.44 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна Inter-Object.

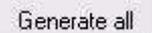
Теперь, когда отношения между верхним инструментом и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой и нижним инструментом.

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, кнопкой  можно скопировать свойства первого отношения во все остальные. После этого, все отношения будут иметь коэффициент трения Shear 0,4.

Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом (подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы находящиеся на линии контакта не попадут в контакт и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан, как цветные точки на верхней и нижней поверхностях заготовки (рисунок 2.45).

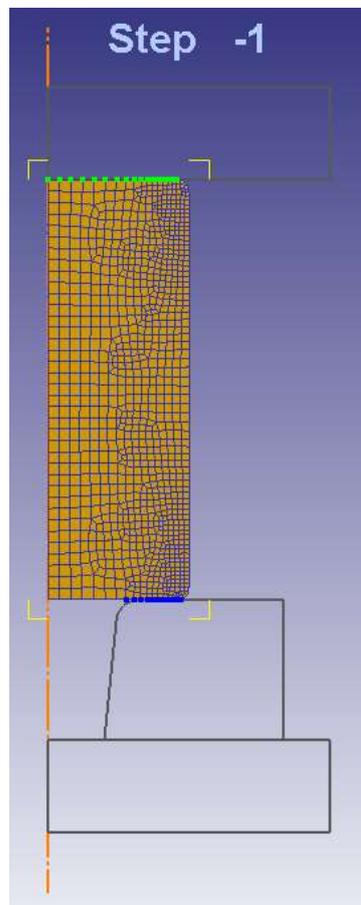
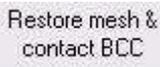


Рисунок 2.45 - Взаимодействие объектов

Замечание: если задано слишком большое значение точности при создании контакта и сетка заготовки разрушена, кнопка  может отменить создание контакта.

Когда контакт создан, нажмите на кнопку , что закроет окно «взаимодействие объектов», показанное на рисунке 2.46.

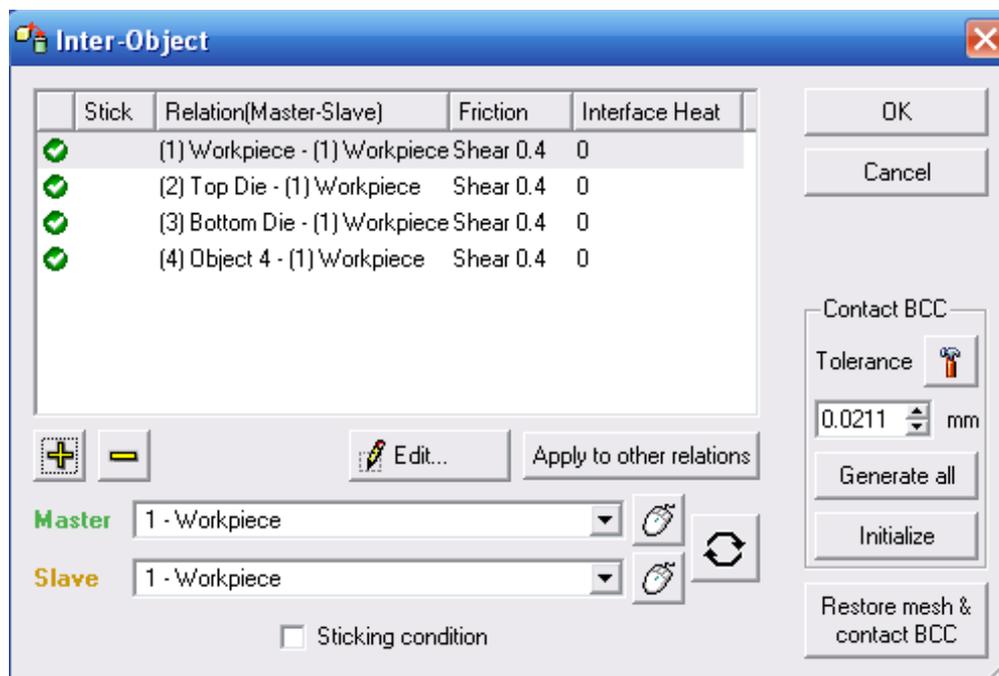


Рисунок 2.46 - Окно «Inter-Object»

### Задание граничных условий.

Для точного моделирования процесса, как осесимметричный, вы должны закрепить узлы заготовки по средней линии. Выберите её, и нажмите кнопку



, выберите настройку скорость (Velocity). Чтобы закрепить узлы по средней линии нужно установить  $V_x$  скорость узлов средней линии в ноль. Убедитесь, что направление установлено в X, и что поле содержит скорость 0.

Граничные условия, точно так же как геометрия, должны всегда определяться в направлении против часовой стрелки. Чтобы определить узлы на средней линии, сначала щёлкните на узле в верхнем левом углу, и затем щёлкните на узле в нижнем левом углу. Когда узлы выбраны нажмите кнопку  для применения граничного условия.

Граничное условие X, Fixed появится в списке «Тип гр. Условий», и затем выбранные, центральные узлы будут подсвечены в окне Экран (Display), изображенном на рисунке 2.47.

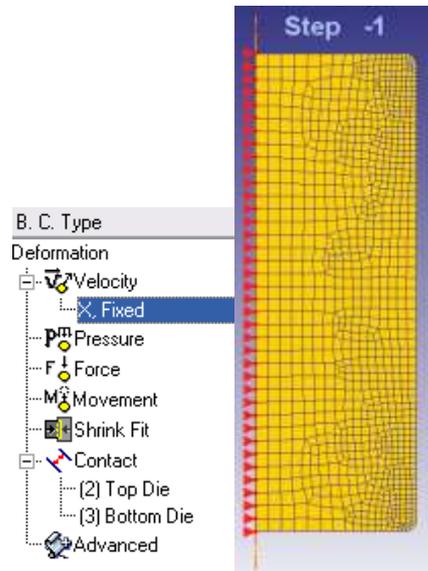


Рисунок 2.47 - Окно «Граничные условия»

### Задание движения верхнего инструмента

Выберите Top Die в дереве объектов и нажмите на кнопку  Movement (движение). В появившемся окне, показанном на рисунке 2.48, установите направление движения верхнего бойка вниз (-Y), и постоянную скорость 1 мм/сек.

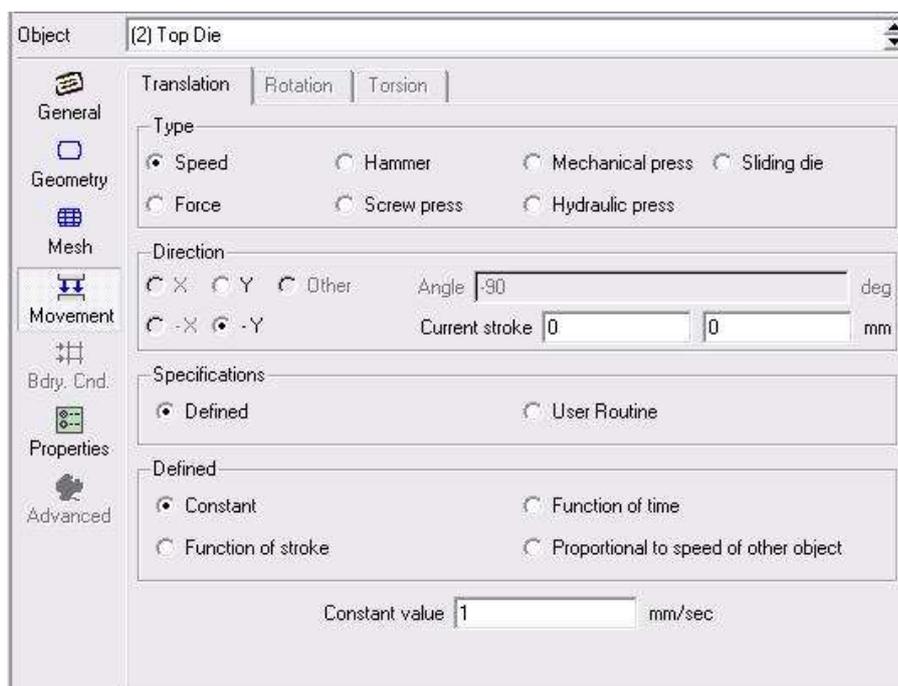


Рисунок 2.48 - Окно «Движение»

Таким образом, мы задаём направление и скорость движения инструмента.

### Задание числа шагов расчёта

Задание шага решения задачи может быть ограничено по времени и по перемещению главного инструмента. Для определения величины шага по перемещению необходимо произвести замер наименьшего размера сетки конечных элементов при помощи кнопок  и , расположенных на Панели инструментов, и данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку  и в появившемся окне Simulation controls перейдите на закладку Step (шаг). Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке With Equal Die Displacement (рисунок 2.49).

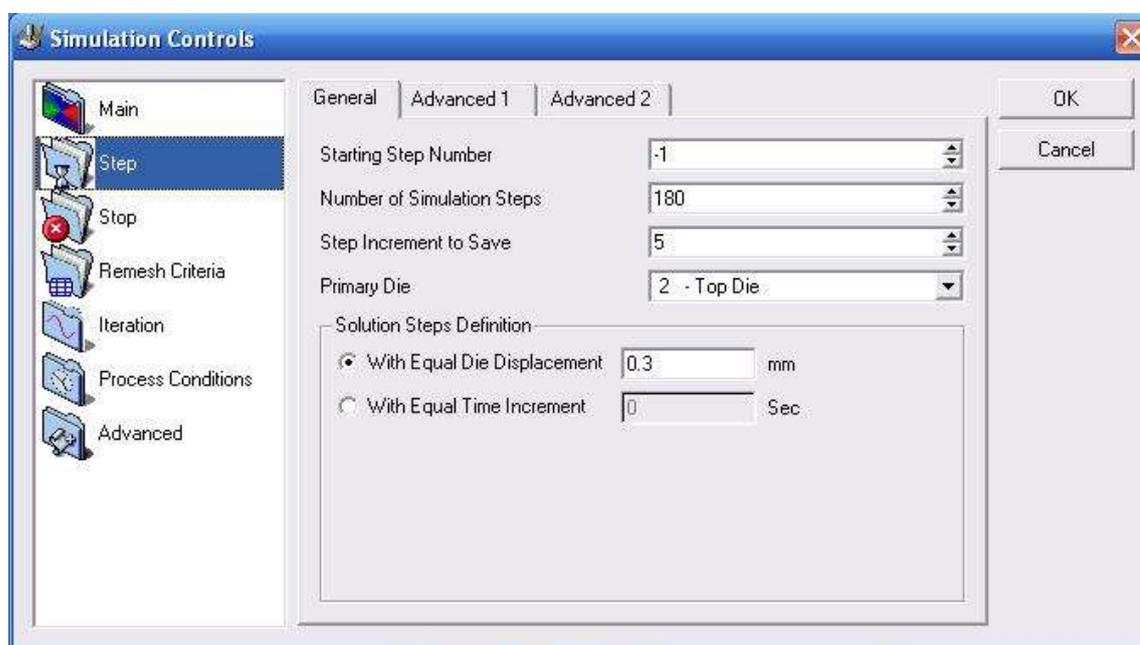


Рисунок 2.49 - Окно Simulation Controls

Для того что бы задать число шагов расчёта необходимо перемещение главного инструмента разделить на размер шага по перемещению и полученное

значение внести в ячейку в строке Number of Simulation Steps (число шагов расчёта). Перемещение главного инструмента определяется величиной степени деформации. При осадке на подкладном кольце со степенью деформации до 50% идёт уменьшение высоты, а при больших степенях деформации (порядка 70%), происходит увеличение высоты. Возьмём степень деформации равной 60%.

В строку Step Increment to Save (через сколько шагов сохранять) введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке Primary Die (главный инструмент) установите Top Die. Нажмите кнопку ОК.

### Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных нажав кнопку , нажмите кнопку  (проверить), когда появится сообщение  Database can be generated (база данных может быть сгенерирована) нажмите кнопку  (сгенерировать) и начнётся генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на рисунке 2.50.

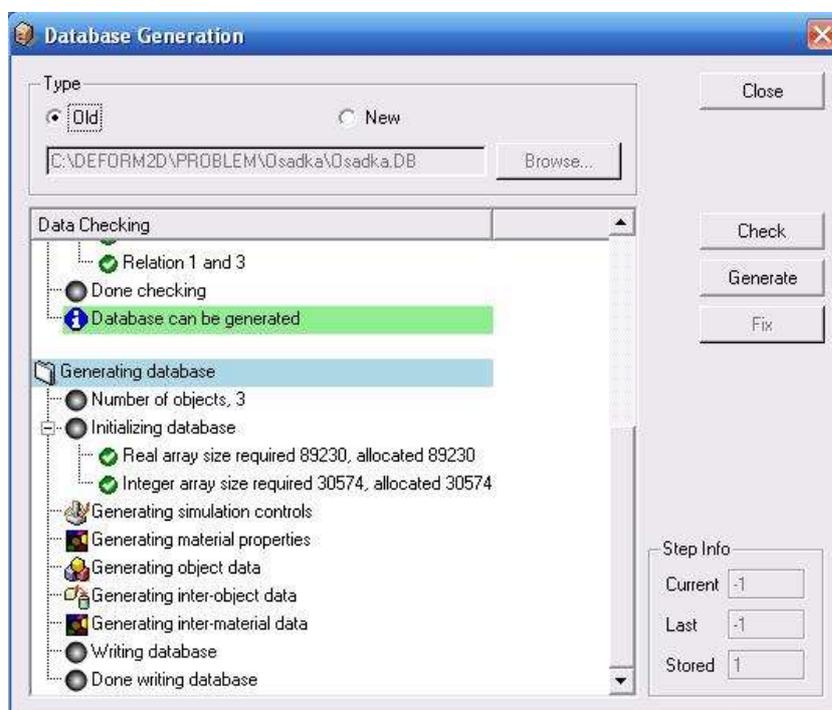


Рисунок 2.50 - Окно «Генерация базы данных»

При появлении сообщения  Done writing database (запись базы данных завершена), после сохранения, можете закрыть Deform2D – Preprocessor.

### Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой [Старт](#) или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

\*\*\*\*\*Message\*\*\*\*\*

Simulation is completed and stopped at the user specified time step .

После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой DEFORM-2D/3D Post в правом нижнем углу окна.

### 3.3 Анализ результатов

Посмотрите поэтапно процесс осадки на подкладном кольце. Стадии процесса осадки на подкладном кольце представлены на рисунке 2.51.

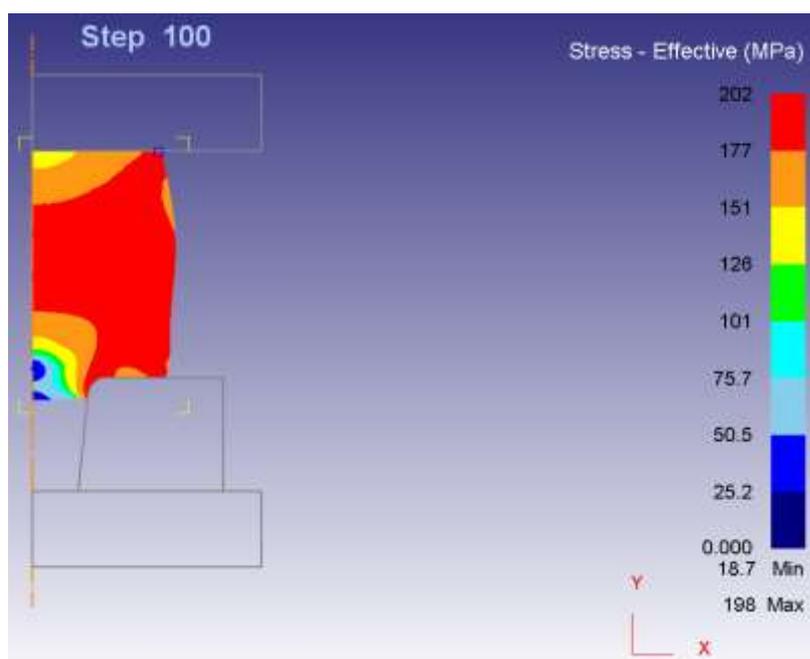


Рисунок 2.51 - Стадии процесса осадки на подкладном кольце

Постройте график усилия процесса.

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке 2.52. Выберите только верхний инструмент TopDie.

По оси X (X – Axis) откладывается перемещение верхнего бойка (Stroke),

а по оси Y (Y – Axis) усилие (Y - Load), прикладываемое к верхнему бойку и необходимое для деформации заготовки. Нажмите .

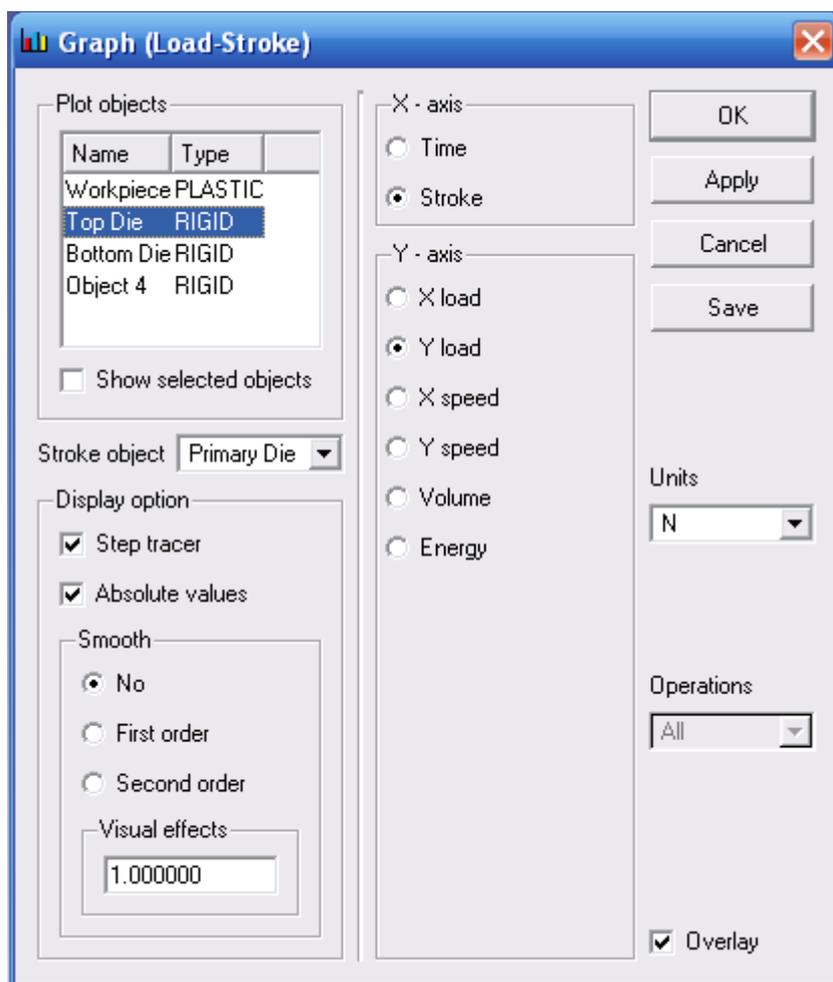


Рисунок 2.52 - Окно построения графиков «Graph (Load-Stroke)»

В основном окне появится график, изображенный на рисунке 2.53.

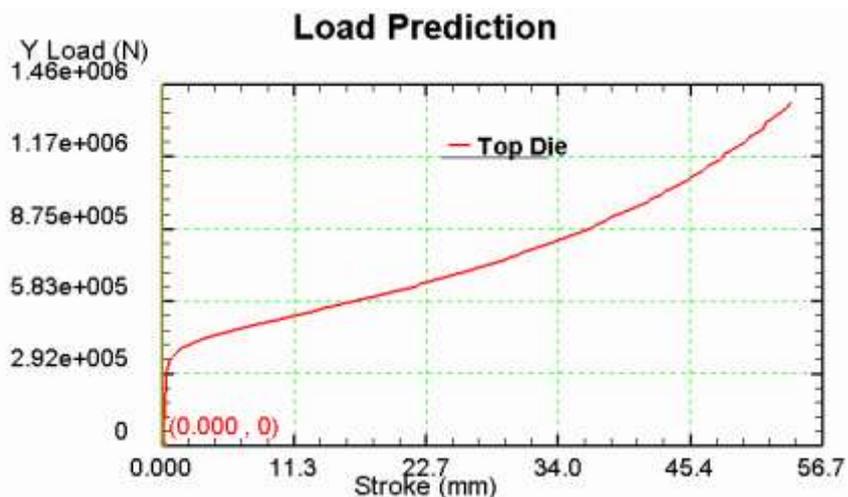


Рисунок 2.53 - График усилия осадки в зависимости от перемещения верхнего бойка

Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого в дереве объектов наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide graph), таким же способом его можно опять вывести напоказ (show graph). Аналогичным образом можно скрывать другие объекты графики.

В постпроцессоре имеются средства, позволяющие пользователю наносить координатную сетку Flow Net (сетку течения), для лучшего понимания моделируемого процесса деформации объекта. Как уже говорилось ранее, сетка течения представляет собой рисунок, нанесённый на поперечное сечение объекта и подвергающийся деформации наряду с этим объектом. Искажение рисунка позволяет судить о деформации определённой области.

Щёлкните на иконку  для открытия окна FLOW NET, показанного на рисунке 2.54. Мы хотим нанести рисунок на недеформированную заготовку и посмотреть как исказится рисунок в ходе моделируемого процесса.

Выделите шаг -1 в списке шагов и нажмите кнопку  рядом с надписью Starting Step (начальный шаг). Выделите последний шаг в списке шагов и нажмите кнопку  рядом с надписью Ending Step (конечный шаг). Нажмите .

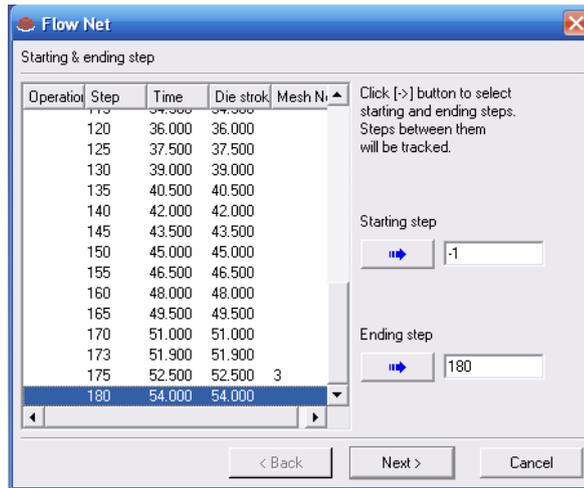


Рисунок 2.54 - Окно «Flow Net»

Выберите прямоугольный вид сетки (Rectangular grid) и нажмите . Установите количество ячеек в сетке (Number of Grids) 6 в направлении X, 12 в направлении Y. Нажмите  для просмотра исходной (недеформированной) сетки. Нажмите  и  для создания сетки течения.

Посмотрите поэтапно процесс деформации координатной сетки, показанный на рисунке 2.55.

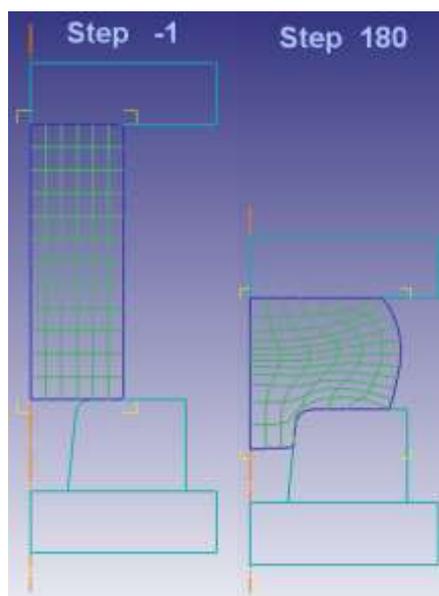
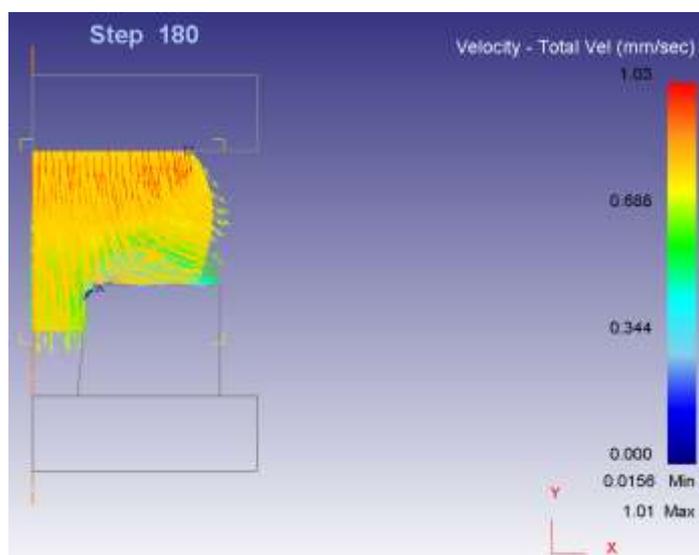
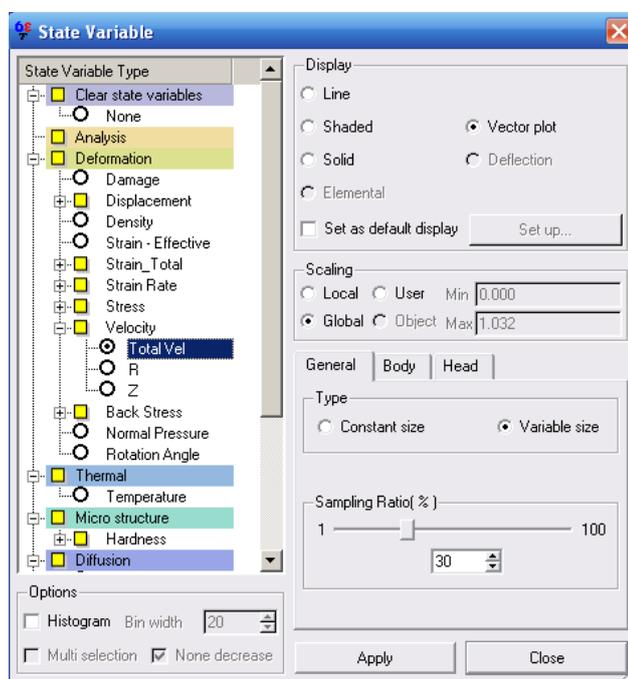


Рисунок 2.55 - Процесс деформации координатной сетки

Чтобы увидеть, как происходит перемещение металла в заготовке в период осадки на подкладном кольце, постройте векторную диаграмму скоростей течения (рисунок 2.56). Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и в разделе Скорости (Velocity) поставьте галочку напротив Основных скоростей (Total Vel). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив векторного отображения (Vector Plot). Нажмите  и . Теперь вы можете увидеть, как изменяется скорость движения отдельных областей заготовки.



## Рисунок 2.56 - Окно построения диаграмм

Для определения качественного изменения интенсивности деформации вы должны построить эпюры интенсивности деформации.

Откройте окно построения диаграмм, и в разделе Деформации (Strain) поставьте галочку напротив эффективных деформаций (Effective). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив линейного контура (Line contour). Нажмите  и . Посмотрите поэтапно, как накапливается деформация в заготовке (рисунок 2.57).

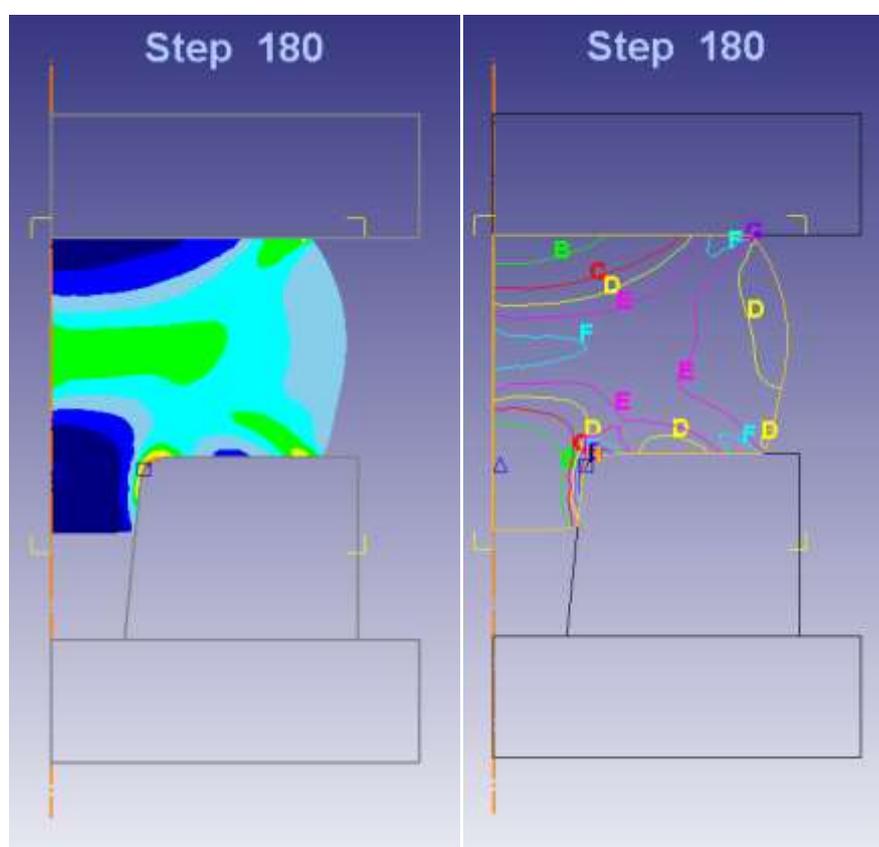


Рисунок 2.57 - Интенсивность деформации в заготовке в линиях равных деформаций

Для определения количественного изменения интенсивности деформации в объёме заготовки, выберем несколько точек в узлах сетки. Для качественной оценки достаточно пяти точек, как по вертикали, так и по горизонтали.

Нажмите кнопку Отслеживание Точек  (Point Tracking), и начинайте выбирать точки от центра к периферии заготовки, примерно в середине заготовки. Когда точки выбраны, нажмите  и затем  в окне Point Tracking.

Когда точки выбраны, вы можете построить графики интенсивности деформации в этих точках за время всего процесса осадки, показанный на рисунке 2.58. Для этого выберите Strain-Effective в списке диаграмм. Система автоматически построит графики для ваших точек.

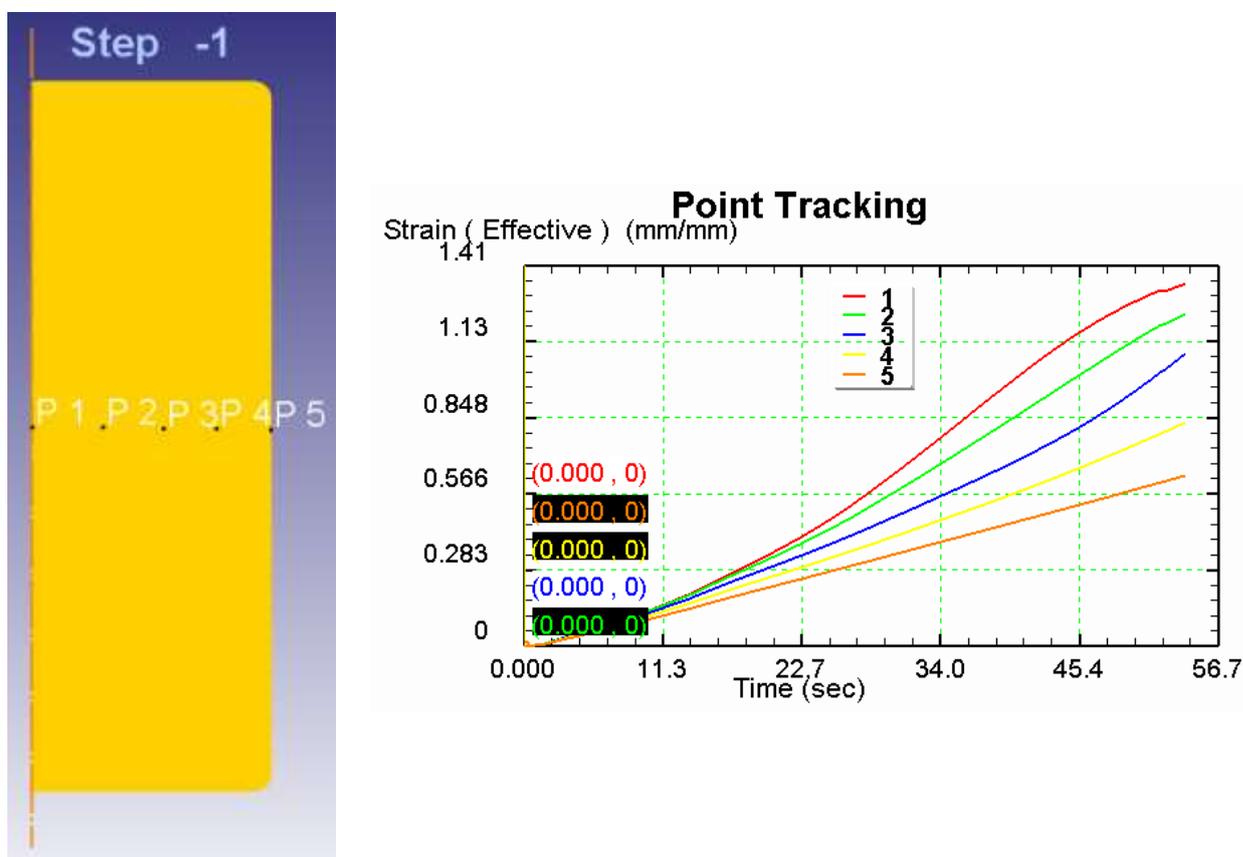


Рисунок 2.58 - График отображения деформации в точках (от центра к периферии) за время всего процесса осадки на подкладном кольце

По этим графикам можно судить о характере деформации на разных участках заготовки за всё время процесса осадки.

Аналогично можно построить графики для точек расположенных на одной вертикали и диагонали.

Аналогично построению эпюр интенсивности деформаций, постройте эпюры для интенсивности напряжений (Stress – Effective) (рисунок 2.59).

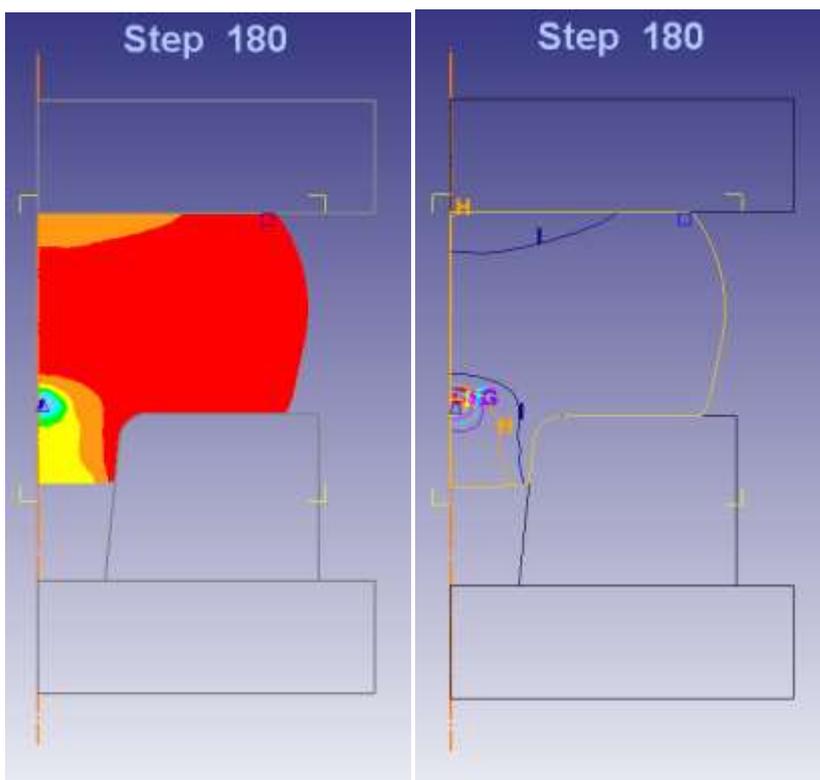


Рисунок 2.59 - Эпюра интенсивности напряжений

Постройте диаграммы, показывающие области возможного разрушения изделия. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и выберите раздел Разрушение (Damage). Нажмите  и . Диаграммы областей возможного разрушения заготовки показаны на рисунке 2.60.

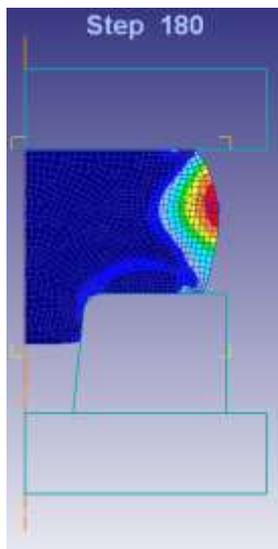


Рисунок 2.60 - Диаграмма областей возможного разрушения заготовки

### Содержание отчёта

1. Схема осадки на подкладном кольце.
2. График усилия осадки в зависимости от перемещения верхнего бойка.
3. Распределение интенсивности деформаций.
4. Распределение интенсивностей напряжений.
5. Процесс деформации координатной сетки
6. Векторная диаграмма скоростей.
7. Диаграмма областей возможного разрушения заготовки

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение процесса осадки.
2. Чем отличается осадка в подкладных кольцах от осадки гладкими плитами?
3. Назовите области применения осадки в подкладных кольцах.
4. Какие дефекты возможны при осадке на подкладных кольцах, и при каких условиях они образуются?
5. Какой закон трения используется в расчете процесса?

6. Как задать геометрию инструмента?
7. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?
8. Как задать число шагов расчёта?
9. Как построить координатную сетку?
10. Как построить эпюры интенсивности напряжений?

## 2.3 Протяжка

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе протяжки профиля из алюминиевого сплава АД31 и привитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-3D.

### Краткие теоретические сведения

Протяжка (вытяжка) – технологическая операция, которая применяется для увеличения длины заготовки за счет уменьшения ее поперечного сечения. Протяжка является одной из основных операций свободнойковки и широко используется как заготовительная операция перед объемной штамповкой на молотах. В последнем случае в специальных протяжных ручьях производится уменьшение сечения отдельных частей заготовки. Деформирующим инструментом для этой операции являются бойки (плоские, вырезные, выпуклые и комбинированные).

Протяжку осуществляют последовательными единичными обжатиями с подачей заготовки вдоль ее оси на величину  $l_0$  после каждого обжатия (рисунок 2.61). После первого прохода заготовку кантуют на  $90^\circ$  и выполняют второй проход.

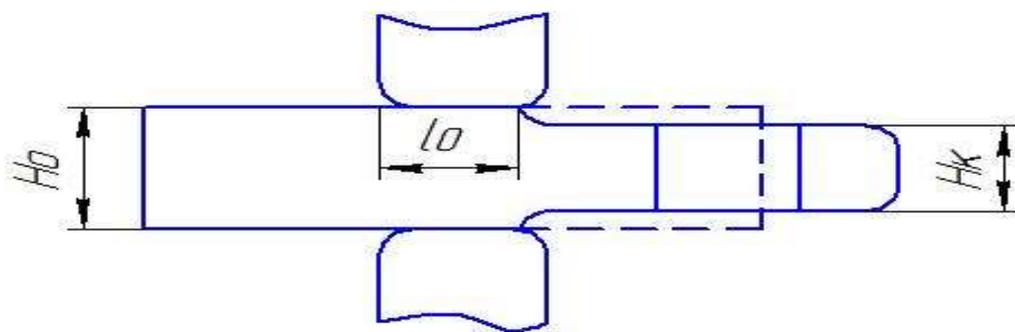


Рисунок 2.61 - Схема протяжки

При протяжке плоскими бойками нажим пресса или удар молота по данному участку заготовки длиной  $l_0$  сопровождается: а) уменьшением

исходной высоты заготовки  $H_0$  до  $H_k$ , т. е. обжатием; б) увеличением исходной ширины заготовки  $B_0$  до  $B_k$ , т. е. уширением; в) увеличением исходной длины участка  $l_0$ , т. е. удлинением (вытяжкой) заготовки, где  $l_0$  – длина участка заготовки, подаваемого под бойки, т. е. подача; г) уменьшением площади поперечного сечения заготовки (вследствие удлинения), оцениваемым уковкой  $K_L = F_0/F_k$  ( $F_0$  – исходная площадь поперечного сечения заготовки;  $F_k$  – площадь сечения образца после деформирования).

Уковка является основным параметром, характеризующим интенсивность процесса. Она увеличивается с уменьшением относительной подачи  $\psi = l_1/B$ , при этом растет количество необходимых обжатий.

После каждого прохода заготовка приобретает сложную конфигурацию за счет бочкообразования по высоте и длине заготовки (рисунок 2.62).

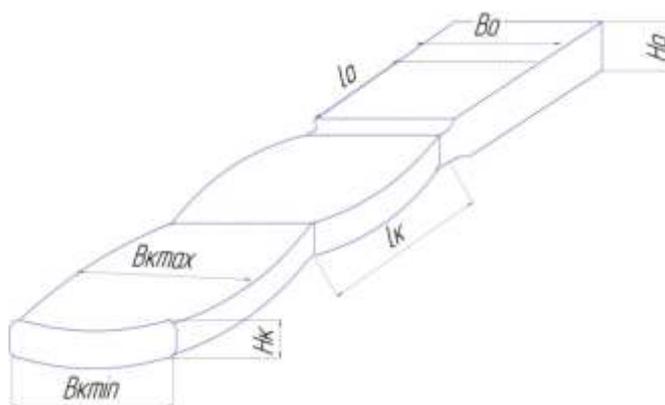


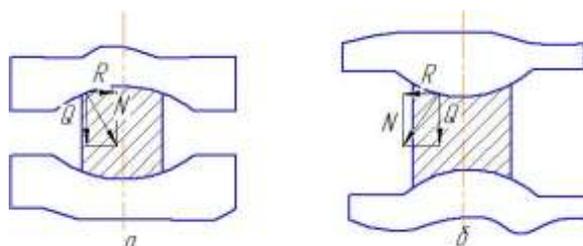
Рисунок 2.62 - Размеры заготовки после первого прохода

Знание соотношений между продольными и поперечными деформациями при протяжке позволяет, исходя из начальных размеров заготовки, подачи и относительного обжатия, производить расчет ширины и длины заготовки после каждого обжатия.

Геометрический очаг деформации каждого обжатия представляет собой объем  $V_0 = H_0 B_0 l_0$ , который после обжатия остается неизменным по величине и равен  $V_k = H_k B_k l_k$ . Величины  $H_k$  и  $l_k$  могут быть измерены непосредственно на заготовке. Величина  $B_k$  вследствие неравномерного уширения заготовки вдоль

очага деформации может быть рассчитана как средняя:  $V_{cp} = V_k / l_k H_k$ .

Соотношение между удлинением и уширением заготовки при протяжке зависит от вида бойков. Фасонные бойки бывают разнообразной конфигурации. Достаточен анализ двух форм бойков – вогнутых и выпуклых (рисунок 2.63), так как другие формы бойков можно свести к этим двум.



а – вогнутые; б – выпуклые

Рисунок 2.63 - Профили вырезных бойков

Первая особенностьковки между фасонными бойками заключается в том, что относительная осадка заготовки  $H_0/H_k$  на разных участках полосы различна. Это затрудняет расчет деформации по высоте заготовки. Вторая особенность – форма инструмента – в одних случаях обуславливает увеличение вытяжки и, следовательно, уменьшение уширения заготовки при заданной высотной деформации (рисунок 2.63, а), а в других случаях, наоборот, - уменьшение вытяжки и увеличение уширения (рисунок 2.63, б). Выпуклые бойки (рисунок 2.63, б) часто называют «разгонными».

В основу технологических расчетов процесса протяжки положен принцип суммирования главных деформаций. Наибольшей главной деформацией каждого обжатия является высотная, которая по абсолютной величине больше, чем величины деформаций в направлении протяжки и уширения. Последовательные обжатия приводят к суммированию деформаций только вдоль оси заготовки, поэтому в конце процесса эта деформация во много раз превышает деформации по двум другим осям.

Количественное ограничение степени деформации по высоте заготовки в каждом проходе связано с опасностью потери устойчивости заготовки после

кантовки (рисунок 2.64). Для предотвращения этого явления необходимо соблюдать условие:  $\varphi = B_K / H_K \leq 2,5$ . Величина  $\varphi$  называется коэффициентом перехода.

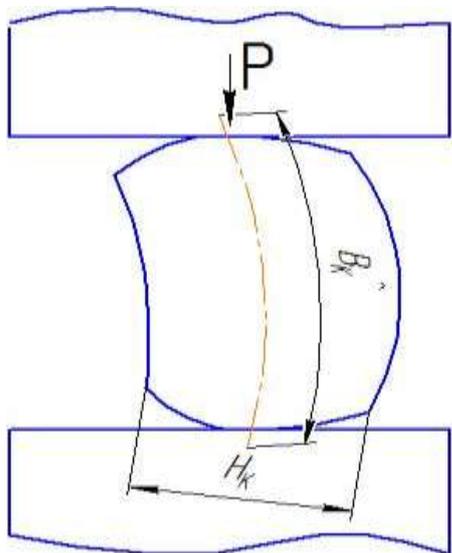


Рисунок 2.64 - Схема потери устойчивости заготовки после кантовки

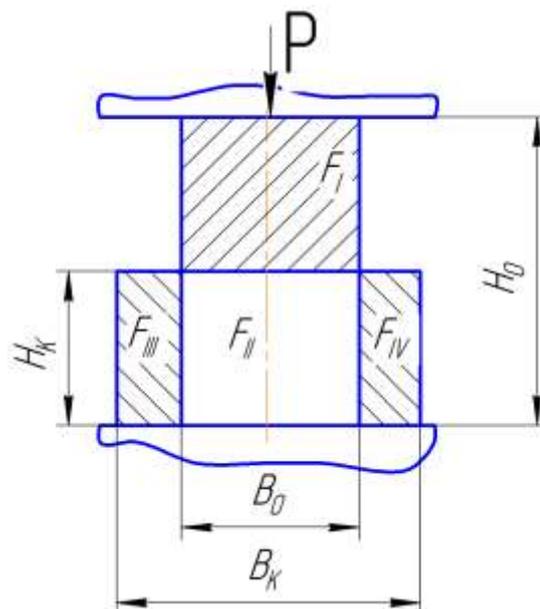


Рисунок 2.65 - Изменение поперечного сечения заготовки при вытяжке

Рассмотрим поперечное сечение заготовки в момент окончания очередного обжатия (рисунок 2.65). Можно условно принять, что площадь  $F_I$  смещается в результате деформации, площадь  $F_{II}$  остается неизменной, а площади  $F_{III}$  и  $F_{IV}$  появляются в результате уширения. Так как на уширение идет лишь часть смещенного объема металла, то равенство  $F_{III} + F_{IV} = fF_I$  действительно при условии  $f < 1$ . Перепишем это равенство с учетом линейных размеров заготовки:

$$(B_K - B_0)H_K = f(H_0 - H_K)B_0, \quad (2.3.1)$$

Откуда

$$f = \frac{(B_K - B_0)H_K}{(H_0 - H_K)B_0} = \frac{\varepsilon_{OB}}{\varepsilon_{KH}} < 1, \quad (2.3.2)$$

где  $f$  – коэффициент интенсивности уширения.

После преобразования уравнения (2.3.1) получим

$$F_K = F_0[1 - \varepsilon_{OH}(1 - f)], \quad (2.3.3)$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения заготовки до протяжки.

Коэффициент уковки по длине заготовки будет равен:

$$K_L = \frac{F_0}{F_K} = \frac{1}{1 - \varepsilon_{OH}(1 - f)}. \quad (2.3.4)$$

Аналогично, рассмотрев изменение продольного сечения заготовки, за единичное обжатие получим

$$q = \frac{(l_K - l_O)H_K}{(H_O - H_K)l_O} = \frac{\varepsilon_{OH}}{\varepsilon_{KH}} < 1, \quad (2.3.5)$$

где  $q$  – коэффициент интенсивности удлинения.

Известно, что связь между относительными деформациями по трем осям характеризуются соотношением

$$\varepsilon_{KH} = \varepsilon_{OB} + \varepsilon_{OL} + \varepsilon_{OB}\varepsilon_{OL},$$

откуда

$$\frac{\varepsilon_{OL}}{\varepsilon_{KH}} + \frac{\varepsilon_{OB}}{\varepsilon_{KH}} + \frac{\varepsilon_{OL}\varepsilon_{OB}}{\varepsilon_{KH}} = 1$$

или  $q + f(1 + \varepsilon_{OL}) = 1$ .

Так как  $1 + \varepsilon_{OL} = K_L$ , получим

$$q = 1 - fK_L.$$

Поскольку  $K_L > 1$ , то сумма  $(q + f) < 1$ , в отличие от суммы коэффициента уширения  $C_{ВИ}$  коэффициента удлинения  $C_H$ , получаемых через логарифмические деформации. Действительно, из гипотезы постоянства объема имеем

$$\delta_B + \delta_L = \delta_H,$$

откуда

$$\frac{\delta_B}{\delta_H} + \frac{\delta_L}{\delta_H} = 1.$$

Обозначим  $\delta_B/\delta_H = C_B$ , а  $\delta_L/\delta_H = C_L$ , тогда

$$C_B + C_L = 1.$$

Неравномерность деформаций при протяжке тем большая, чем выше  $\varepsilon$ .

Выражается она в том, что ширина полосы в середине обжимаемого участка больше, чем у краев, и, следовательно, боковая поверхность всей заготовки после протяжки без кантовки становится волнистой. Объясняется это тем, что наружные жесткие концы полосы «заставляют» вытягиваться все части полосы, принудительно «уширяют» ее средние части и тем самым сдерживают их вытяжку, а также дополнительно растягивают кромки полосы.

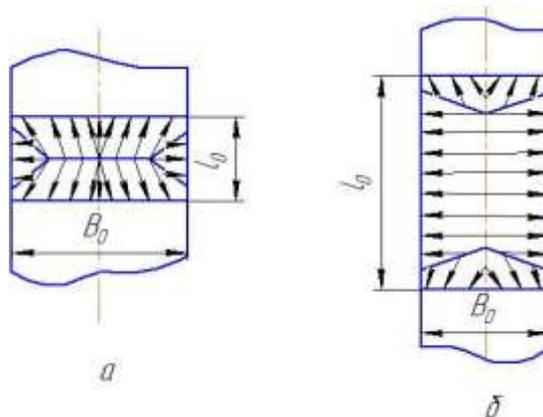
### **Влияние параметров процесса протяжки на величину коэффициента интенсивности уширения**

Экспериментально установлено, что коэффициент интенсивности уширения  $f$  зависит от следующих основных технологических параметров (факторов) процесса:

- величины относительной подачи  $\psi = l_0 / B_0$ ;
- степени деформации по высоте  $\varepsilon_{OH} = \frac{H_0 - H_K}{H_0}$ ;
- относительных размеров полосы, протягиваемой в данном проходе  $m = H_0 / B_0$ ;
- коэффициент трения  $\mu$ .

В процессе протяжки наблюдается как отдельное, так и взаимосвязанное влияние этих факторов на формоизменение заготовки.

Наибольшее влияние на коэффициент интенсивности уширения оказывает относительная подача. В направлении, поперечном действию силы, металл стремится течь по направлению кратчайших нормалей к контуру очага деформации. Однако наличие недеформированных частей заготовки искажает такую схему (рисунок 2.66).



а – протяжка с малой подачей ( $\psi < 1$ ), б - протяжка с большой подачей ( $\psi > 1$ )

Рисунок 2.66 - Схема поперечного течения металла при протяжке

Из рисунка видно, что с увеличением подачи увеличивается объем металла, смещенный в ширину, а следовательно, и коэффициент уширения. При подачах больше единицы ( $\psi > 1$ ) с увеличением коэффициента трения уширение увеличивается, а при ( $\psi < 1$ ) – уменьшается.

При изменении степени деформации в пределах  $0 \dots 0,6$  уширение изменяется мало. При больших степенях деформации уширение снижается при  $\psi > 1$  и повышается при  $\psi < 1$ . В пределе при  $\varepsilon_{он} \rightarrow 1$  уширение при  $\psi > 1$  стремится к  $0,5$ .

С увеличением относительной высоты заготовки уширение снижается при  $\psi > 1$  и увеличивается при  $\psi < 1$ .

Протяжка выполняется на кривошипном прессе под плоскими бойками. Изменение деформации по высоте образца достигается либо за счет перемещения нижнего бойка по клиновой направляющей, либо за счет применения ступенчатых бойков.

Для изменения контактного трения могут быть использованы различные смазки.

В качестве исходной заготовки применяются алюминиевые образцы квадратного сечения.

### Исследование течения металла и расчет переходов при протяжке

Протяжка применяется преимущественно как формообразующая операция, а также как операция, способствующая завариваемости внутренних дефектов (пустот) и улучшению механических свойств металла вдоль оси заготовки.

Интенсивность процесса протяжки характеризуется уковкой, равной за один переход (два последовательных обжатия с кантовкой заготовки на  $90^0$ ) произведению уковок за каждый обжим:

$$K_{L\text{общ}} = K_{L1}K_{L2}.$$

В общем случае за всю операцию

$$K_{L\text{общ}} = F_0/F_K = K_{L1}K_{L2} \dots K_{n-1}K_n.$$

Изменение продольных размеров заготовки:

$$l = LK_{L\text{общ}}; \Delta l = l - L = (K_{L\text{общ}} - 1)L,$$

где  $F_0$  и  $L$  – соответственно начальная площадь поперечного сечения и длина заготовки;  $F_K$  и  $l$  – то же, конечные.

При протяжке следует реализовать максимальные, допускаемые пластичностью металла при данной схеме напряженного состояния обжатия. Однако в случае необходимости последующей кантовки заготовки обжатия ограничиваются во избежание искривления ее сечения. Граничные условия обжатия в этом случае определяются коэффициентом перехода – отношением ширины поковки к ее высоте после данного обжатия.

Поскольку ширина заготовки после соответствующего обжатия определяется выражением

$$B_K = \frac{B_0 H_0 L}{H_K l} = \frac{B_0 H_0}{K_L H_K} = \frac{B_0}{K_L (1 - \varepsilon)},$$

коэффициент перехода

$$\varphi = \frac{B_K}{H_K} = \frac{B_0}{K_L H_K (1 - \varepsilon)^2} = \frac{B_0}{H_0 K_L (1 - \varepsilon)^2} \leq 2,5,$$

а относительное уширение

$$\varepsilon' = \frac{B_k - B_0}{B_0} = \frac{\Delta b}{B_0} = \frac{1}{K_L(1-\varepsilon)} - 1.$$

Поперечные и продольные деформации заготовок при протяжке связаны весьма сложными зависимостями. Поэтому их характеристики и некоторые другие параметры процессов первого и второго обжатий для облегчения трудоемких вычислений сводятся в номограммы.

Для того, чтобы неравномерность уширения заготовки после второго обжатия была минимальной, необходимо изменять подачу при втором обжатии по сравнению с первым на величину, равную половине шага  $l_1$ . Тогда в очаге деформации при втором обжатии будут находиться те же объемы металла, что и при первом (рисунок 2.67). В этом случае в области наибольшего уширения обжатой заготовки располагается ее сечение с наименьшей площадью, что будет иметь место при соблюдении равенства  $l_2 = l_1^*$  ( $l_2$  - подача заготовки при втором обжатии;  $l_1^*$  - длина обжимаемого участка после первого обжатия).

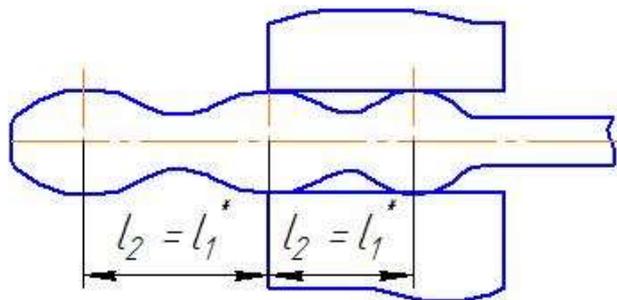


Рисунок 2.67 - К выбору подачи при втором обжатии

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите Deform-3D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой New problem , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей лабораторной работы (фамилия\_группа\_2) и затем нажмите .

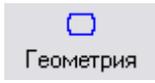
Нажмите кнопку Настройки задачи, появится окно, в котором по

умолчанию будет активна закладка Основное. Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией. Нажмите ОК.

### Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов.

Выделите в дереве объектов Bottom Die, это будет нижний боек.

Нажмите , выберите закладку Геометрические примитивы. Введите данные, указанные на рисунок 2.68.

Введите указанные данные и нажмите кнопку Создать.

Щелкните  Check чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку



Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

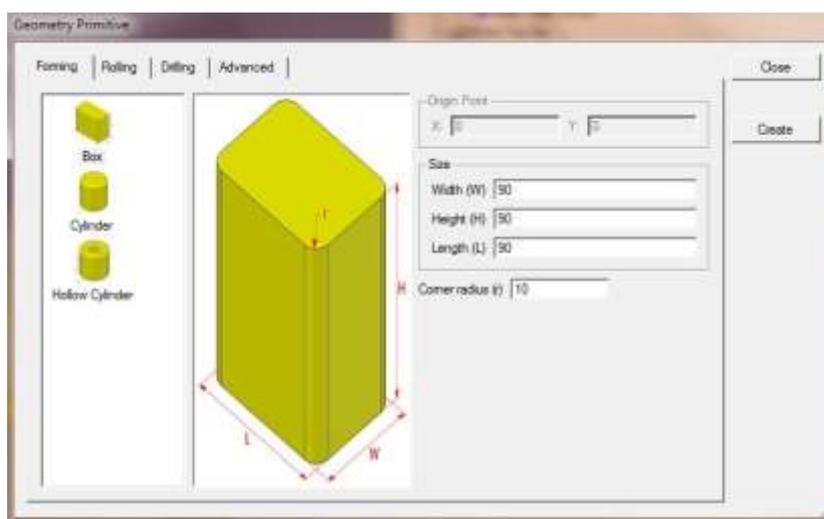


Рисунок 2.68 - Создание геометрии инструмента

Выделите в дереве объектов Top Die, это будет верхний боек. Ввод

геометрии осуществляется также (рисунок 2.68).

Аналогичным образом вводим геометрию заготовки. Координаты:  $W=50$  мм,  $H=50$  мм,  $L=250$  мм.

Проверьте геометрию объектов.

### Создание сетки конечных элементов

Для создания сетки разбиения заготовки, выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece) и нажмите  Сетка, выберите разумное количество конечных элементов 32000 и нажмите  Сгенерировать (рисунок 2.69).

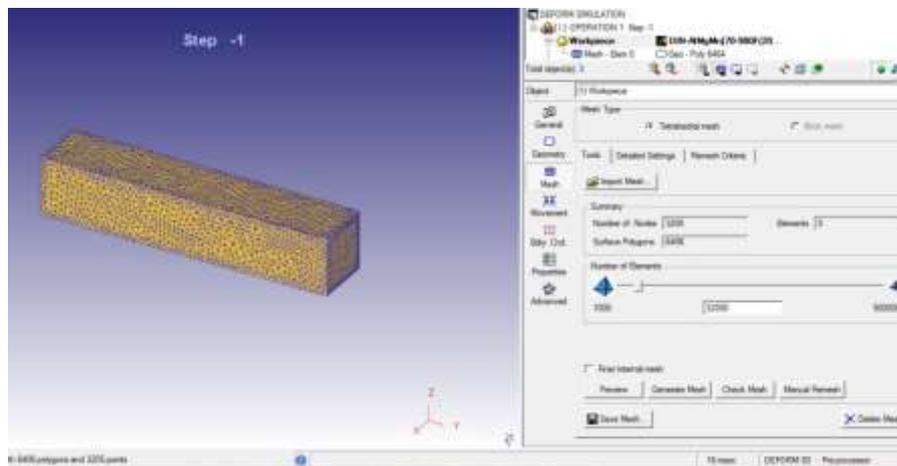


Рисунок 2.69 - Сетка конечных элементов заготовки

### Позиционирование

Откройте окно «позиционирование объектов», показанное на рисунке 2.70, нажав кнопку , и используйте перемещение интерференцией верхнего боек кнопкой  Интерференция, относительно заготовки.

Нажмите  Применить. Аналогичным образом сместите нижний боек относительно заготовки (рисунок 2.70).

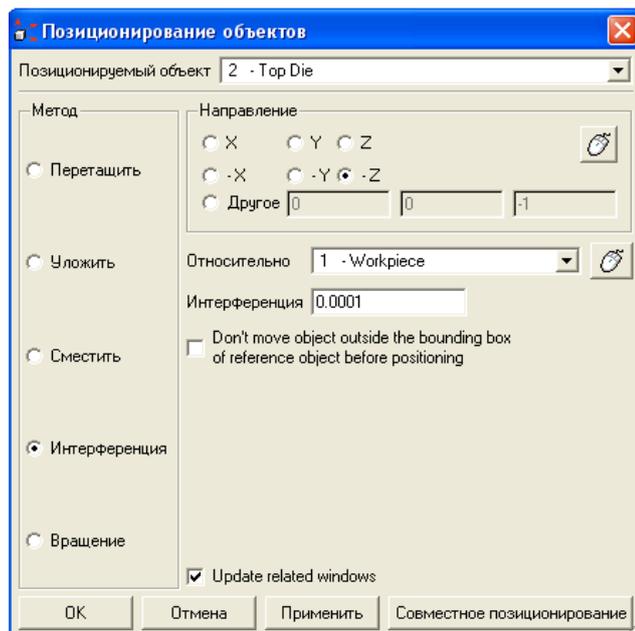


Рисунок 2.70 - Окно «Позиционирование объектов»

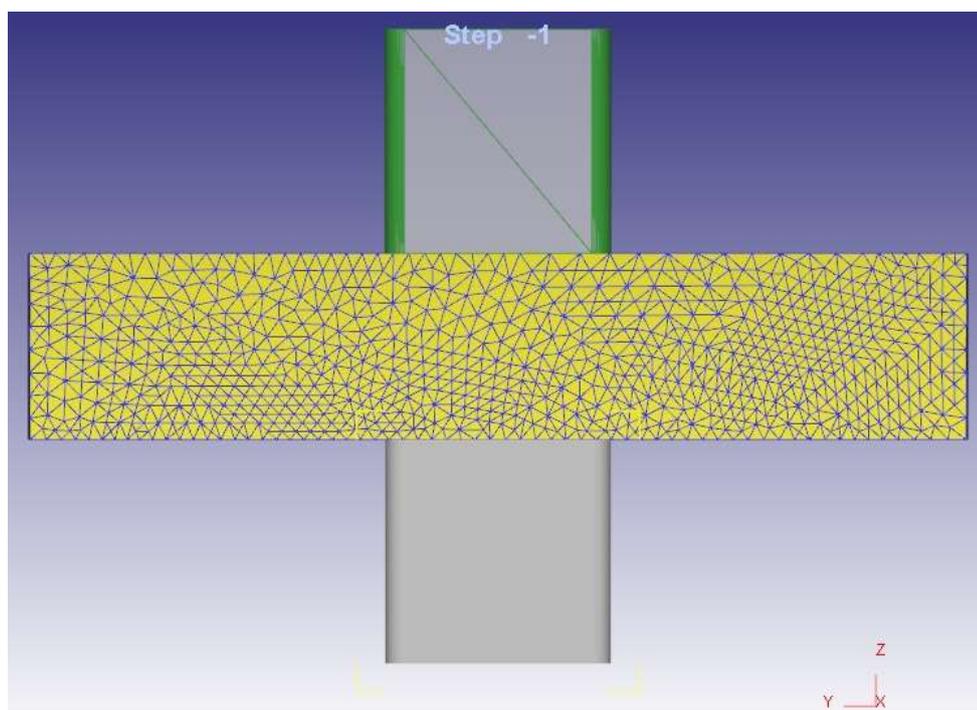


Рисунок 2.71 - «Позиционирование объектов» после интерференции

Для перемещения бойков к краю заготовки нажмите Сместить (рисунок 2.72).

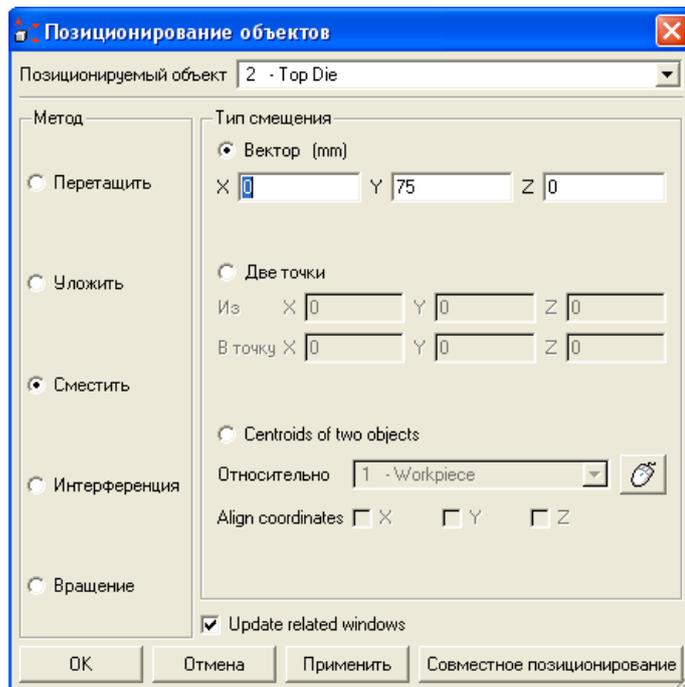


Рисунок 2.72 - Окно «Позиционирование объектов»

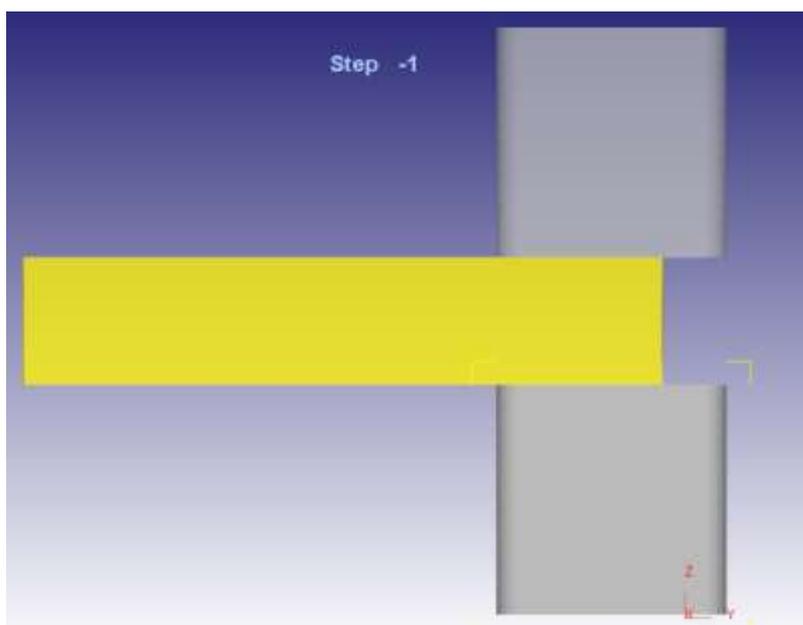


Рисунок 2.73 - «Позиционирование объектов» после смещения

### Задание материала заготовки

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку



, откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 2.74.

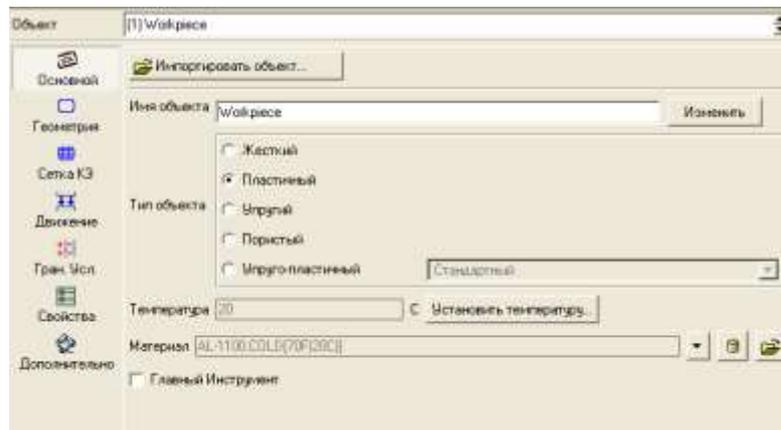


Рисунок 2.74 - Основное окно объекта

Убедитесь, что для заготовки установлены свойства пластического объекта.

Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку  **Материал**, откроется окно «Материал», показанное на рисунке 2.75. Нажимаем Загрузить.

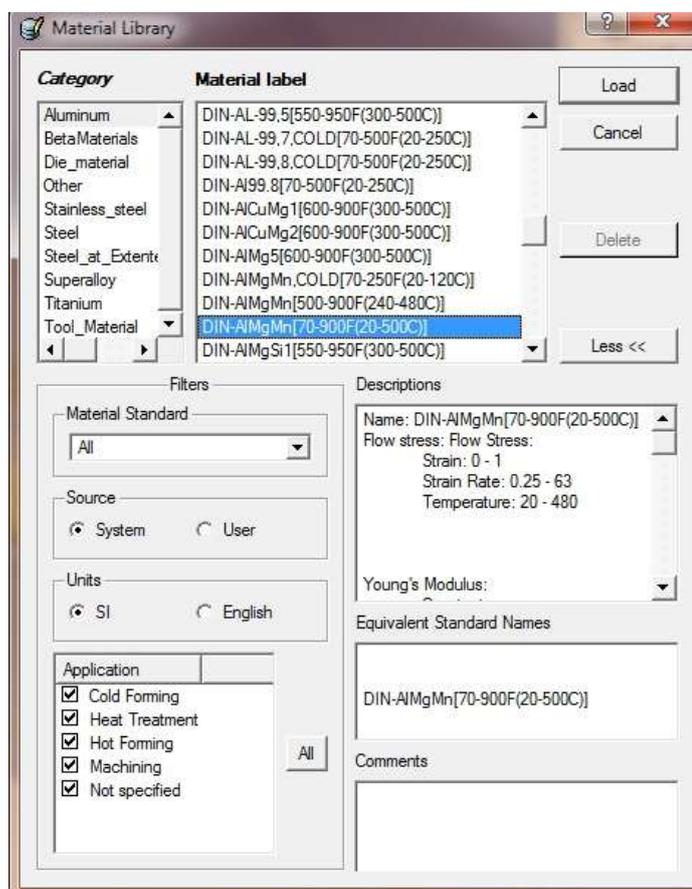


Рисунок 2.75 - Окно «Материал»

В томе Aluminum выберите DIN-AlMgMn[70-900F(20-500C)] (АД31) и задайте материал кнопкой .

### Назначение связи между объектами

Для определения связи между объектами нажмите кнопку  (рисунок 2.76).

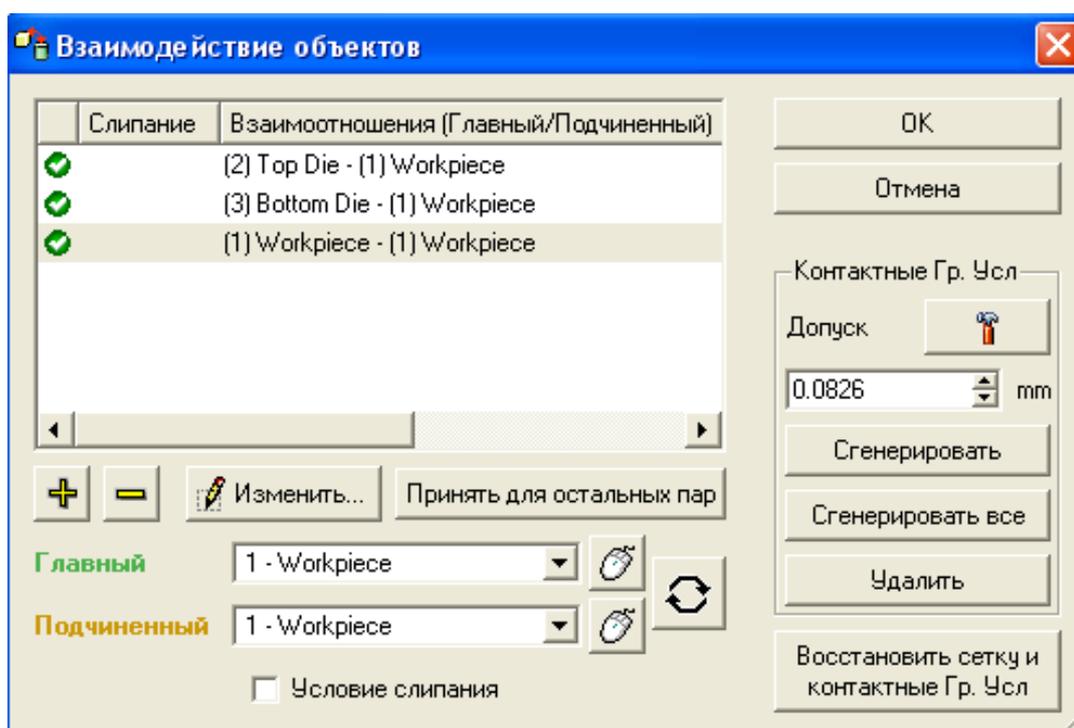


Рисунок 2.76 - Создание взаимодействия объектов

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными двумя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется между двумя жёсткими инструментами. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как Подчинённый объект. Добавляем отношение Заготовка-Заготовка.

Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений.

Так как в этом расчете не будет приниматься во внимание никакой передачи температуры, единственное свойство, которое должно быть определено – трение.

Нажмите кнопку Изменить. Появится окно показанное на рисунке 2.77.

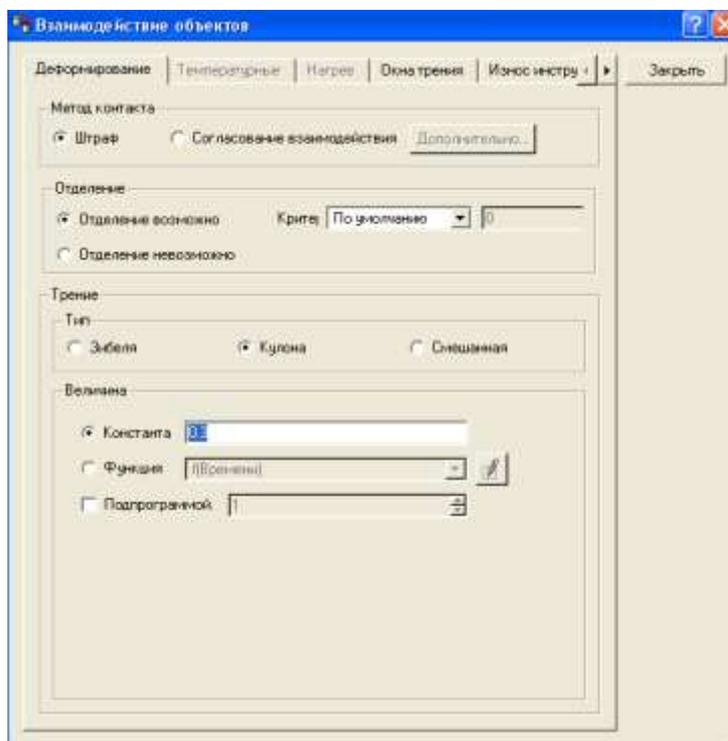
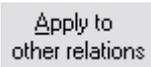


Рисунок 2.77 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна INTER-OBJECT.

Теперь, когда отношения между верхним инструментом и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой и нижним инструментом.

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, кнопкой  можно скопировать свойства первого отношения во все остальные. После этого, оба отношения будут иметь коэффициент трения по Кулону 0,3.

Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом

(подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы, находящиеся на линии контакта не попадут в контакт, и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан в окне Экран, изображенном на рисунке 2.78, как цветные точки на верхней и нижней поверхностях заготовки.

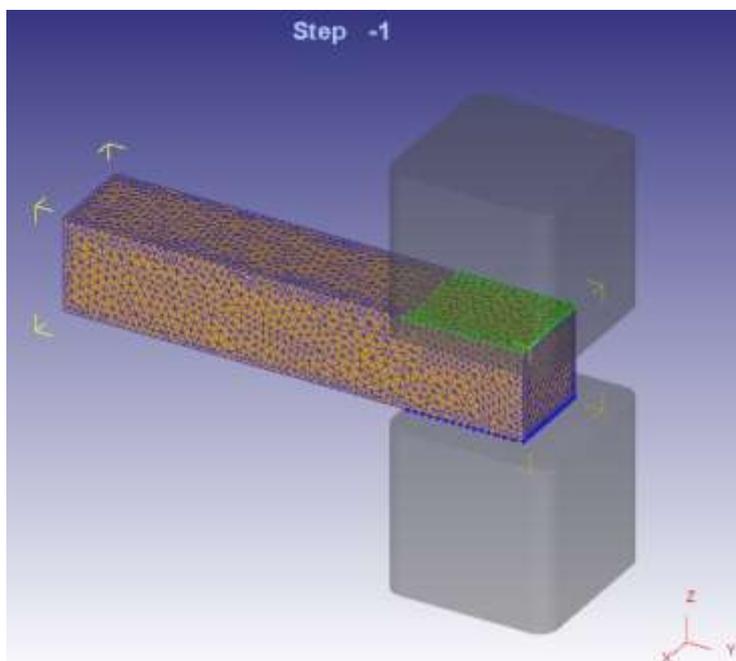
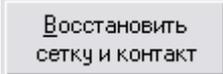


Рисунок 2.78 - Создание контактных поверхностей между объектами

Замечание: если задано слишком большое значение точности при

создании контакта и сетка заготовки разрушена, кнопка  может отменить создание контакта.

Когда контакт создан, нажмите на кнопку , которое закроет окно «взаимодействие объектов».

## Установка параметров расчета

Выберите верхний боек в дереве объектов и нажмите на кнопку . В появившемся окне, показанном на рисунке 2.79, установите направление движения верхнего бойка вниз (-Z), и постоянную скорость 1 мм/сек.

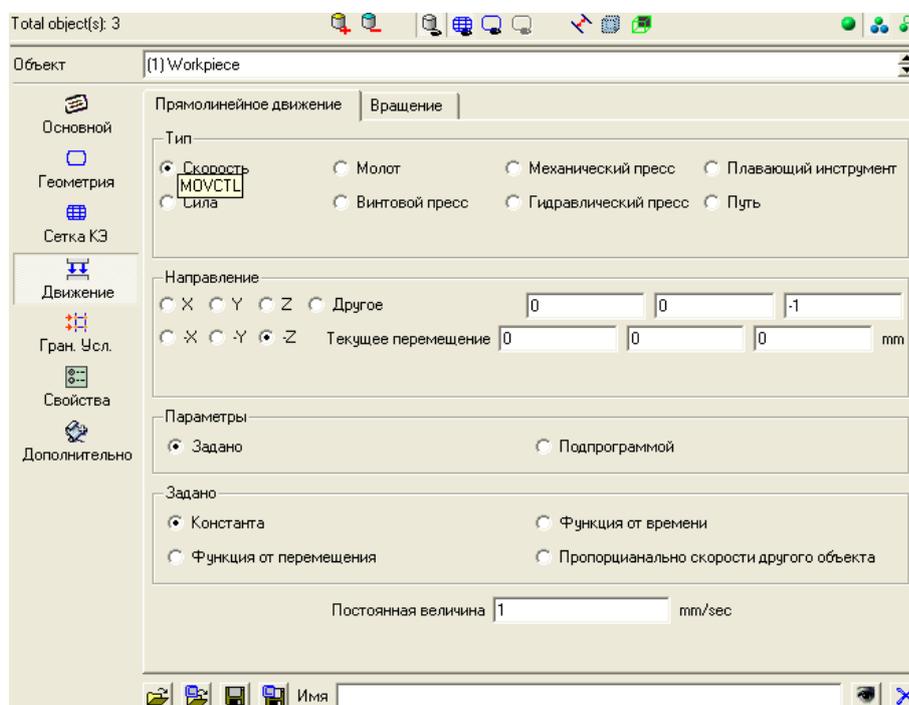


Рисунок 2.79 - Окно «Движение»

Таким образом мы задаём направление и скорость движения инструмента.

Нажмите  для просмотра управления временными шагами. Убедитесь, что номер начального шага установлен как -1. Отрицательный знак говорит о том, что это шаг, записанный препроцессором (шаги решения

записанные в базу данных в процессе расчета будут положительны). Установите число шагов расчета 3. Установите приращение шага при сохранении 1 («через сколько шагов сохранять»). Каждый последующий шаг решения будет записан в базу данных. Установите главный инструмент Top Die. Обычно главным инструментом является тот, который перемещается при расчете, и он используется для контроля шага и остановки.

Для определения этого значения может быть использован инструмент Измерить (Measure). Используя эту технику нажмите  и измерьте наименьший элемент в верхнем или нижнем правом углу заготовки. Давайте установим размер шага как 2,7 мм/шаг, а число шагов 3. Нажмите кнопку  когда закончите, чтобы закрыть окно управления расчётом (рисунок 2.80).

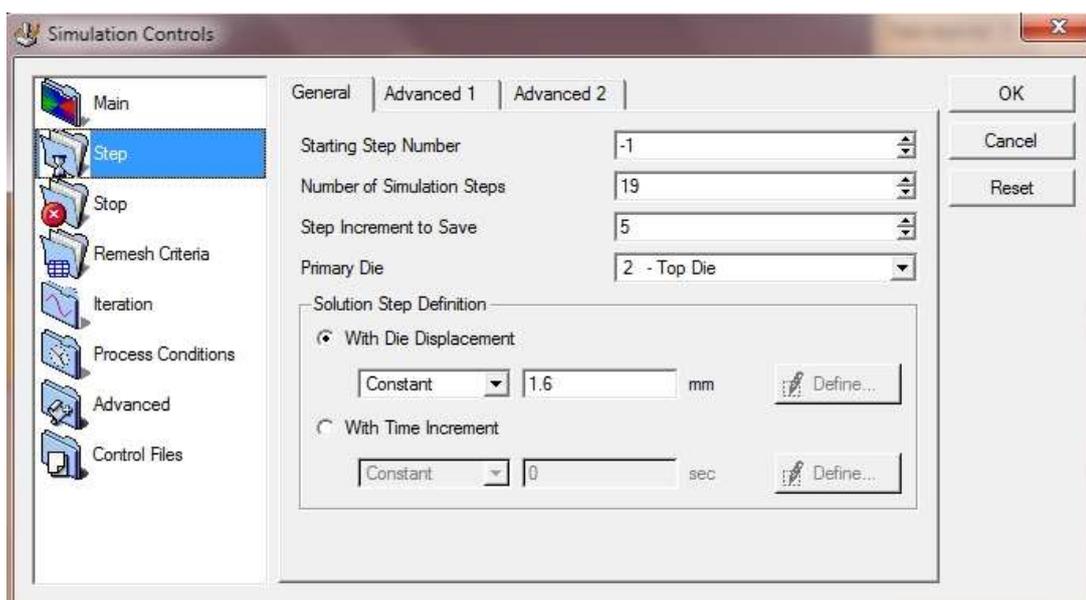
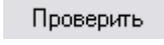
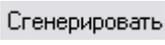


Рисунок 2.80 - Окно «Настройки задачи»

## Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных нажав кнопку , нажмите кнопку  Проверить, когда появится сообщение  База данных может быть сгенерирована нажмите кнопку  Сгенерировать и начнётся генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на

рисунке 2.81.

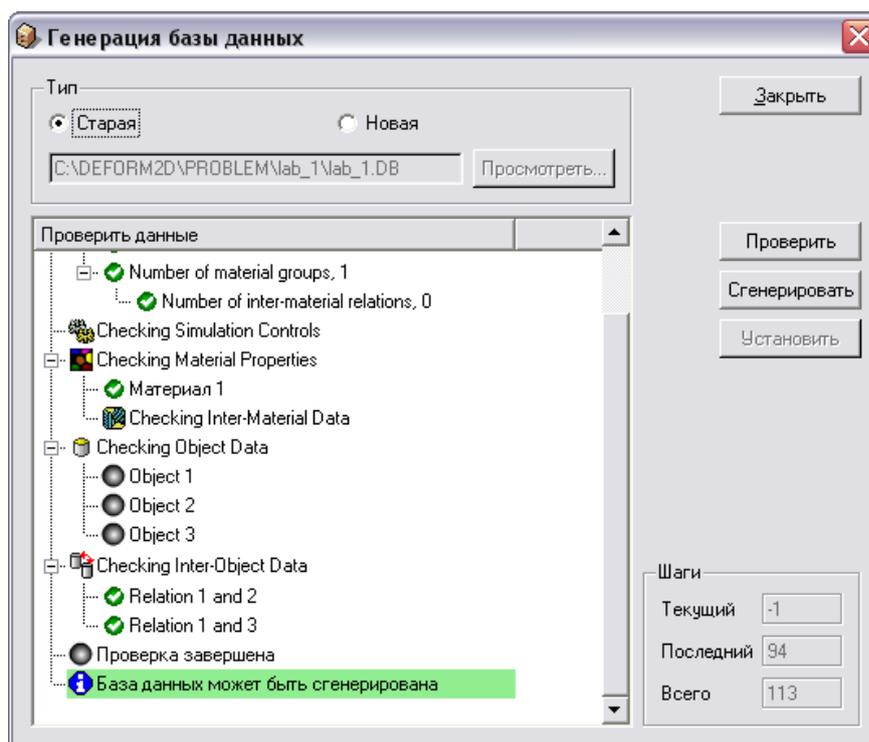


Рисунок 2.81 - Окно «Генерация базы данных»

При появлении сообщения  «Запись базы данных завершена», можете закрыть Deform3D – Preprocessor.

### Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой [Старт](#) или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
*****Message*****  
Simulation is completed and stopped at the user specified time step .
```

После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой DEFORM-2D/3D Post в правом нижнем углу окна.

### Анализ результатов

Посмотрите поэтапно процесс протяжки. Стадии процесса протяжки представлены на рисунок 2.82.

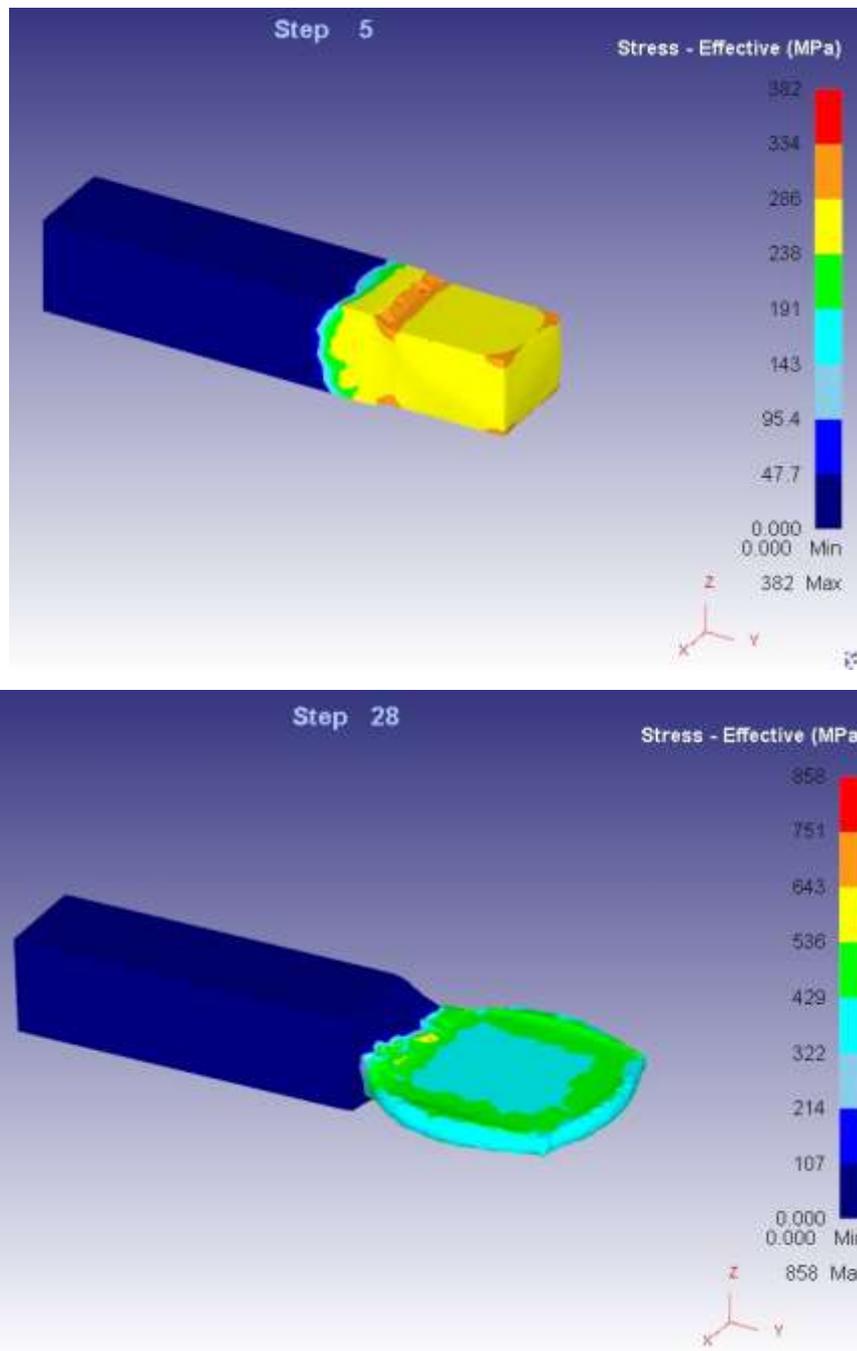


Рисунок 2.82 - Стадии процесса протяжки

Постройте индикаторную диаграмму процесса.

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке 23. Выберите только верхний инструмент Top Die.

По оси X (X – Axis) откладывается перемещение верхнего бойка (Stroke), а по оси Y (Y – Axis) усилие (Y - Load), прикладываемое к верхнему бойку и необходимое для деформации заготовки. Нажмите

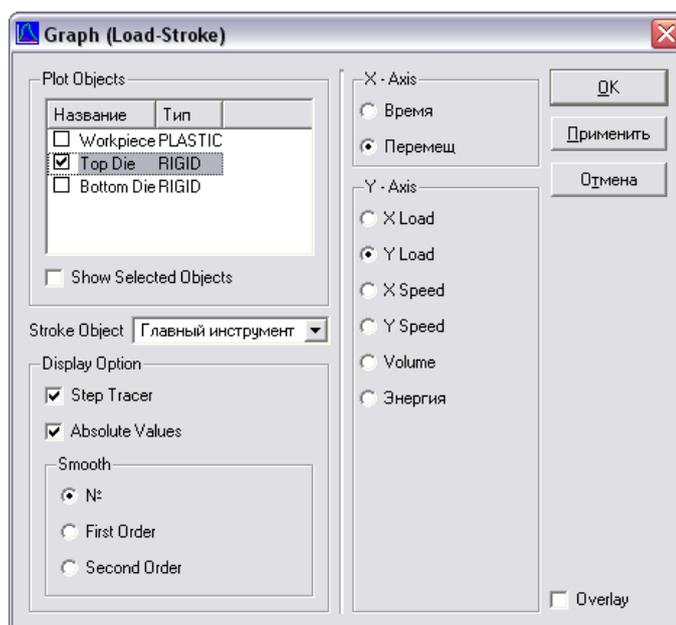


Рисунок 2.83 - Окно построения графиков «Graph(Load-Stroke)»

В основном окне появится индикаторная диаграмма, изображенная на рисунке 2.84.

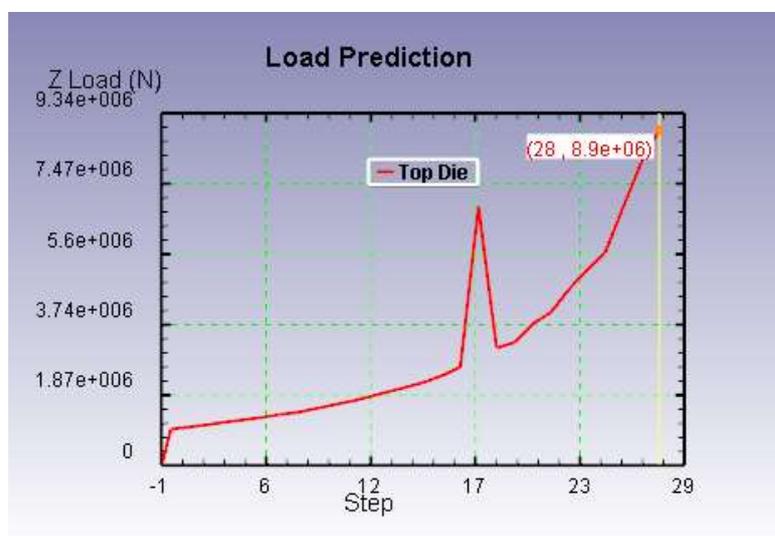


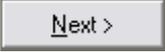
Рисунок 2.84 - График усилия в зависимости от перемещения верхнего бойка

Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого в дереве объектов наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide graph), таким же способом его можно опять вывести на показ (show graph). Аналогичным образом можно скрывать

другие объекты графики.

В постпроцессоре имеются средства, позволяющие пользователю наносить координатную сетку Flow Net (сетку течения), для лучшего понимания моделируемого процесса деформации объекта. Как уже говорилось ранее, сетка течения представляет собой рисунок, нанесённый на поперечное сечение объекта и подвергающийся деформации наряду с этим объектом. Искажение рисунка позволяет судить о деформации определённой области.

Щёлкните на иконку  для открытия окна FLOWNET, показанного на рисунке 2.85. Мы хотим нанести рисунок на недеформированную заготовку и посмотреть как исказится рисунок в ходе моделируемого процесса.

Выделите шаг -1 в списке шагов и нажмите кнопку  рядом с надписью Starting Step (начальный шаг). Выделите последний шаг в списке шагов и нажмите кнопку  рядом с надписью Ending Step (конечный шаг). Нажмите .

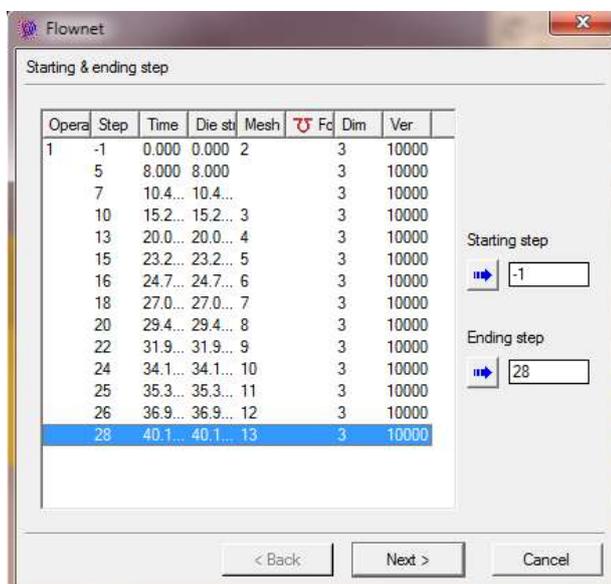


Рисунок 2.85 - Окно «Flow Net»

Выберите прямоугольный вид сетки (Rectangular grid) и нажмите . Установите количество ячеек в сетке (Number of Grids) 15 в

направлении X, 60 в направлении Y, 3 в направлении Z . Нажмите  для просмотра исходной (недеформированной) сетки. Нажмите  и  для создания сетки течения (рисунок 2.86).

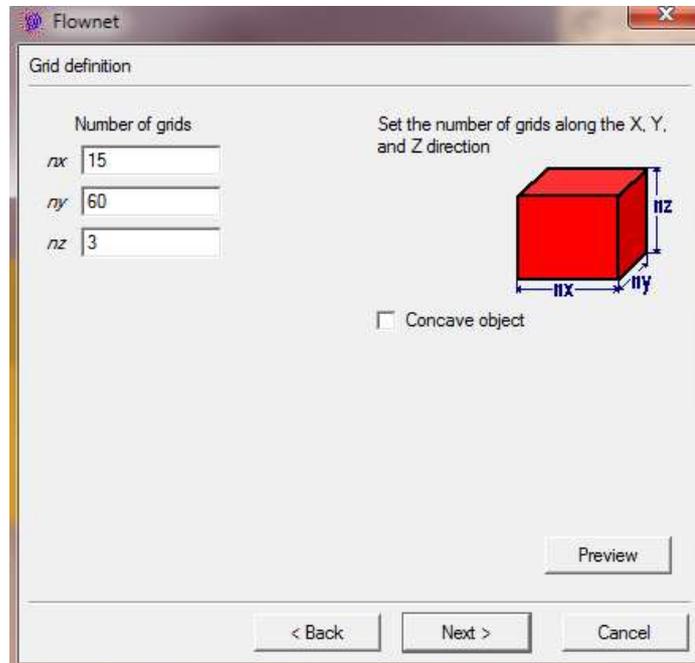
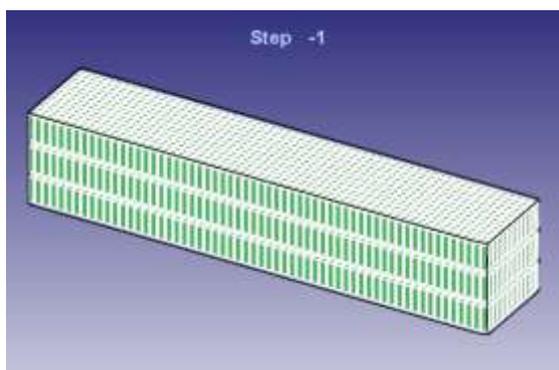
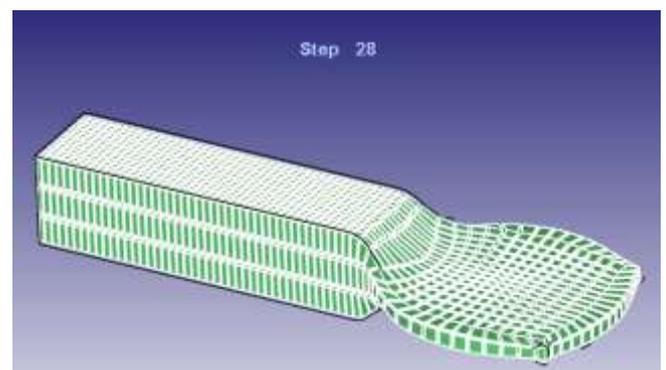


Рисунок 2.86 - Окно «Создания сетки течения металла»

Посмотрите поэтапно процесс деформации координатной сетки, показанный на рисунке 2.87.

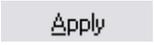
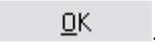


а



б

Рисунок 2.87 - Процесс деформации координатной сетки до (а) и после (б) протяжки

Чтобы увидеть, как происходит перемещение металла в слитке в период протяжки, постройте векторную диаграмму скоростей течения (рисунок 2.88). Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и в разделе Скорости (Velocity) поставьте галочку напротив Основных скоростей (Total Vel). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив векторного отображения (Vector Plot). Нажмите  и . Теперь вы можете увидеть как изменяется скорость движения отдельных областей заготовки.

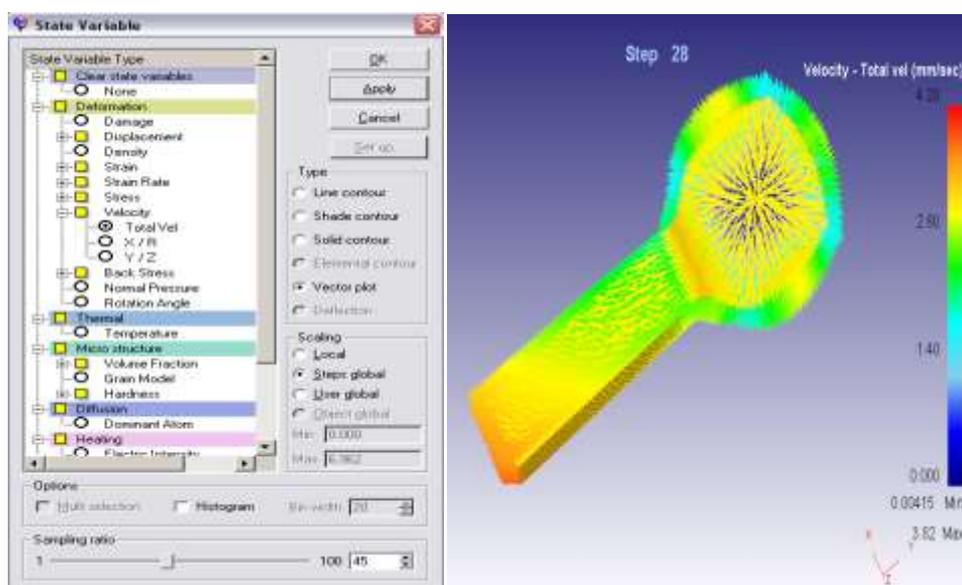
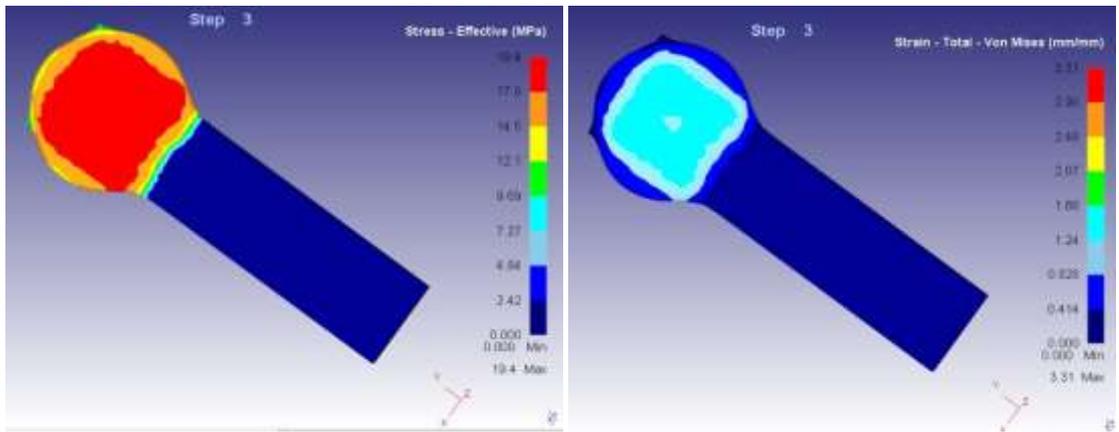


Рисунок 2.88 - Векторное поле перемещений

Нажмите кнопку Отслеживание Точек  (Point Tracking), и начинайте выбирать точки от центра к периферии заготовки, примерно в середине заготовки. Когда точки выбраны нажмите  и затем  в окне Point Tracking.

Когда точки выбраны, вы можете построить графики интенсивности напряжений и деформаций в этих точках за время всего процесса протяжки, показанный на рисунке 2.89. Для этого выберите Stress-Effective и Strain-Total-vonmises в списке диаграмм. Система автоматически построит графики для ваших точек.



а

б

Рисунок 2.89 - Распределение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б)

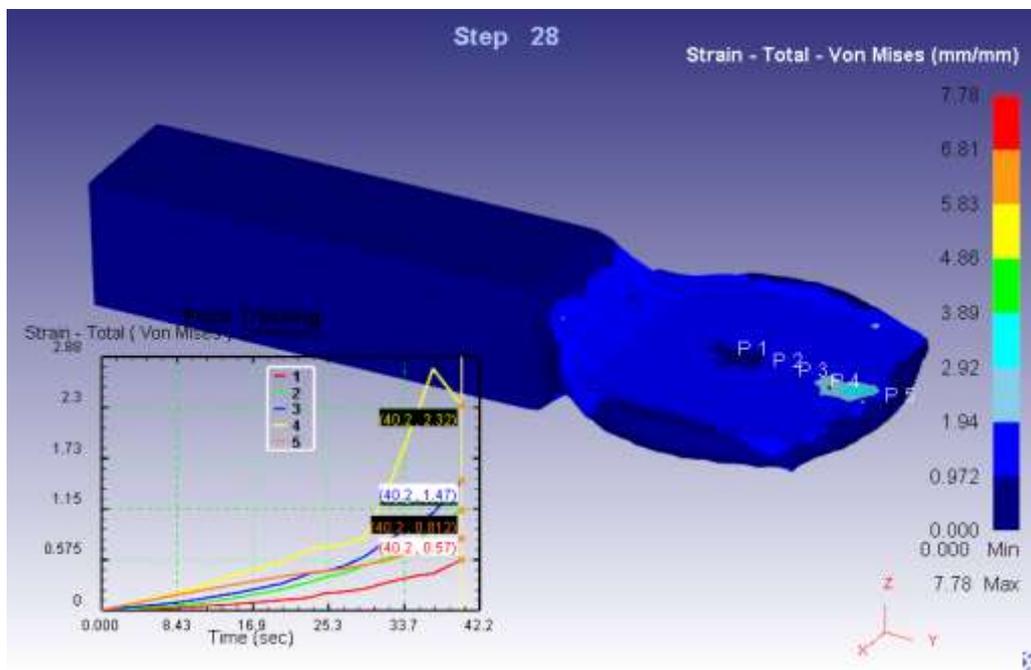


Рисунок 2.90 - Характер изменения интенсивности напряжений в зависимости от перемещения

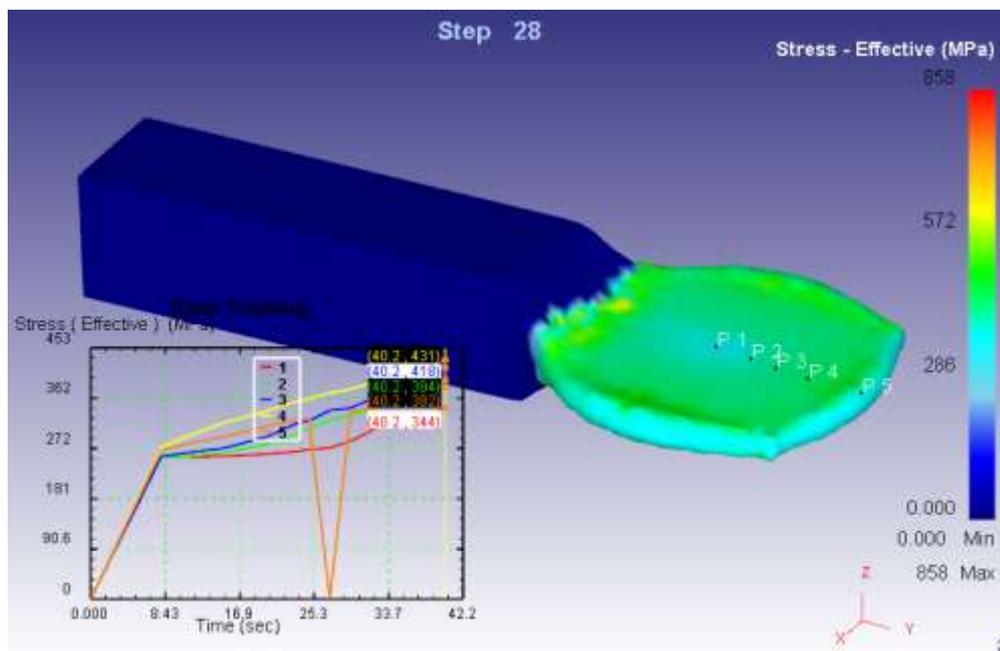


Рисунок 2.91 - Характер изменения интенсивности деформаций в зависимости от перемещения

По этим графикам можно судить о характере деформации на разных участках заготовки за всё время процесса протяжки.

Аналогично проводим последующие процессы протяжки, смещая верхний и нижний бойки в нужном направлении.

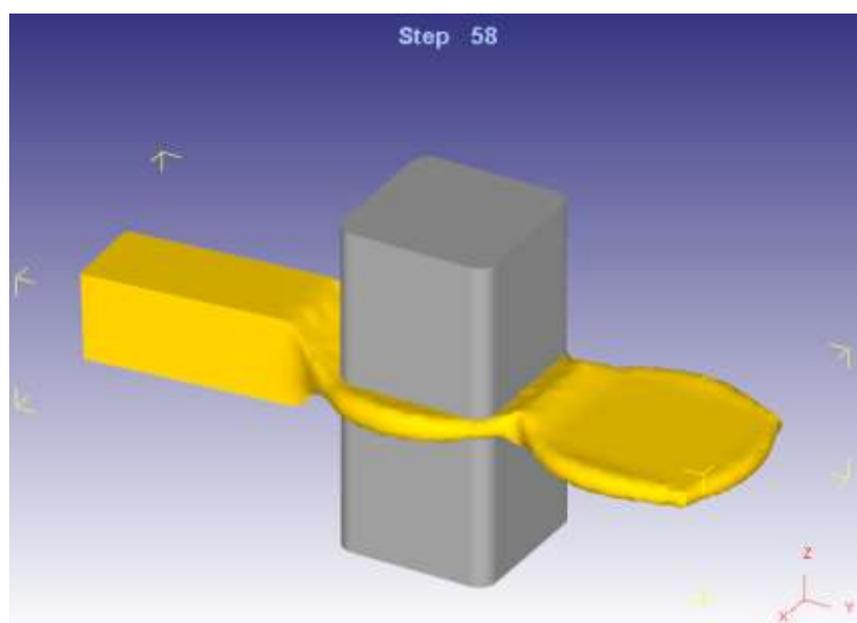


Рисунок 2.92 - Вторая стадия процесса протяжки

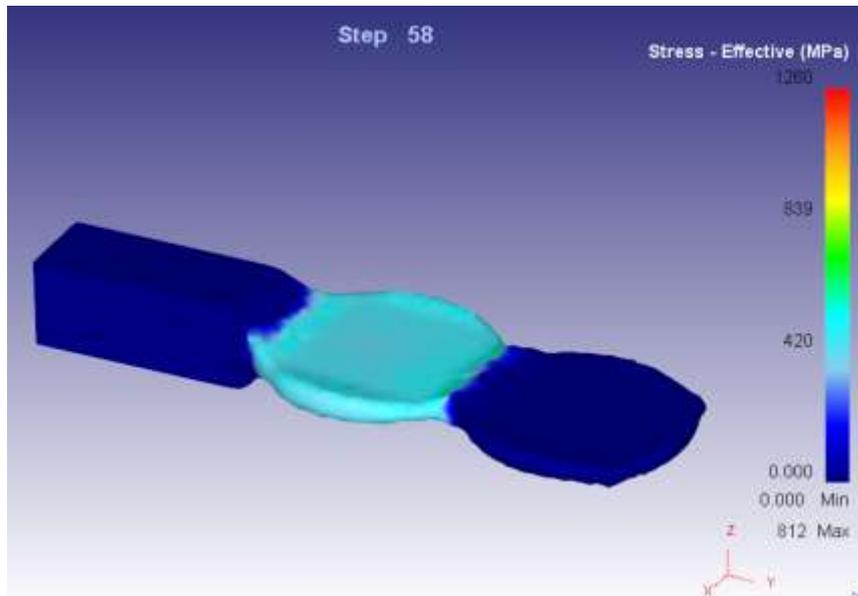


Рисунок 2.93 - Распределение интенсивности напряжений

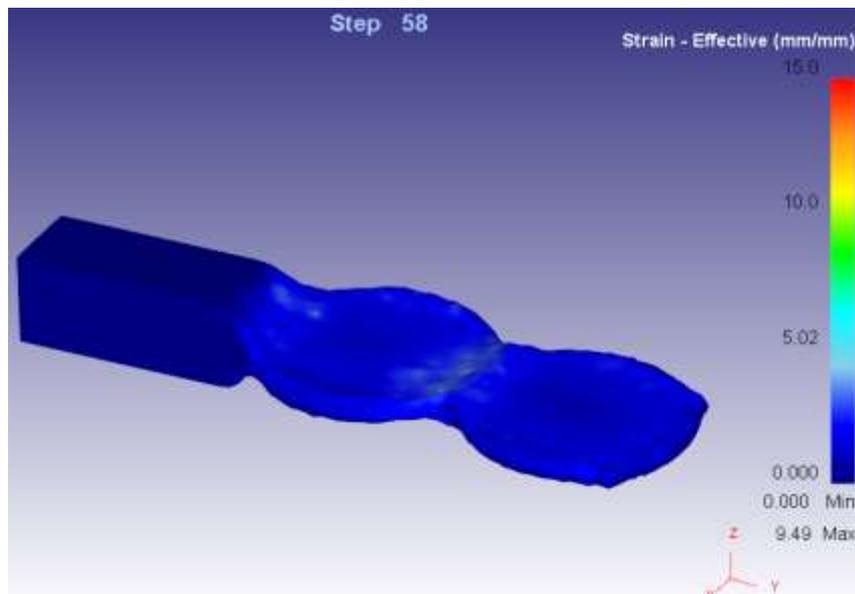


Рисунок 2.94 - Распределение интенсивности деформаций

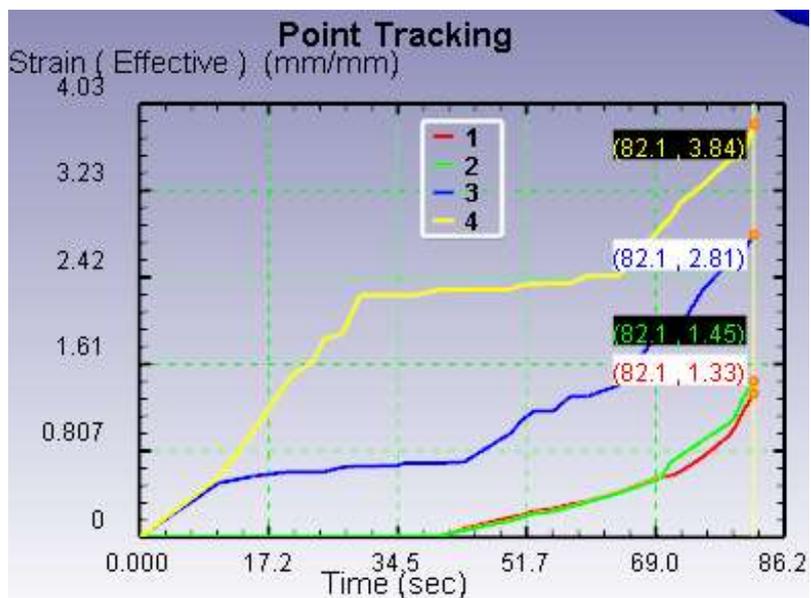


Рисунок 2.95 - Характер изменения интенсивности деформаций в зависимости от перемещения

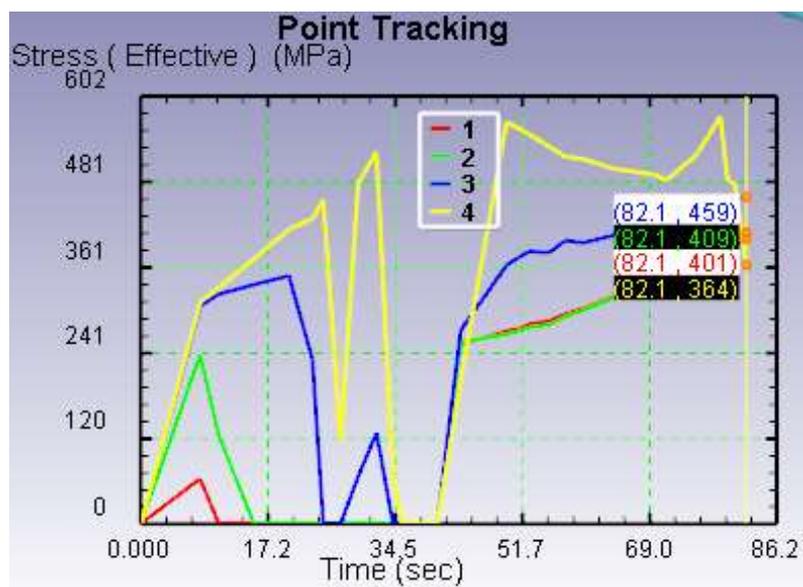


Рисунок 2.96 - Характер изменения интенсивности напряжений в зависимости от перемещения

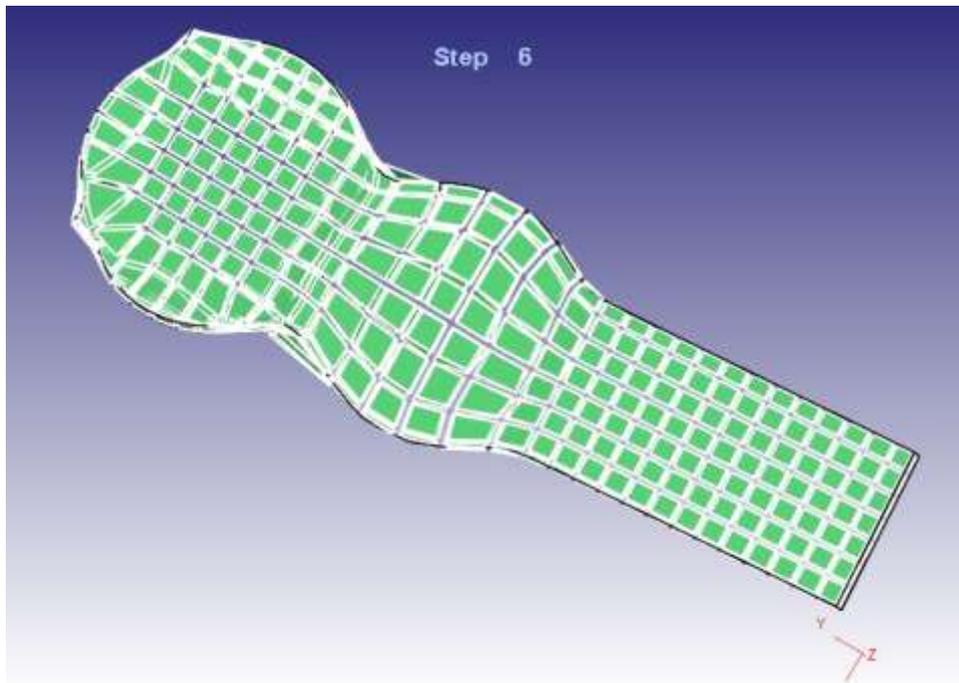


Рисунок 2.97 - Процесс деформации координатной сетки

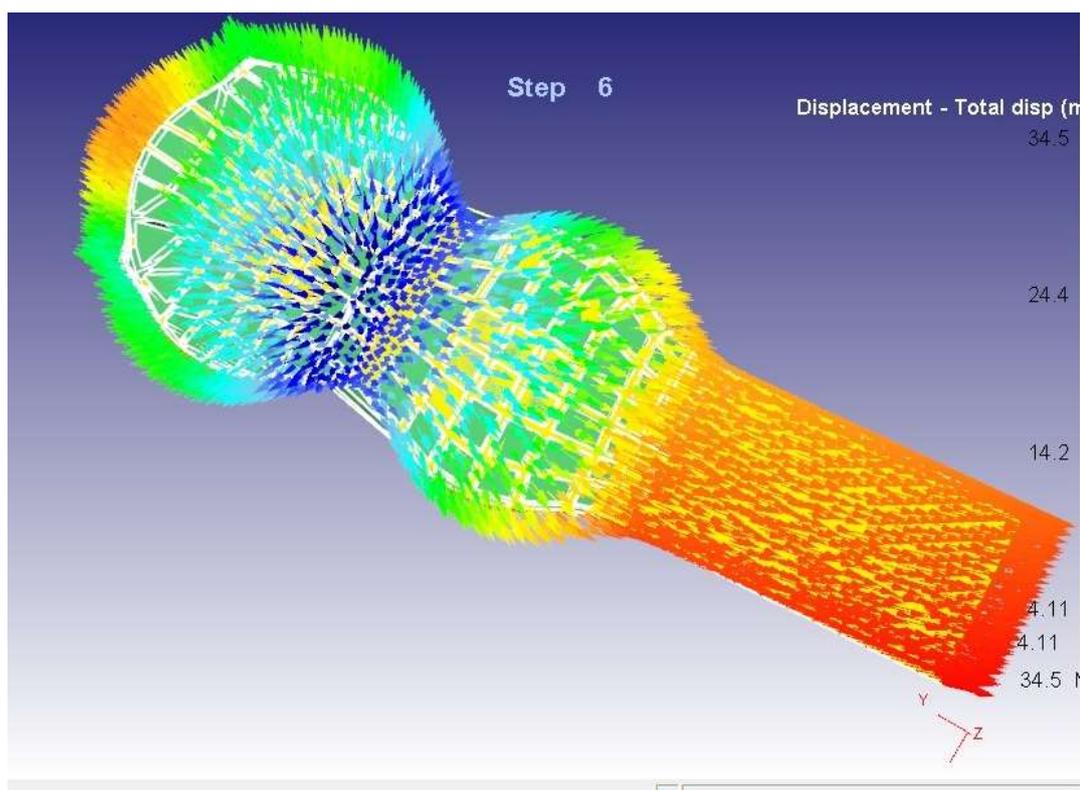


Рисунок 2.98 - Векторное поле перемещений

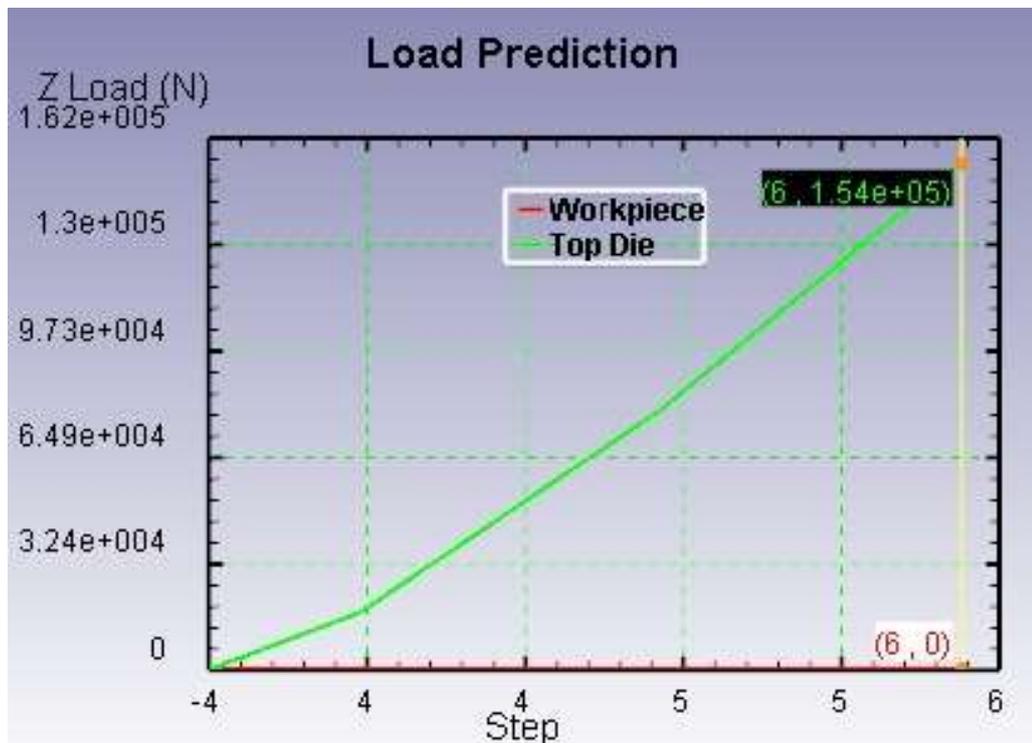


Рисунок 2.99 - График усилия в зависимости от перемещения верхнего бойка

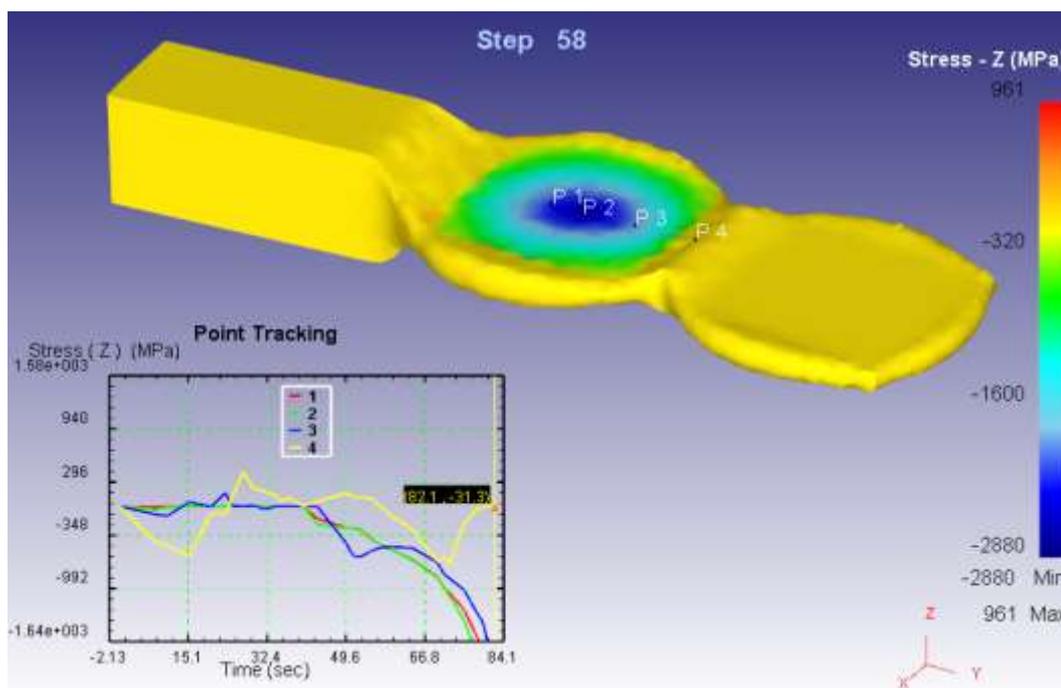


Рисунок 2.100 - График распределения нормальных напряжений на контактной поверхности заготовка - боек

### Содержание отчёта

1. Стадии процесса протяжки.
2. Индикаторная диаграмма усилия в зависимости от перемещения верхнего бойка.
3. Процесс деформации координатной сетки
4. Векторная диаграмма скоростей течения металла при протяжке.
5. Распределение интенсивности деформаций.
6. Распределение интенсивностей напряжений.
7. Анализ графических результатов.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой физический смысл коэффициентов удлинения и уширения?
2. Какие аналитические выражения применяются для расчета коэффициентов удлинения и уширения?
3. Какие технологические параметры влияют на коэффициент уширения?
4. Как влияет на коэффициент уширения относительная подача, степень деформации?
5. Как связаны между собой коэффициенты удлинения и уширения?
6. Каковы ограничения степени деформации при протяжке?
7. Какой закон трения используется в расчете процесса?
8. Как задать геометрию инструмента?
9. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?
10. Как расположить объекты по отношению друг к другу?
11. Как создать базу данных?

## **2.4 Раскатка**

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе раскатки кольцевой заготовки из алюминиевого сплава в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-3D.

### **Краткие теоретические сведения**

Производство цельнокатаных колец из легированных и жаропрочных сталей является сравнительно новым. В работах, опубликованных ранее и освещающих вопросы производства цельнокатаных колец, почти не содержатся технологические разработки. Как правило, в них описываются давно известные способы производства колец, только из углеродистой и среднелегированной сталей.

Производство колец из заготовок прямоугольного сечения сопровождается большим отходом металла в стружку и большой трудоемкостью обработки их резанием. Устаревшие способы производства колец из углеродистой стали с большими припусками нельзя применить для изготовления кольцевых деталей из дорогостоящих жаропрочных сплавов.

Большое количество стальных колец различного назначения применяется в судостроительной промышленности. Каркас корпуса небольших судов делается из стальных колец, связанных между собою. Плавающие и летательные аппараты сигарообразной формы, различные двигатели, машины и механизмы содержат в себе большое количество колец ответственного назначения.

### **Ковка колец**

Ковка является единственным способом изготовления деформированных колец, если в распоряжении завода нет иных приспособлений для их изготовления. В случаях, когда на заводе имеются машины для раскатки колец или другие приспособления, ковка колец является лишь грубой

предварительной операцией, после которой кольцо раскатывается до более точных размеров. В большинстве случаев при изготовлении цельнокатаных колец предварительная ковка их является неизбежной. Брак в виде трещин и других дефектов, мало заметных невооруженному глазу, вскрывающийся при дальнейшей раскатке колец, часто зарождается при предварительной ковке. В целях устранения потерь от брака необходимо тщательно изучать ковку заготовок для последующей раскатки колец.

Исходная заготовка для изготовления кованого кольца может находиться в различном состоянии. Выбор исходного состояния заготовок зависит от размеров кольца, химического состава, физических и механических свойств материала.

Заготовки из пластичной среднеуглеродистой и малолегированной стали могут получаться в литом состоянии в виде длинных слитков, разрезаемых на мерные куски, или же отлитыми индивидуально на каждое кольцо. Такие заготовки пользуются в настоящее время на металлургических заводах при изготовлении колец из сталей марок: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 38Х, 40Х и т. п. Для крупных колец, весом более 50 кг. литая заготовка является более рациональной, так как при применении ее получается меньше отходов по сравнению с ковкой или катаной заготовкой. В связи с этим некоторые металлургические заводы стремятся производить высококачественную отливку заготовок из легированных сталей и применять их для последующейковки колец.

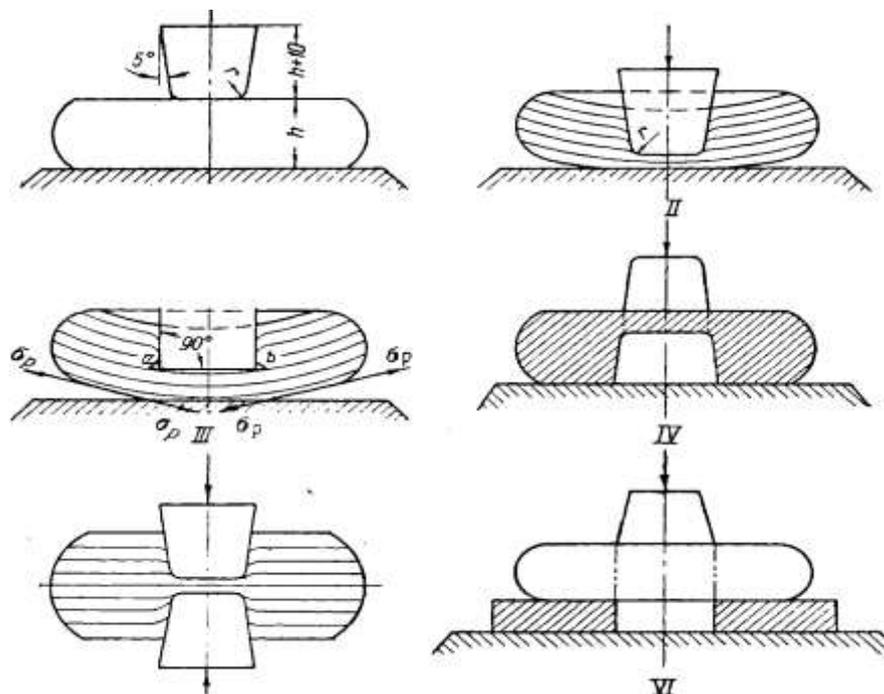


Рисунок 2.101 - Схема деформаций и возникающих напряжений в заготовке при прошивке разными способами.

Приспособление для раскатки колец в виде скобы является мало-производительным, так как установка заготовок на скобу перед ковкой и снятие их со скобы послековки являются трудоемкими и занимают много времени. При специализированном производстве колец ковкой на молотах удобнее устанавливать на шаботе роговую наковальню, как это показано на рисунке 2.103. Крепление роговой наковальни выполняется клином, как и крепление обычных бойков. Массивная роговая наковальня воспринимает удары молота более жестко. Рог наковальни является сменным, работает как нагруженная ударом консоль и может иметь разные сечения. Крепление сменного рога производится клином, для чего его крепежная часть имеет квадратное сечение с уклоном граней под клин. Роговая наковальня молота является более удобным приспособлением для раскатки колец: позволяет с помощью крана навешивать раскатываемое кольцо на рог и быстро снимать его по окончанииковки.

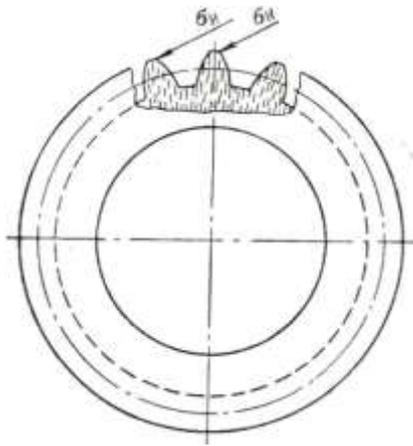


Рисунок 2.102. Изгибающая нагрузка относительно волокнистой структуры на кольцах для зубчатых сцеплений, изготовленных осадкой и прошивкой.

Напряжения в замкнутом кольцевом контуре при ковке его на круглой оправке появляются в зависимости от распределения деформаций на поверхностях внешнего и внутреннего контуров, создаваемых ударом плоского бойка (рисунок 2.103). Изображенная на рисунке 3 схема представляет случай, когда усилие  $P$  передается через сравнительно большую поверхность  $F_{и}$ , образуемую ударом бойка, с внешнего контура кольца на поверхность круглой оправки  $F_{в}$ .

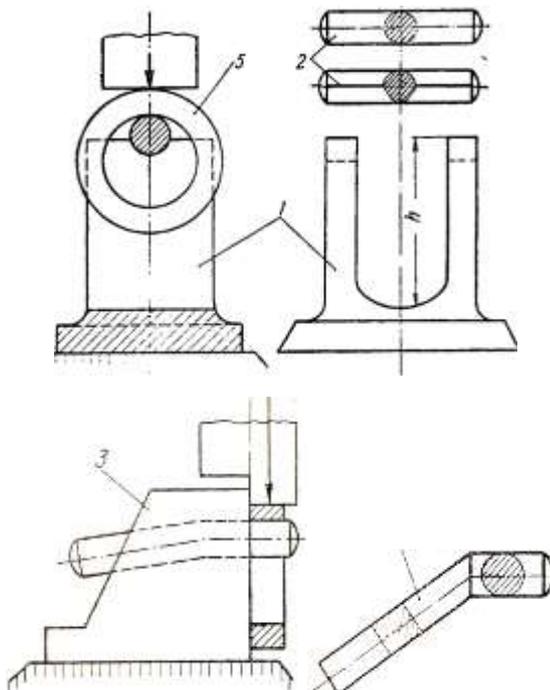


Рисунок 2.103 - Схема приспособления для раскатки колец свободной ковкой

## Раскатка колец

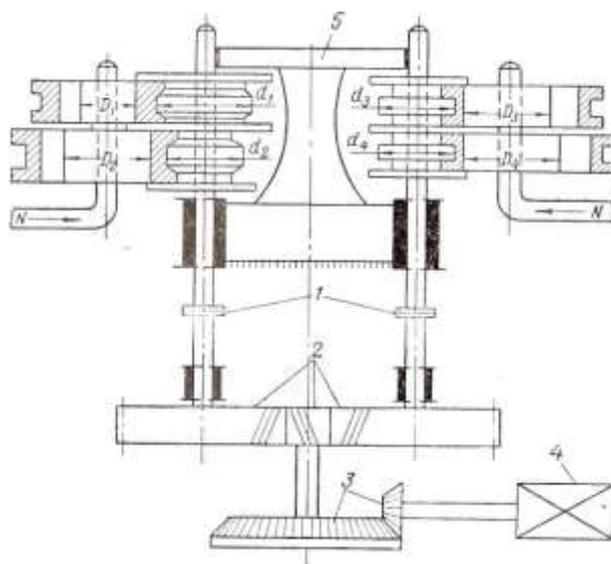
Малопроизводительный способ изготовления колец только одной ковкой выгодно заменять комплексным способом, состоящим изковки и прокатки кованых заготовок на специальных кольцепрокатных станах. В этом случае предварительная ковка дает грубое кольцо для окончательной более точной прокатки на стане. Толщина обода кованых колец, подаваемых на такой стан, имеет большой припуск. За счет обжатия утолщенного обода при прокатке увеличивается диаметр колец.

Кованая кольцевая заготовка имеет деформированную, подготовленную для прокатки структуру и поэтому является более качественной по пластичности при прокатке и по конечной степени обжатия готового кольца после прокатки. Раскатанные таким способом кольца получаются более прочными потому, что в процессе изготовления проходят большую суммарную степень обжатия.

В некоторых случаях кольцевые заготовки для прокатки на стане подаются в литом состоянии, минуя осадку, прошивку, разгонку и калибровку. Раскатанные кольца из литых заготовок без осадки и прошивки получаются менее прочными (как менее деформированные).

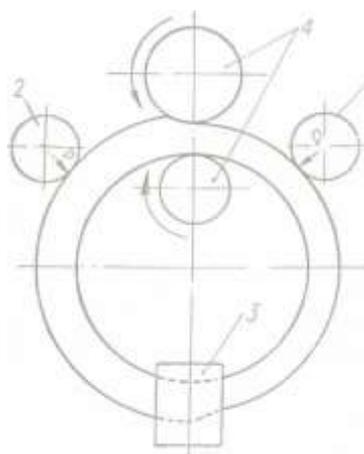
Производительный способ получения кольца при прокатке его в двух или нескольких клетях представлен на рисунок 4. Данная двухклетевая раскатная машина, позволяющая вести прокатку в четырех последовательно калиброванных валка. В подобной машине кованая заготовка в клети предварительной прокатки, расположенной слева на специально сконструированном столе, подается в 1-й ручей, в котором и раскатывается до определенного диаметра. При этом получается наметка требуемого профиля. После этого заготовка сбрасывается ниже во 2-й черновой ручей и прокатывается также до заданного диаметра, в результате чего профиль кольца несколько уточняется. Затем прокатываемая заготовка передается в чистовую клеть, расположенную справа, в 3-й ручей, где калибруется предварительно до

определенного диаметра. Затем кольца сбрасывается вниз и подается в 4-й ручей, где калибруется окончательно до заданных размеров. Точность такой прокатки профилированного кольца обеспечивается тем, что при переходах от одного калибра в другой диаметр валков изменяются соответственно так, чтобы степень деформации возрастала на фасонной поверхности кольца.



1-фрикционные муфты, 2-шевронные зубчатые колеса, 3-конические зубчатые колеса, 4-электродвигатель. 5 - съемные скользящие опоры на два ведущих вала

Рисунок 2.104 - Схема раскатки профилированных колец на двухклетьевом стане в 4 переходных ручьях



1-опорный ролик на изгибе внешнего контура,  
2-упорный ролик, ограничивающий боковое смещение кольца влево,

3-ролики, поддерживающие кольцо с торцов, 4-валки

Рисунок 2.105 - Схема расположения опорных роликов, удерживающих ось вращения кольца во время прокатки

### **Отливка колец**

Одним из старых способов изготовления колец, применяющихся до настоящего времени, является отливка. Изготовление литых колец может производиться двумя способами: 1) литье в земляные формы и 2) центробежное литье в кокиль.

Отливкой в земляные формы можно получить кольца с фасонным профилем сечения их обода, так как такая формовка позволяет создать любую форму сечения кольца. При отливке в землю получаются неизбежные приливы металла в литниках и выпарах, которые затем обрезаются и составляют отходы в виде кусков, идущих в переплав. Основным недостатком литых в землю силовых колец является ограничение их применения в технике по причине недостаточно плотной структуры. Большой брак, вызванный внутренними пороками в виде раковин и различных включений, вскрывается при последующей механической обработке. Присутствуют случаи, когда литое кольцо при окончательной обработке (почти готовое бракуется из-за вскрывшихся внутренних дефектов).

### **Сварные профилированные кольца**

Более перспективным способом изготовления кольцевых деталей по сравнению с литьем является производство сварных профилированных колец, согнутых из прокатанных, гнутых или прессованных профилей.

Независимо от того, каким из этих способов получена прямолинейная полоса с фасонным профилем, она должна быть разрезана на мерные заготовки, которые затем должны быть согнуты в кольца, сварены встык, проверены на прочность и выправлены в пределах размеров по чертежу заданного кольца. Следовательно, технико-экономические показатели производства сварных

колец зависят, главным образом, от обработки давлением до и после стыковой электросварки.

Операция стыковой электросварки в общей трудоемкости работ по производству сварных колец занимает небольшой объем. Поэтому различные режимы стыковой электросварки, влияющие на прочность сварного кольца, в данной работе не рассматриваются, а анализируются наиболее трудоемкие операции механической обработки и контроля прочности.

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

### **Создание новой задачи**

Запустите Deform-3D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

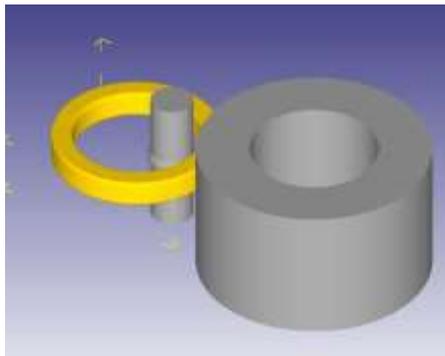


Рисунок 2.106 - Раскатка без поддерживающих роликов.

Создайте новую задачу кнопкой new problem , задание процесса показано на рисунке 2.107.

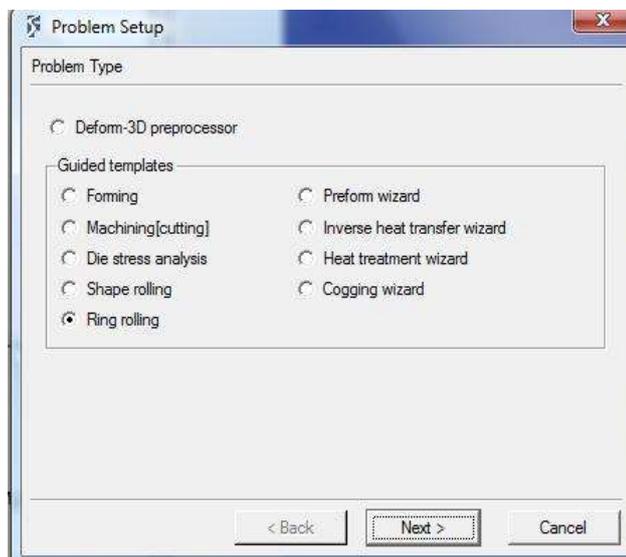
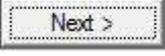


Рисунок 2.107 - Назначение процесса

Нажмите кнопку , в следующем окне (рисунок 2.108 выбор директории), выбирайте функцию и нажмите .

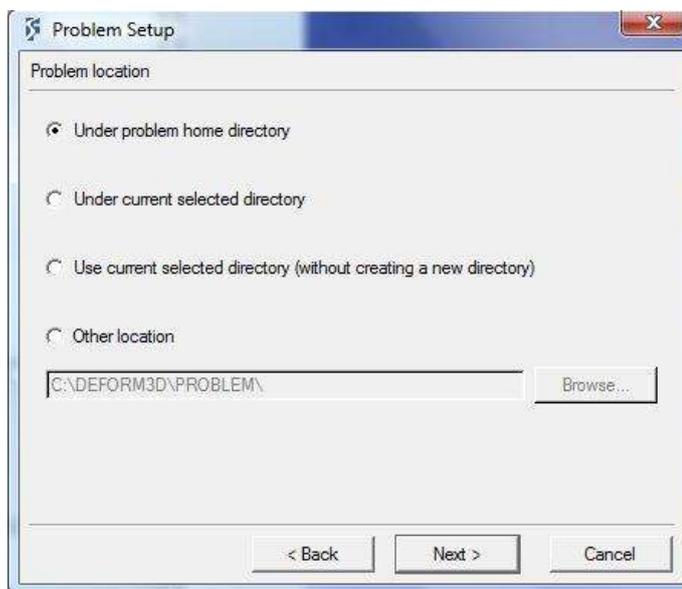


Рисунок 2.108. Выбор директории

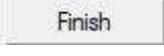
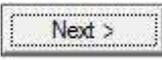
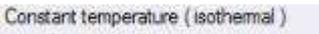
Далее задайте имя вашему процессу и нажмите . Затем появляется окно пре-процессора, где на первом этапе задается название операции и система измерения, показано на рисунке 2.109.



Рисунок 2.109 - Выбор системы измерения

Далее нажмите  . Затем еще раз нажмите  . Появилось окно  . В данном окне ставим отметку на против  .

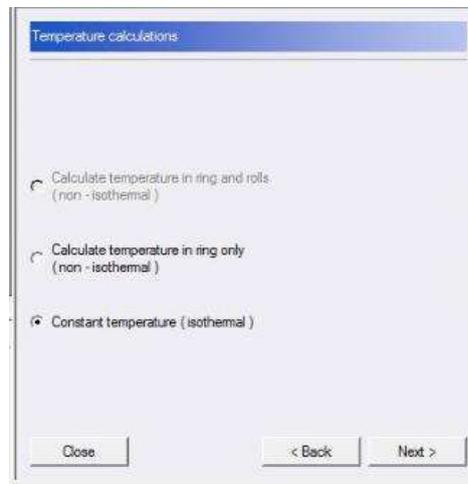


Рисунок 2.110. Задание термального режима

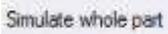
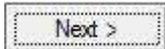
и нажмите  . В следующем окне  ставите отметку на против 



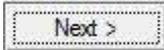
Рисунок 2.111 - Использование симметрии

и нажмите .

Далее задайте инструменты без использования поддерживающих роликов в соответствии с рисунком 2.112.



Рисунок 2.112 - Выбор инструментов

Нажмите .

## Задание параметров заготовки.

Задайте температуру заготовки в соответствии с рисунком 2.113.

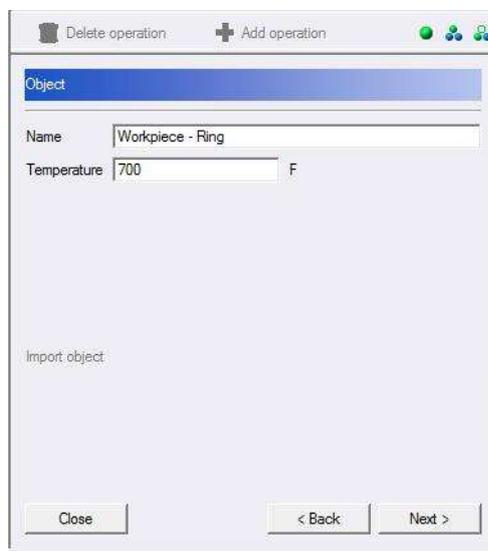


Рисунок 2.113 - Температура заготовки

Нажмите .

Задайте геометрические параметры заготовки, применяя [Use 2D geometry primitives](#).  
Показано на рисунке 2.114 и 2.115. В соответствии с данными.

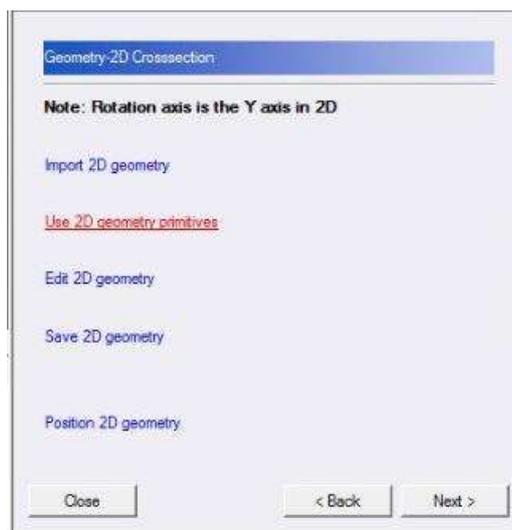


Рисунок 2.114 - Создание 2d геометрии

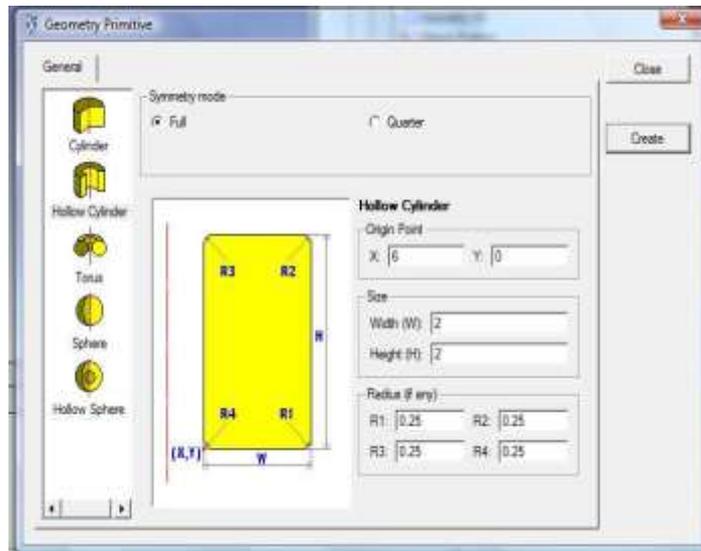
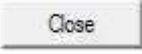
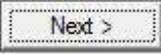
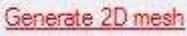
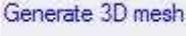


Рисунок 2.115 - Задание параметров заготовки

После введения данных нажмите кнопку  и затем . И кнопку .

Открывается окно задание сетки. Показано на рисунке 2.118. Нажмите на кнопку , появится изображение заготовки в 2D (рисунок 2.116). После построения, нажмите на кнопку , появится изображение заготовки в 3D (рисунок 2.117). Все данные касающиеся количества элементов сетки задаются согласно данным на рисунке 2.118.

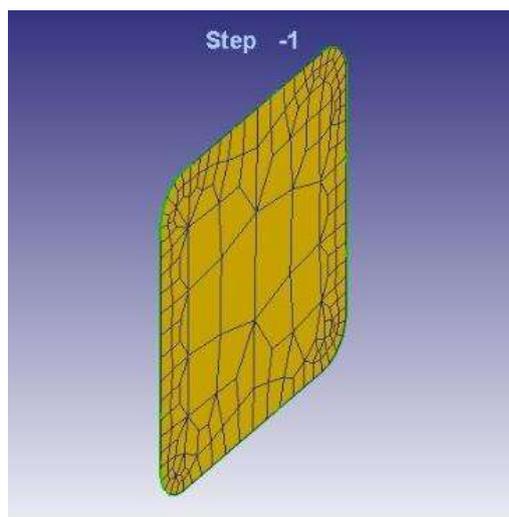


Рисунок 2.116 - Изображение сетки в 2D

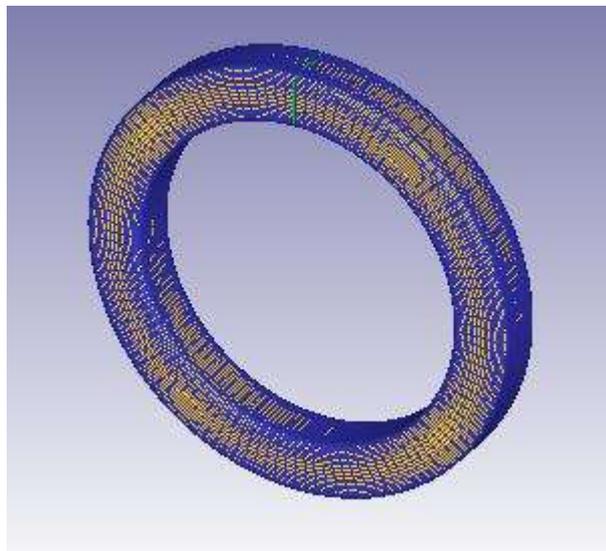


Рисунок 2.117 - Изображение сетки в 3D

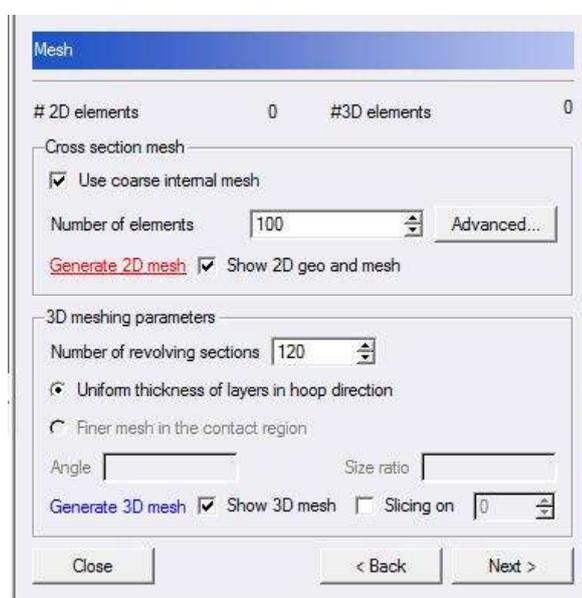
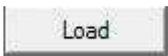
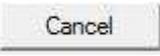
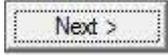


Рисунок 2.118 - Генерация 2D и 3D сетки

После совершения необходимых действий нажмите .

Следующий шаг, задание материала заготовки. В окне  выбираем функцию . Выбираем , что соответствует алюминию марки АМг3. Далее нажмите на кнопку  и закрываем окно кнопкой . Далее нажмите .

## Задание параметров приводного диска

Задайте имя верхнего инструмента, согласно рисунку 2.119 и нажмите

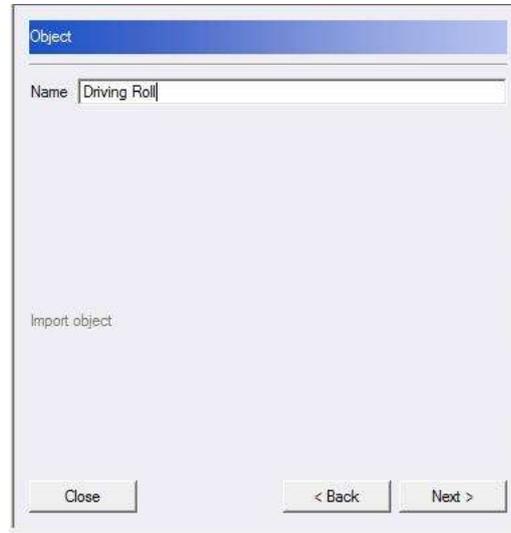
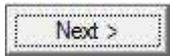


Рисунок 2.119 - Задание имени

В следующем окне при помощи функции [Use 2D geometry primitives](#), задаем геометрические параметры приводного диска. Данные вводим согласно рисунку 2.120.

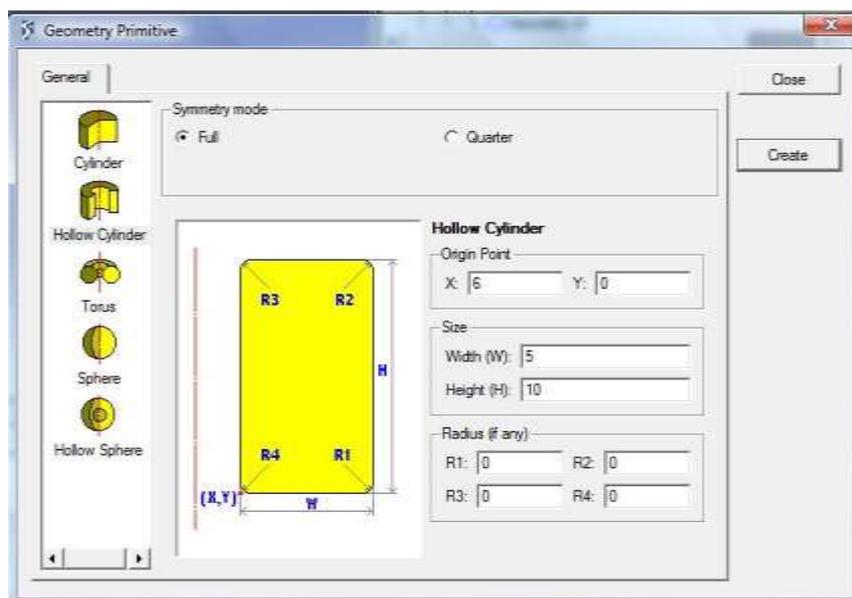
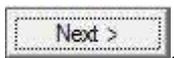


Рисунок 2.120 - Параметры приводного ролика

После введения данных нажмите  и . Затем нажмите



В открывшемся окне выбираем функцию , что позволяет без каких-либо затруднений построить 3D деталь приводного диска (рисунок 2.121).

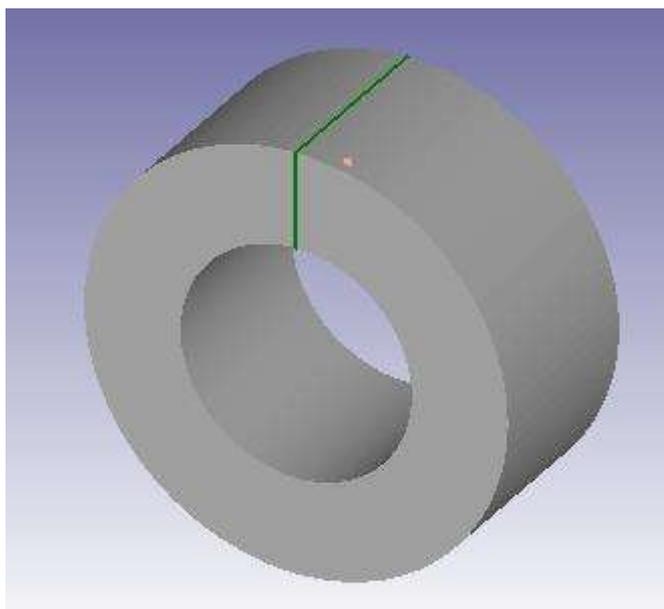


Рисунок 2.121 - Приводной ролик

Нажмите .

Появилось окно позиционирование объектов (рисунок 1.122). Нажмите строку . Далее открылось следующее окно (рисунок 2.123 - позиционирование). Ставим отметку напротив метода `offset`. Объект позиционирования - заготовка. В строке вектор, по оси Z устанавливаем значение 4. Нажмите  и затем . Объект выставлен в нужную нам позицию (рисунок 2.124). Нажмите .

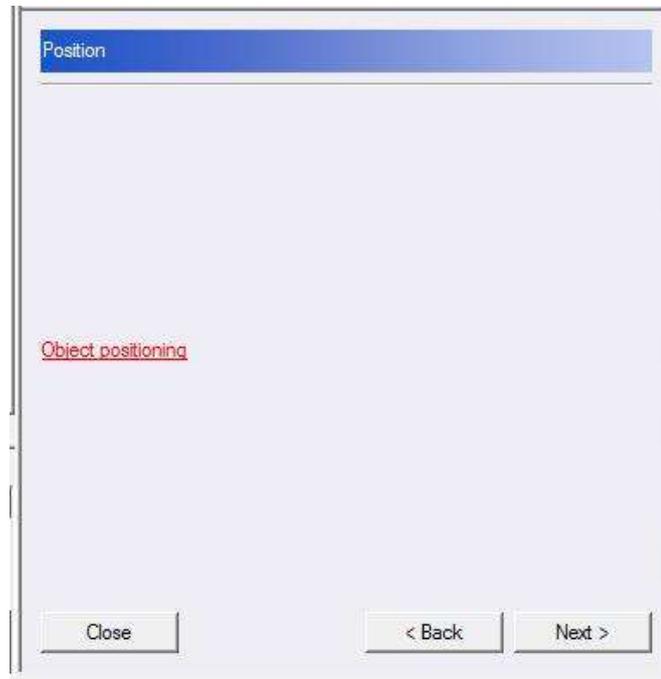


Рисунок 2.122 - Позиционирование объектов



Рисунок 2.123 - Позиционирование

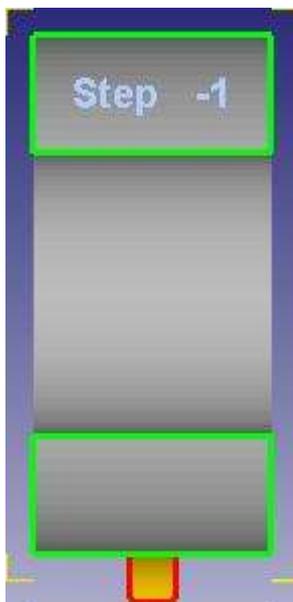


Рисунок 2.124 - Позиционирование

Следующий шаг, задание движение. В строке **Rotation** задается постоянная угловая скорость и ставится значение 4 . В строке **Speed** все значения остаются без изменений. Для того чтобы убедиться в правильности задания движения воспользуйтесь **Preview movement** . Нажмите **Next >** .

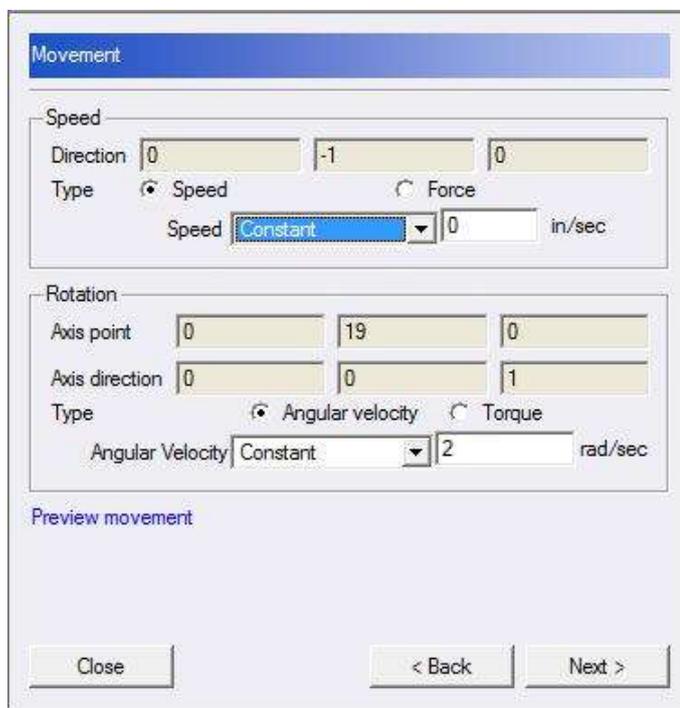
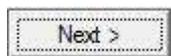


Рисунок 2.125 - Движение

## Задание параметров прижимного ролика.

В окне задание имени объекта, все остается без изменений. Нажмите



Открывается окно создания 2D геометрии. Выбираем строку [Edit 2D geometry](#), где в открывшемся окне (рисунок 2.126) . Ставим отметку напротив формата XYR, задаем параметры, указанные в таблице 2.4.1.

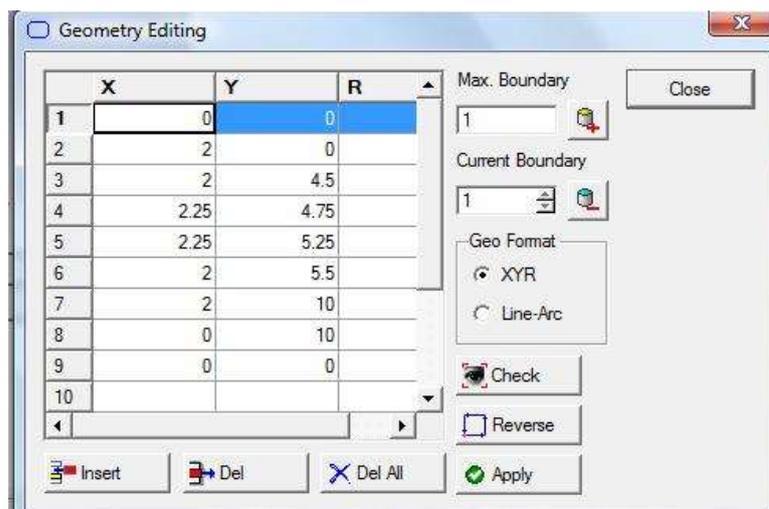


Рисунок 2.126 - Задание геометрических параметров прижимного ролика.

Таблица 2.1 - Параметры прижимного валка

X	Y	R
0	0	0
2	0	0
2	4.5	0
2.25	4.75	0.25
2.25	5.25	0.25
2	5.5	0
2	10	0
0	10	0
0	0	0

Создаем геометрию, нажав и . Вид геометрии (рисунок 2.127).

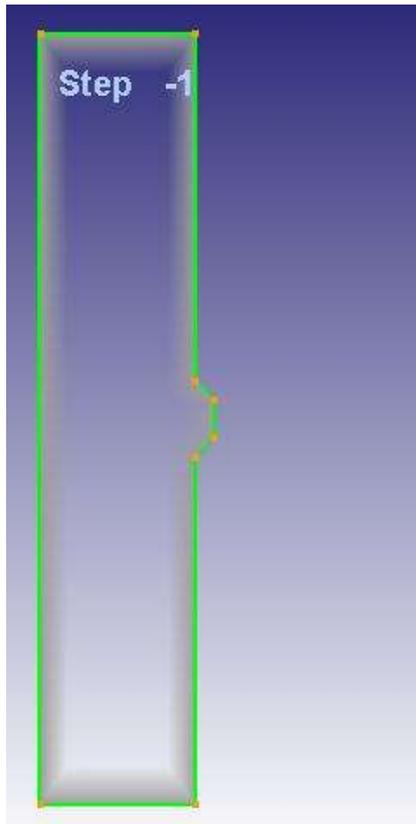
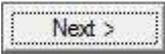


Рисунок 2.127 - 2D геометрия

Нажмите . Открывается окно создание 3D геометрии (рисунок 1.128).

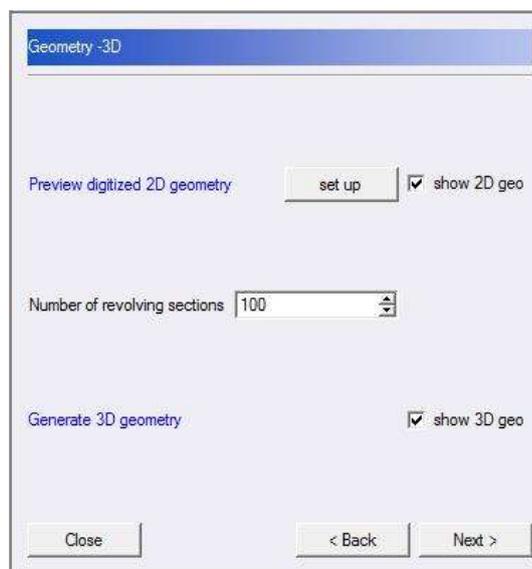


Рисунок 2.128 - Создание 3D геометрии

Нажмите  . Геометрия построена. Далее нажмите  .

Следующий шаг позиционирование прижимного ролика. Нажмите на строку  . Открылось окно  . В строке методы позиционирования выбираем  Interference . Объект позиционирования выбираем  . В строке Approach direction ставим отметку на оси Y . Далее нажмите  и  . Прижимной ролик занял нужную нам позицию (рисунок 2.129).

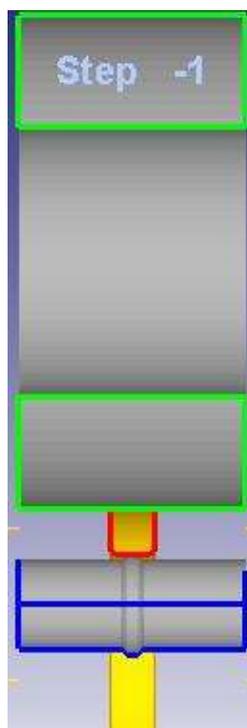


Рисунок 2.129 - Позиционирование прижимного ролика

Нажмите  .

Следующий шаг, задание движение. Появилось окно (рисунок 2.130) движение объекта. В строке Speed , ставим отметку напротив функции скорость со значение 0,05 in/sec . В строке Rotation , ставим отметку напротив функции Torque . Это значение неизменно и равно 0. После выставления необходимых значений, нажмите  .

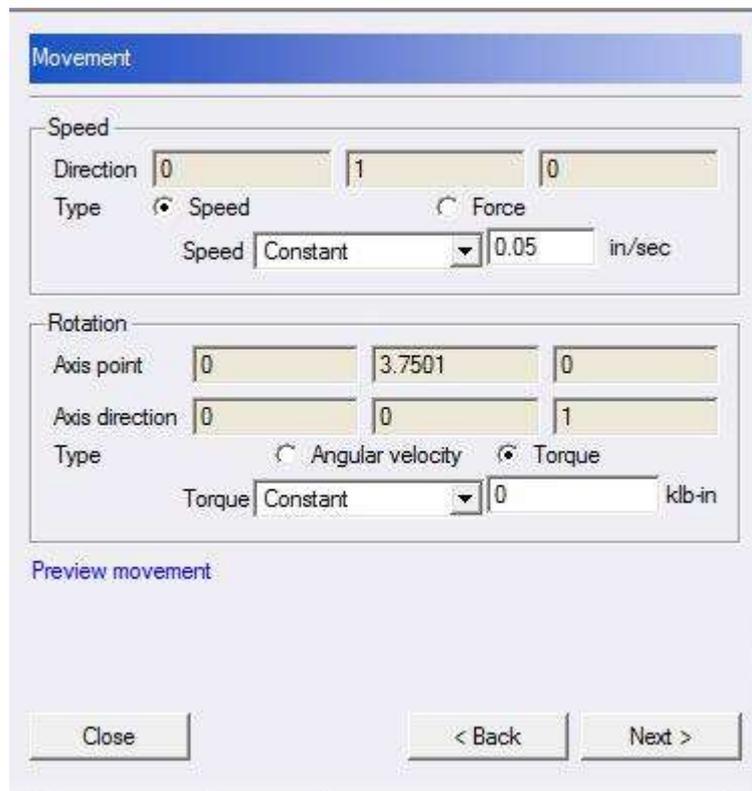


Рисунок 2.130 - Движение

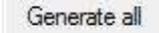
### Назначение связи между объектами

В окне **Contact**, выбираем строку [Generate inter object relations](#). Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений. Так как в этом расчете не будет приниматься во внимание никакой передачи температуры, единственное свойство, которое должно быть определено – трение.

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков. Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом (подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы, находящиеся на линии контакта не попадут в контакт, и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан в окне Экран, изображенном на рисунке 2.131 как цветные точки на верхней и нижней поверхностях заготовки.

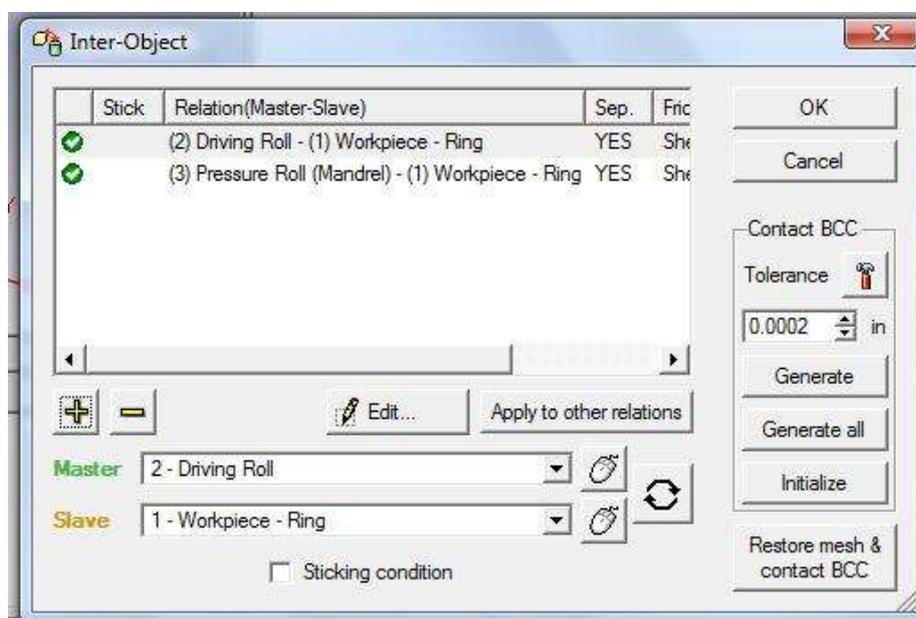
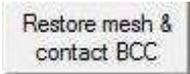
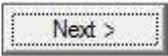


Рисунок 2.131 - Взаимодействие объектов

Замечание: если задано слишком большое значение точности при создании контакта и сетка заготовки разрушена, кнопка  может отменить создание контакта.

Когда контакт создан, нажмите на кнопку , закроется окно «взаимодействие объектов». Далее нажмите .

## Задание конечных параметров расчета

Открылось окно **Stopping controls**. В строке **Process Duration** устанавливаем значение 10 sec. Далее в строке **Primary die displacement** ставим отметку напротив **Pressure roll (mandrel)**. Остальные значения остаются без изменения. Нажмите **Next >**.

### Задание шагов процесса

Открылось окно **Step and remeshing controls**. В строке назначение количества шагов, устанавливаем значение 600. Сохранение шагов будет происходить через 5. Показано на рисунке 2.132.

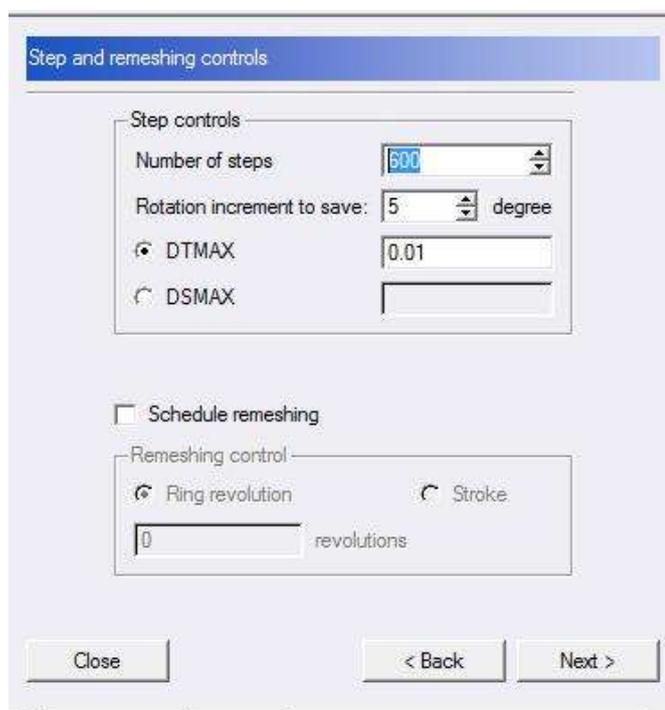
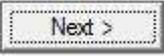


Рисунок 2.132 - Задание шагов

После задания необходимых параметров нажмите **Next >**.

### Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных нажав кнопку **Check data**, после проверки нажмите **Generate database**. При

появление сообщения `| Done Writing Database` , нажмите . Будет сохранена база данных, и можете закрыть модуль Ring rolling.

### Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой [Старт](#) или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
*****Message*****  
Simulation is completed and stopped at the user specified time step .
```

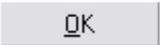
После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой [DEFORM-3D Post](#) в правом нижнем углу окна.

### Просмотр результатов.

Посмотрите поэтапно процесс осадки заготовки. Определите моменты перехода между стадиями раскатки.

Постройте индикаторную диаграмму процесса.

Нажмите кнопку  , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке 33. Выберите только верхний инструмент TopDie (приводной ролик).

По оси X (X – Axis) откладывается перемещение приводного ролика (Stroke), а по оси Y (Y – Axis) усилие (Y - Load), прикладываемое к приводному ролику и необходимое для деформации заготовки. Нажмите .

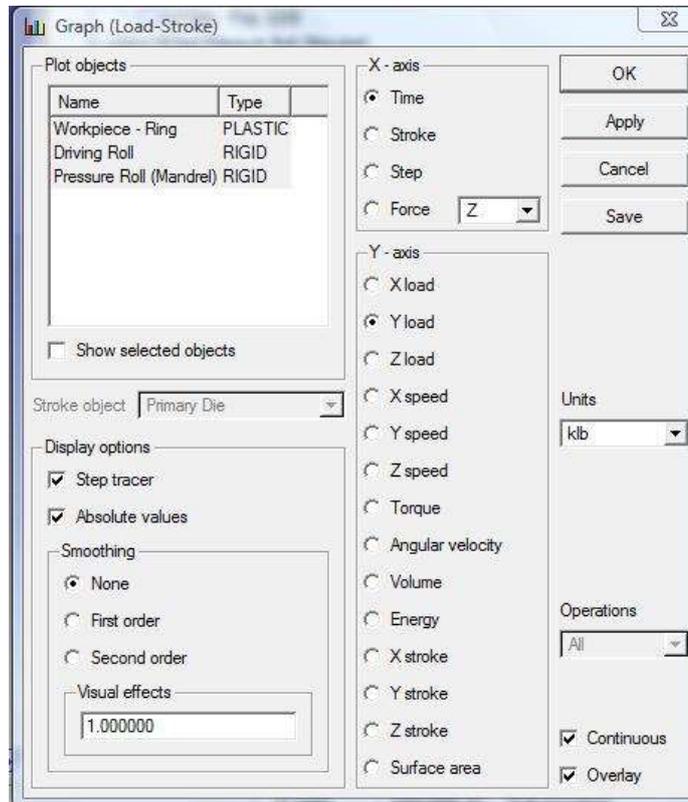


Рисунок 2.133 - Окно построения графиков «Graph(Load-Stroke)»

В основном окне появится индикаторная диаграмма, изображенная на рисунке 2.134.

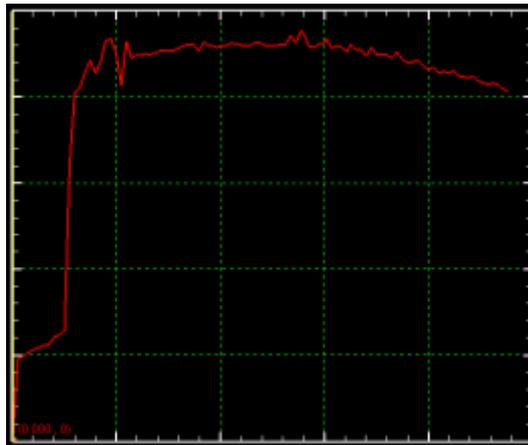


Рисунок 2.134 - Индикаторная диаграмма

Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого в дереве объектов наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide graph), таким же способом его можно

опять вывести на показ (show graph). Аналогичным образом можно скрывать другие объекты графики.

В постпроцессоре имеются средства, позволяющие пользователю наносить координатную сетку Flow Net (сетку течения), для лучшего понимания моделируемого процесса деформации объекта. Как уже говорилось ранее, сетка течения представляет собой рисунок, нанесённый на поперечное сечение объекта и подвергающийся деформации наряду с этим объектом. Искажение рисунка позволяет судить о деформации определённой области.

Щёлкните на иконку  для открытия окна FLOWNET. Мы хотим нанести рисунок на недеформированную заготовку и посмотреть, как исказится рисунок в ходе моделируемого процесса.

Выделите шаг -1 в списке шагов и нажмите кнопку  рядом с надписью Starting Step (начальный шаг). Выделите последний шаг в списке шагов и нажмите кнопку  рядом с надписью Ending Step (конечный шаг). Нажмите .

Выберите прямоугольный вид сетки (Rectangular grid) и нажмите . Установите количество ячеек в сетке (Number of Grids) 5 в направлении X и 8 в направлении Y. Нажмите  для просмотра исходной (недеформированной) сетки. Нажмите  и  для создания сетки течения.

Добавьте симметрию кнопкой . В появившемся окне, изображенном на рисунке 2.135, выберите вид отражения Point+Axis. Задайте вектор отражения с помощью мышки (нижняя иконка ) , щёлкнув сначала по нижней части оси симметрии, и затем по верхней.

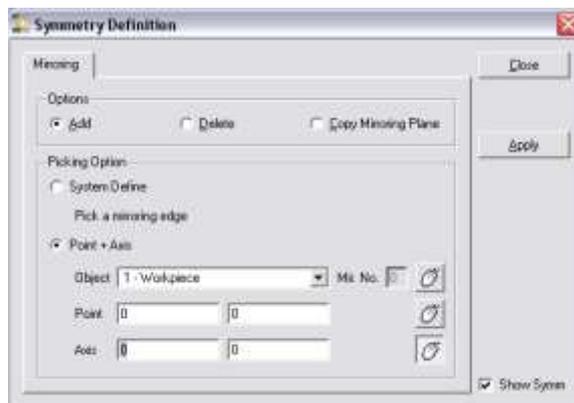


Рисунок 2.135 - Окно добавления симметрии

Нажмите **Apply** и **Close**.

Посмотрите поэтапно процесс деформации координатной сетки.

Чтобы увидеть, как происходит перемещение металла в слитке в период прессования, постройте векторную диаграмму скоростей течения. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и в разделе Скорости (Velocity) поставьте галочку напротив Основных скоростей (Total Vel). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив векторного отображения (Vector Plot). Нажмите **Apply** и **OK**. Теперь вы можете увидеть, как изменяется скорость движения отдельных областей заготовки за весь период прессования.

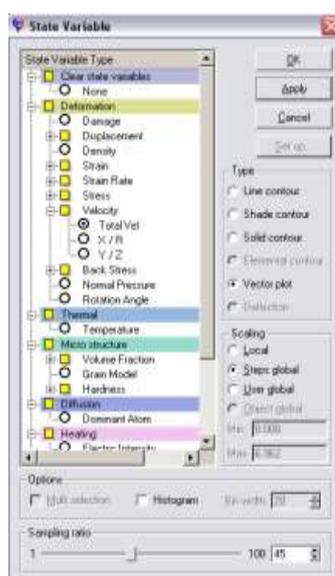
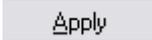
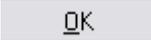


Рисунок 2.136 - Окно построения диаграмм

Для определения качественного изменения интенсивности деформации вы должны построить эпюры интенсивности деформации.

Откройте окно построения диаграмм, и в разделе Деформации (Strain) поставьте галочку напротив эффективных деформаций (Effective). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив линейного контура (Line contour). Нажмите  и . Посмотрите поэтапно, как накапливается деформация в заготовке.

Для определения количественного изменения интенсивности деформации в объёме слитка, выберем несколько точек в узлах сетки. Для качественной оценки достаточно 5и точек, как по вертикали, так и по горизонтали.

Нажмите кнопку Отслеживание Точек  (Point Tracking), и начинайте выбирать точки от центра к периферии заготовки, примерно в середине заготовки. Когда точки выбраны, нажмите  и затем  в окне Point Tracking.

Когда точки выбраны, вы можете построить графики интенсивности деформации в этих точках за время всего процесса раскатки. Для этого выберите Strain-Effective в списке диаграмм. Система автоматически построит графики для ваших точек.

По этим графикам можно судить о характере деформации на разных участках заготовки за всё время процесса раскатки.

Аналогично можно построить графики для точек расположенных на одной вертикали и диагонали.

Аналогично построению эпюр интенсивности деформаций, постройте эпюры для интенсивности напряжений (Strain – Effective).

### Содержание отчёта

1. Разновидности процесса раскатки.
2. Индикаторная диаграмма усилия в зависимости от способа раскатки.
3. Процесс деформации координатной сетки

4. Векторная диаграмма интенсивности деформации при раскатке.
5. Распределение интенсивностей напряжений.
6. Анализ графических результатов.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается процесс ковки кольца?
2. Для каких целей используют раскатку колец с опорными роликами?
3. Какие технологические параметры используются при раскатке на оправке?
4. Как определяется диаметр прошивного отверстия?
5. Каковы ограничения степени деформации при раскатке?
6. Какой закон трения используется в расчете процесса?
7. Как задать геометрию инструмента?
8. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?
9. Как расположить объекты по отношению друг к другу?
10. Как создать базу данных?

## 3 ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

### 3.1 Вытяжка осесимметричной детали

Цель работы: компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния в процессе глубокой вытяжки с прижимом осесимметричной детали из стали 08кп и привитие навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-2D.

#### Краткие теоретические сведения

Вытяжкой называют процесс формоизменения плоской заготовки в полую деталь в специальных штампах. С помощью вытяжки получают как осесимметричные детали, так и изделия коробчатой и других сложных несимметричных форм, к ним относятся:

- детали, имеющие форму вращения (осесимметричные): днища котлов и различных цилиндрических резервуаров, металлическая посуда, детали автомобильных фар и многие др.;
- детали коробчатой формы: топливные баки двигателей внутреннего сгорания, тара для продуктов и пр.;
- детали, имеющие одну ось симметрии или ассиметричные: автокузовные детали, крыша автомобиля, его двери, капот и пр [13].

Вытяжку осуществляют в штампах, рабочие органы которых: матрица 1 со скругленной рабочей кромкой радиусом  $r_M$ , пуансон 2 со скругленной рабочей кромкой радиусом  $r_{II}$  и, если это необходимо, прижимное кольцо 3 (рисунок 3.1).

Заготовку 4 укладывают на плоскость матрицы 1, пуансоном 2 надавливают на центральную часть заготовки и смещают её в отверстие матрицы. Центральная часть заготовки тянет за собой периферийную часть – фланец заготовки 5. Смещаемая в отверстие матрицы часть заготовки образует стенки вытягиваемой детали 6.

Между пуансоном и матрицей имеется кольцевой зазор  $Z$ , в который пуансон втягивает заготовку. При вытяжке внешняя сила  $P$ , передаваемая

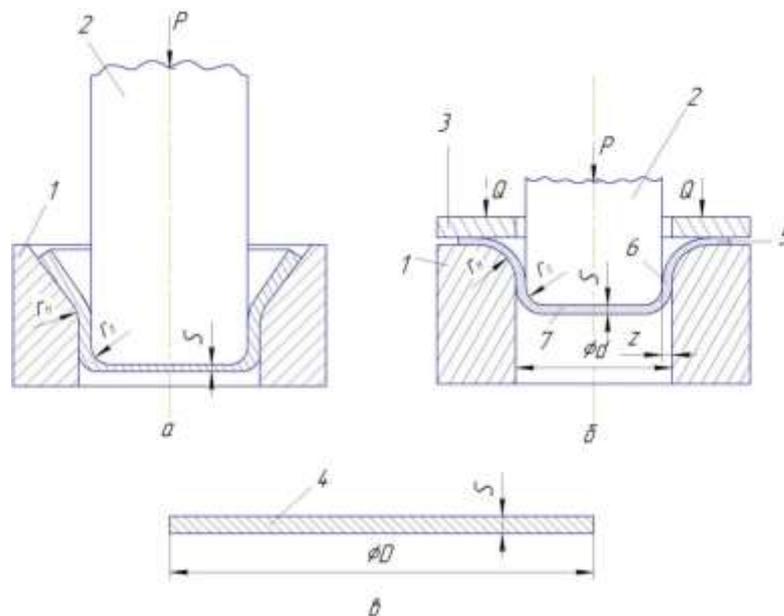
пуансоном, приложена к донной части вытягиваемой детали 7 [14].

Применяют два основных способа вытяжки:

- без уменьшения толщины стенки  $S$  (вытяжка);
- с уменьшением толщины стенки (вытяжка с утонением) [15].

Вытяжку без утонения осуществляют в штампе, у которого зазор между пуансоном и матрицей  $Z$  равен или несколько больше толщины заготовки  $Z \geq S$ , при вытяжке с утонением зазор  $Z \leq S$ .

В процессе вытяжки без утонения в краевой части заготовки (фланце) одновременно возникают растягивающие меридиональные  $\sigma_r$  и сжимающие окружные  $\sigma_\theta$  напряжения (рисунок 3.2) [16].



а – без прижимного кольца; б – с прижимным кольцом; в – заготовка

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – прижим; 4 – заготовка;

5 – фланец; 6, 7 – стенка и дно детали

Рисунок 3.1 - Схема штампа для вытяжки

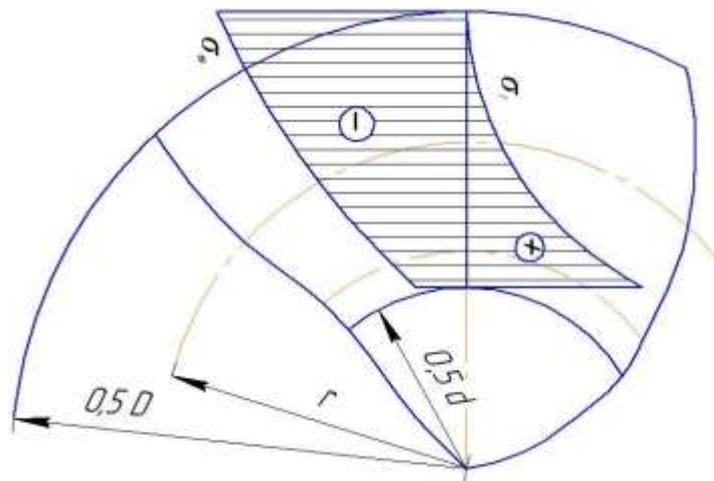


Рисунок 3.2 - Распределение напряжений по фланцу осесимметричной детали при вытяжке

Растягивающие меридиональные напряжения  $\sigma_r$ , равные на краю фланца нулю и максимальные на входной кромке матрицы (рисунок 3.2), повышаются с увеличением ширины фланца. Если значения максимальных растягивающих напряжений около пуансона превысят напряжения, вызывающие разрушение материала заготовки (т.е. его прочность), то заготовка у доньшка разрушится и вытяжка окажется невозможной. Из этого следует, что вытягивать можно заготовки с ограниченной шириной фланца.

При определенных условиях под действием максимальных сжимающих напряжений, действующих в окружном направлении у наружной кромки фланца, из-за потери устойчивости могут появиться складки (гофры). Для их устранения в штампах для вытяжки предусматривают прижимное кольцо, которое прижимает фланец к матрице. В связи с этим различают два способа вытяжки без утонения: с прижимом и без прижима заготовки (рисунок 3.1). Давление  $q$  создаваемое силой  $Q$ , должно быть достаточно для исключения складкообразования (гофр), но не должно тормозить заготовку на столько, чтобы начались разрывы заготовки в местах изгибов. Обычно  $q = 1-4$  МПа. Большой радиус закругления рабочей грани матрицы  $r_M = (5-14)S$  обеспечивает плавность превращения плоской заготовки в полуу деталь.

Вытяжку без прижима можно производить при малой ширине фланца

(малой разности между диаметром заготовки  $D$  и диаметром матрицы  $d$ ) и относительно большой исходной толщине заготовки.

Формоизменение при вытяжке количественно оценивают коэффициентом вытяжки:

$$K = D/d,$$

где  $D$  – диаметр заготовки в форме диска,  $d$  – диаметр отверстия матрицы (рисунок 3.1).

При фиксированном диаметре отверстия матрицы существует максимальный диаметр заготовки, из которой возможна вытяжка  $D_{max}$ . Соответственно отношение максимального диаметра заготовки к диаметру полости будет предельным, максимальным значением коэффициента вытяжки:

$$K_{max} = D_{max}/d$$

Величина  $K_{max}$  зависит от многих факторов: соотношения диаметра и толщины заготовки, механических свойств материала, радиуса скругления кромки матрицы и др.

Чем больше  $K_{max}$ , тем большей высоты оболочку можно получить за один переход вытяжки. Однако, за один проход можно получить деталь имеющую диаметр только в 1,8-2,0 раза меньше, чем диаметр исходной заготовки; при большей деформации усилие вытяжки возрастает настолько, что металл разрушается (открывается дно детали).

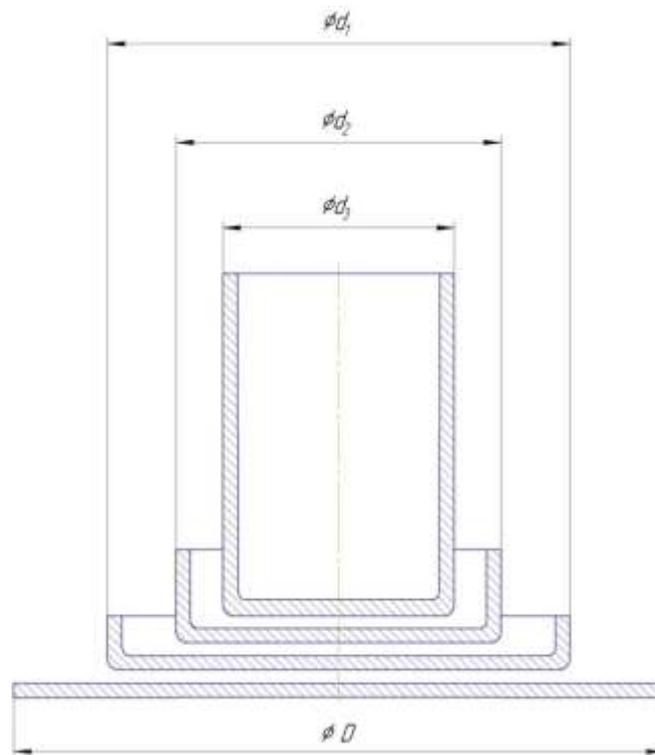


Рисунок 3.3 - Переходы вытяжки осесимметричной детали стаканчик

Если нужная высота изделия превышает максимальную, то за один переход вытянуть такое изделие нельзя; тогда применяют многопереходную вытяжку (рисунок 3). Заготовкой при многопереходной вытяжке служит стаканчик большего диаметра, полученный на предыдущем переходе. Для последующей вытяжки при уменьшении диаметра стакана от  $d_1$  до  $d_2$ :  $K_2 = d_1/d_2$ , тогда за  $n$  вытяжек:

$$K_{\Sigma} = \frac{D}{d_n} = \frac{D}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \dots \cdot \frac{d_{n-1}}{d_n} = K_1 K_2 \dots K_n = K_c^n,$$

где  $K_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент вытяжки при многопереходной вытяжке;  $K_c$  – средний коэффициент вытяжки за переход (в последующих переходах  $K \leq 1,2-1,4$ ).

Таким образом, необходимое число переходов для получения стакана диаметром  $d_n$  из заготовки диаметром  $D$ :

$$n = \frac{\lg K_{\Sigma}}{\lg K_c} = \frac{\lg D - \lg d_n}{\lg K_c}.$$

При вытяжке с утонением зазор меньше толщины заготовки. Коэффициент утонения подсчитывают как частное деления толщины заготовки

после вытяжки  $S_1$  на толщину заготовки  $S$ :

$$K_{yT} = \frac{S_1}{S}.$$

Размеры исходной заготовки-диска определяют из условия постоянства объема деформируемого металла для вытяжки с утонением и условия равенства площадей заготовки и полой детали при простой вытяжке.

На рисунке 3.4 показаны последовательные стадии вытяжки глубокого цилиндрического стакана с фланцем. Пластические области заготовки выделены сплошным чёрным цветом [17].

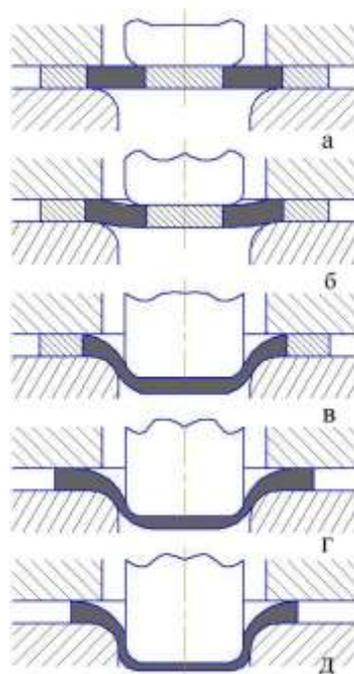


Рисунок 3.4 - Последовательность процесса глубокой вытяжки с прижимом заготовки

В начальной стадии (рисунок 3.4, а-в) пластически деформируется свободный кольцевой участок заготовки между пуансоном и зажатым фланцем. По мере углубления пуансона кольцевой участок растягивается и утоняется, особенно в месте изгиба у края плоского торца пуансона (рисунок 3.5). Металл пластической зоны упрочняется, усилие на пуансоне  $P$  возрастает, и течение распространяется под прижим и в доннюю часть заготовки.

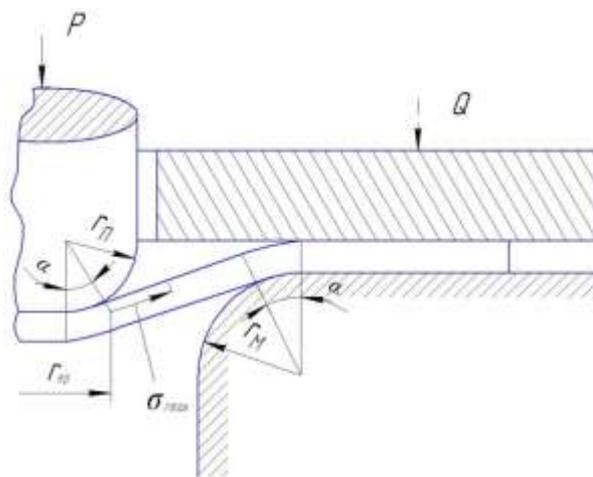


Рисунок 3.5 - Схема деформации заготовки в начальной стадии вытяжки

После достижения равновесия между тянущим усилием и сопротивлением деформации фланца наступает завершающая стадия вытяжки (рисунок 3.4, г-д). Элемент фланца растягивается в меридиональном, сжимается в окружном направлении и втягивается в матрицу. Условие пластичности деформирования фланца, определяющее момент его перехода в пластическое состояние, выражается уравнением:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = 1,15\sigma_T,$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки.

Ближе к каналу матрицы наибольшей становится меридиональная деформация удлинения. На закруглении заготовок у ребра матрицы появляется деформация изгиба. По опытным данным утонение заготовки в зазоре между матрицей и пуансоном продолжается до конца рабочего хода пресса. Прочность сечения стенки вблизи дна стакана (опасного сечения) определяет возможную степень деформации при вытяжке.

Таким образом, процесс глубокой вытяжки с прижимом состоит из двух технологически различных стадий: начальной и завершающей. При вытяжке без прижима с малой степенью деформации начальная стадия практически отсутствует. Пластическая деформация при вытяжке сосредоточена во фланце и на закруглении матрицы; в цилиндрической части и на дне оболочки деформация обычно только упругая.

На рисунке 3.6 приведены типовые графики изменения усилия по пути как при нормальном зазоре между пуансоном и матрицей ( $Z_{\text{норм}} \geq S\sqrt{K}$ ), так и при зазоре, меньшем нормального. В случае, когда  $Z < Z_{\text{норм}}$ , появляется второй максимум усилия, соответствующий протягиванию заготовки с принудительным утонением утолщённой краевой части заготовки. При полном охвате кромок пуансона и матрицы, т.е. при  $\alpha = \pi/2$  (рисунок 3.5), путь деформирования равен:  $h = r_{\text{п}} + r_{\text{м}} + S$ ,  $r_{\text{п}} = (3-9)S$ ,  $r_{\text{м}} = (5-14)S$ ; при дальнейшем ходе пресса, усилие падает из-за уменьшения диаметра фланца (рисунок 3.6).

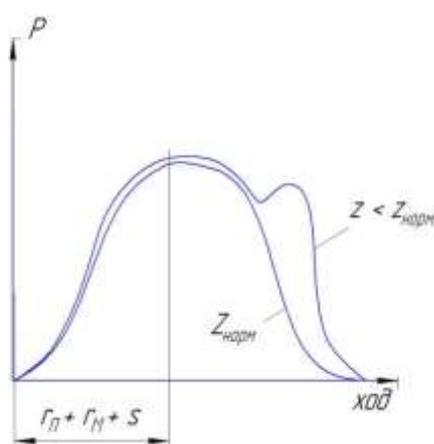


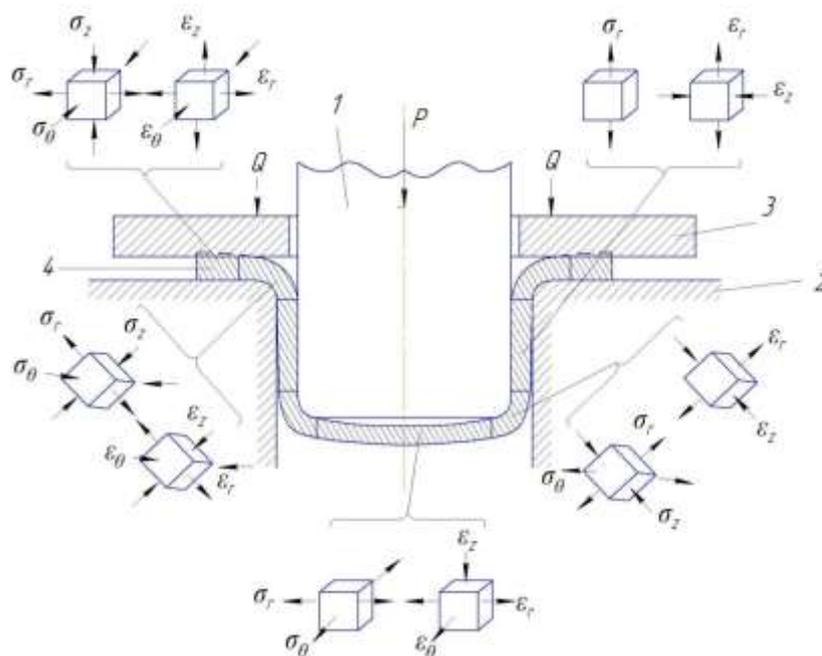
Рисунок 3.6 - График изменения усилия в процессе вытяжки

На рисунке 3.7 приведены схемы напряженно-деформированного состояния на разных участках детали при вытяжке с прижимом (индексы  $\theta$ ,  $r$  и  $z$  означают направления – окружное, меридиональное и по нормали к поверхности заготовки).

В зоне пластической деформации (во фланце и в закруглении на входе в матрицу) при вытяжке без прижима, напряжённое состояние плоское. По направлению радиусов действует меридиональное напряжение растяжения  $\sigma_r$ , создаваемое усилием пуансона; максимальное значение его равно удельному усилию и не должно превосходить сопротивление деформации во избежание обрыва дна. В окружном направлении в пластической зоне действуют напряжения сжатия  $\sigma_\theta$ . На участках фланца, где  $\sigma_\theta \gg \sigma_r$  произойдёт

утолщение, где  $\sigma_r \gg \sigma_\theta$  – утонение.

В цилиндрической части стаканчика наблюдается линейное напряжённое состояние; напряжение  $\sigma_r$  меньше  $\sigma_\theta$ . Если это условие не будет выполнено, то произойдёт локальное утонение стенки, завершающееся отрывом дна. Рассматриваемый участок деформируется упруго в отличие от фланца, который деформируется пластически, несмотря на то, что в нём  $\sigma_\rho < \sigma_T$ . В дне стаканчика наблюдается плоское напряжённое состояние в виде двухстороннего растяжения, так как напряжение  $\sigma_z$ , создаваемое торцом пуансона, незначительно и им можно пренебречь.



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – прижимное кольцо, 4 – фланец

Рисунок 3.7 - Схемы деформаций и напряжений при вытяжке с прижимом

Кольцевой фланец, вытягиваемой детали называют зоной пластической деформации, а цилиндрический и донный – зонами передачи усилия  $P$ . При вытяжке с прижимом на фланец, помимо напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ , действует нормальное напряжение  $\sigma_z$ , создаваемое прижимом; оно мало по сравнению с радиальным  $\sigma_r$  и окружным  $\sigma_\theta$  [18].

Общее усилие при вытяжке с прижимом составляют следующие усилия:

1) деформации фланца; 2) трения, создаваемого прижимом; 3) изгиба заготовки при входе в матрицу и выходе из неё; 4) трения на закруглении матрицы; 5) на цилиндрическую часть стаканчика. При вытяжке без прижима исключается усилие трения, создаваемое прижимом.

На рисунке 3.8 приведены кривые изменения логарифмических деформаций ( $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ ) в различных точках вытянутой цилиндрической детали  $A, B, C, D$ . Эти кривые показывают, что на участках донного закругления и несколько выше, где происходит утонение материала, деформации  $\varepsilon_r \gg \varepsilon_\theta$ . На участках, где происходит утолщение заготовки  $\varepsilon_\theta \gg \varepsilon_r$ . Деформация при вытяжке является объёмной.

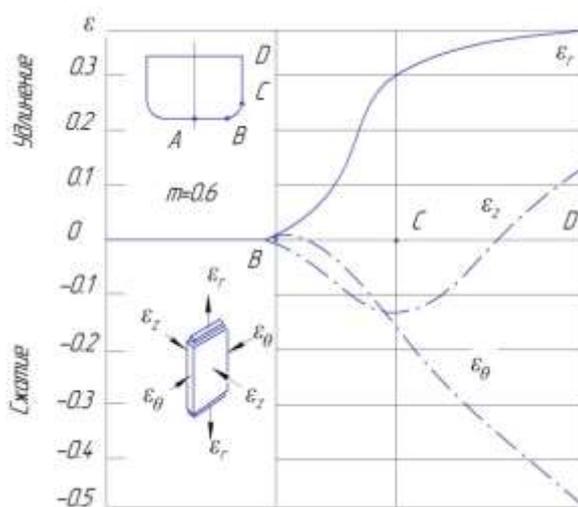


Рисунок 3.8 - Деформация при вытяжке цилиндрических деталей

При вытяжке происходит изменение толщины стенок деталей. В случае вытяжки цилиндрических деталей без фланца наибольшее утонение составляет 10-18%, а утолщение у края 20-30% от толщины материала. Толщина материала в месте перехода от дна к стенкам уменьшается с увеличением степени деформации, относительной толщины заготовки  $S/D$ , пластичности металла, количества операций вытяжки и с уменьшением радиусов закругления пуансона и матрицы.

Приблизительная толщина края определяется из следующих зависимостей:

– для деталей без фланца  $S' = S\sqrt{D/d}$ ;

– для деталей с фланцем  $S' = S\sqrt{D/D_\phi}$ ;

где  $S'$ ,  $S$  – толщина края детали и заготовки;  $D$ ,  $d$  – диаметр заготовки и детали;  $D_\phi$  – диаметр фланца.

На рисунке 3.9 показано распределение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  и относительной толщины  $S_i$ , равной отношению текущей толщины стенки детали к исходной толщине заготовки, вдоль образующей детали. Из рисунка 3.9 видно, что наибольшая толщина находится на кромке фланца, где напряжённое состояние близко к линейному ( $\sigma_r \cong 0, \sigma_z \cong 0$ ), а наименьшая толщина – на участке сопряжения с дном. Таким образом, толщина стенки вдоль образующей при вытяжке распределена неравномерно: у кромки фланца она больше толщины исходной заготовки, на участке сопряжения с дном – меньше толщины исходной заготовки, а толщина дна остаётся приблизительно равной толщине исходной заготовки.

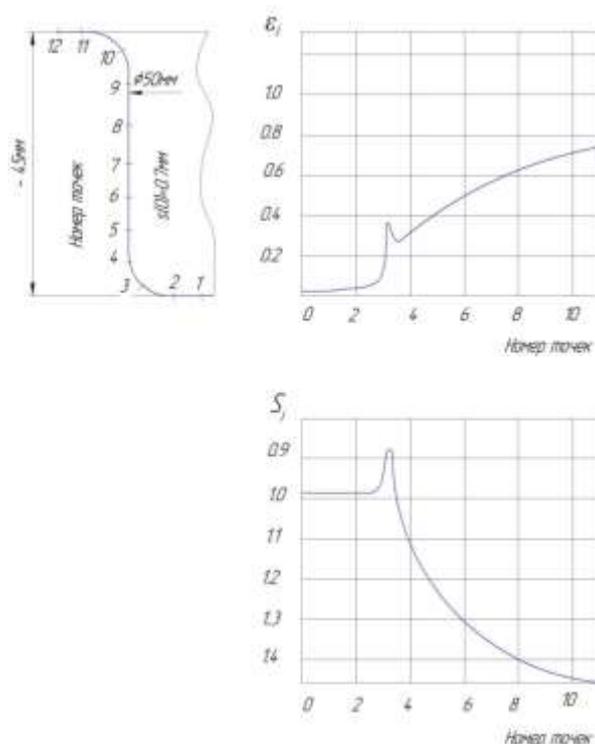


Рисунок 3.9 - Распределение интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  и относительной толщины  $S_i$  вдоль образующей детали

Поперечное сечение детали с наименьшей толщиной стенки называют опасным. Именно в нём деталь разрушается, происходит отрыв дна. Рассмотренное сечение опасно ещё и по той причине, что кольцевой слой металла в этом сечении менее упрочнён, чем слои металла, находящиеся в вышерасположенных поперечных сечениях.

Из графика распределения интенсивности деформации следует, что наибольшей деформации подвергается кольцевая часть, а наименьшей – донная часть.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

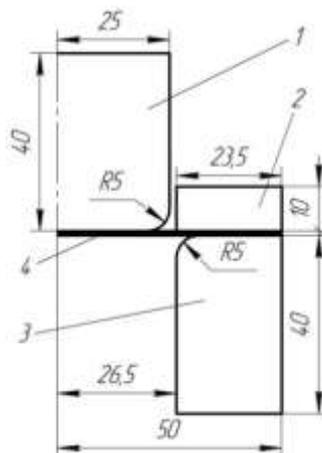
### Создание новой задачи

Запустите DEFORM-2D и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: DEEP\_DRAWING. Нажмите кнопку **Finish**.

После запуска препроцессора убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (вызовите окно **Simulation controls** нажатием на кнопку **Simulation controls** ).

Построение геометрии инструмента и заготовки

Определим напряжения, деформации, силу деформирования при вытяжке цилиндрического стаканчика с внутренним диаметром  $\varnothing 50$  мм из круглой заготовки толщиной 1 мм и диаметром  $\varnothing 100$  мм. Материал заготовки сталь 08кп, ближайший зарубежный аналог которой сталь марки AISI-1008 по стандарту США. В соответствии с технологическими рекомендациями радиус скругления матрицы и пуансона составляет 5-10 толщин материала, а зазор между матрицей и пуансоном 1,3-1,5 толщины. Усилие прижима – 5 кН. Схема операции со всеми характерными размерами приведена на рисунок 3.10.

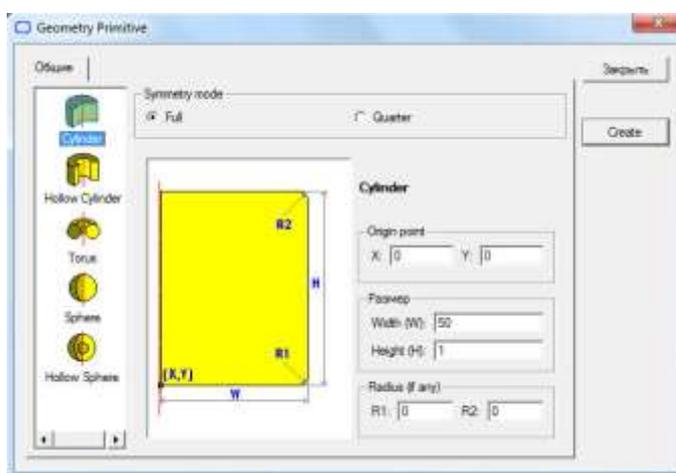


1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – матрица, 4 – заготовка

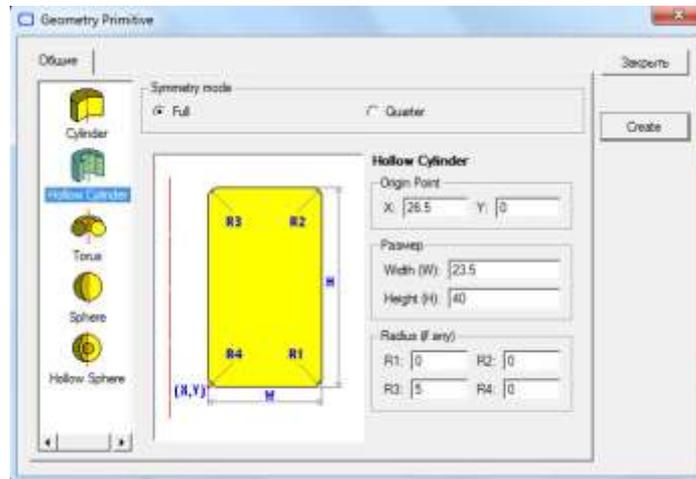
Рисунок 3.10 - Схема вытяжки цилиндрического стаканчика

Добавьте в Дерево объектов Top Die (пуансон), Bottom Die (матрица) и Object 4 (прижим), последовательно нажимая кнопку **Добавить объект** .

Сделайте активным Workpiece (укажите ЛКМ Workpiece в **Дереве объектов**). С помощью геометрических примитивов (пункт **Геометрия** , закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**) постройте заготовку с размерами по высоте 1 мм и радиусом 50 мм (рисунок 3.10). Для этого в окне **Geometry Primitive** (геометрические примитивы) необходимо выбрать тип объекта «Cylinder» и ввести при помощи клавиатуры в области **Размер** в строках **Width** (ширина) и **Height** (высота) значения, соответственно, 50 и 1 мм (рисунок 3.11, а). Нажать ЛКМ на кнопку **Create** (создать), а затем **Заккрыть**.



а



б

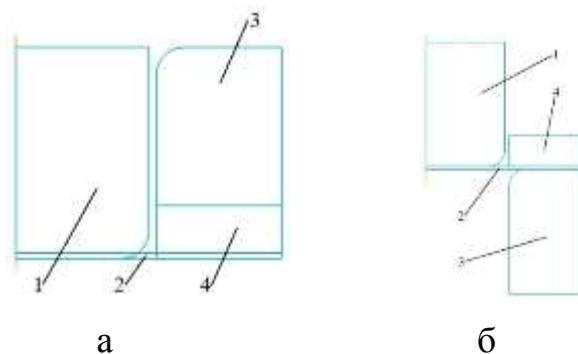
Рисунок 3.11 - Окно Geometry Primitive

Действуя аналогичным образом, постройте при помощи примитивов геометрию пуансона Top Die, матрицы Bottom Die и прижима Object 4 по значениям, представленным в таблице 3.1. При построении матрицы и прижима смените тип объекта на «Hollow Cylinder» (полый цилиндр) в окне Geometry Primitive (рисунок 3.11, б).

Таблица 3.1 - Параметры примитивов для построения инструмента и заготовки

Объект	Тип геометрии	Параметры геометрии							
		Origin Point		Размер, мм		Radius, мм			
		X	Y	Width	Height	R1	R2	R3	R4
Workpiece (заготовка)	Cylinder (цилиндр)	0	0	50	1	0	0	-	-
Top Die (пуансон)		0	0	25	40	5	0	-	-
Bottom Die (матрица)	Hollow Cylinder (полый цилиндр)	26,5	0	23,5	40	0	0	5	0
Object 4 (прижим)		26,5	0	23,5	10	0	0	0	0

Конечная геометрия заготовки, пуансона, матрицы и прижима, изображена на рисунке 3.12, а.



1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – прижим

Рисунок 3.12 - Изображение в окне Display после задания геометрии (а) и позиционирования (б)

### Позиционирование объектов

Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 3.13), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения объектов относительно друг друга (рисунок 3.12, б) воспользуйтесь методом **Интерференция**.

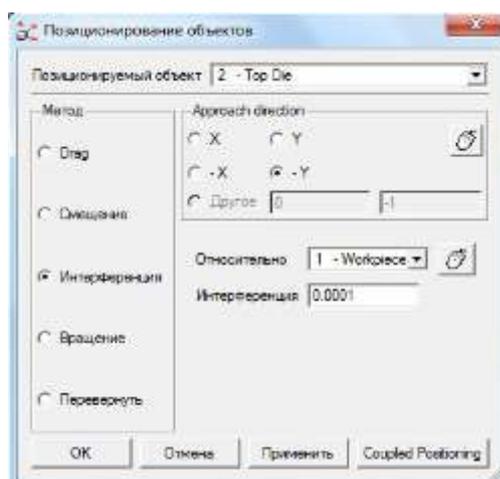


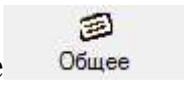
Рисунок 3.13 - Окно Позиционирование объектов

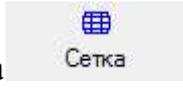
Сначала расположим пуансон и заготовку по отношению друг к другу. В

строке **Позиционируемый объект** выберите Top Die, а в строке **Относительно** – **Workpiece** (рисунок 3.13). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «-Y». Для позиционирования нажмите кнопку **Применить**.

По аналогии осуществите позиционирование матрицы Bottom Die (за направление сближения выберите «Y») и прижима Object 4 («-Y») относительно заготовки Workpiece. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунок 3.12, б.

### Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку Workpiece и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** , задайте количество конечных элементов 900 (4 элемента по толщине) и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. Появится окно **Material Library**, в котором выберите группу материалов «Steel» (стали) и марку «AISI-1008, COLD[70F(20C)]» (сталь 08кп), после этого нажмите ЛКМ на кнопку **Загрузить** (рисунок 3.14).

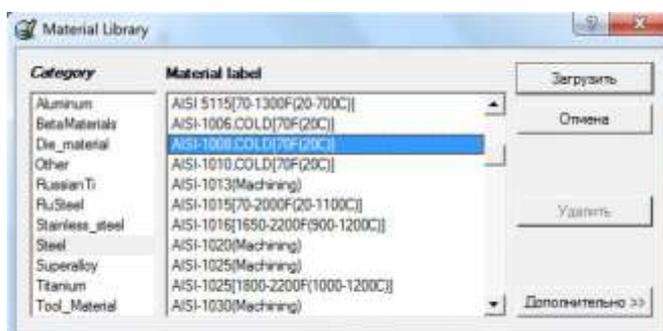


Рисунок 14. Окно Material Library

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными четырьмя контактными парами (рисунок 3.15).

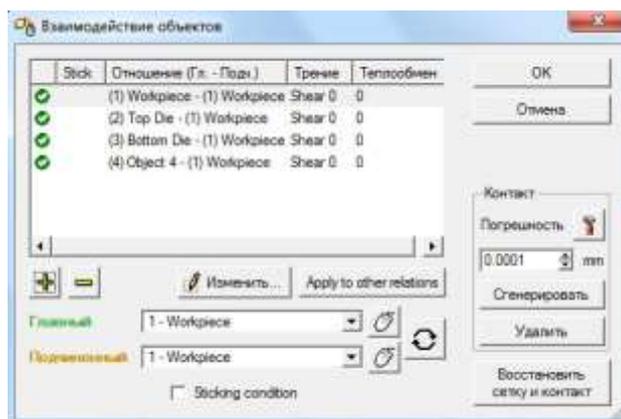


Рисунок 3.15 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить**  **Изменить...**, в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «Coulomb» (трение по закону Кулона), укажите коэффициент трения равный 0,12 и нажмите кнопку **Закреть** (рисунок 3.16).

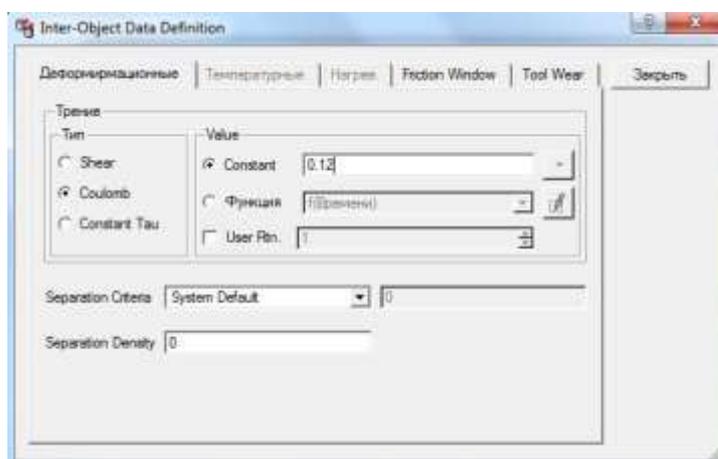


Рисунок 3.16 - Окно **Inter-Object Data Definition**

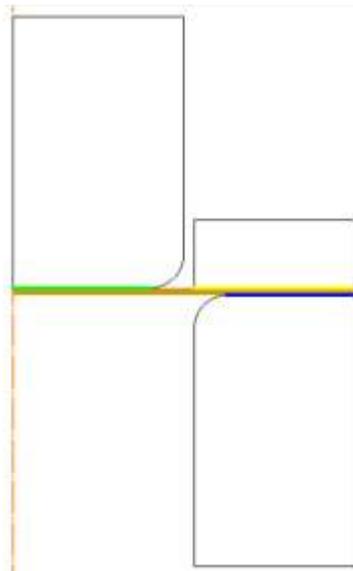
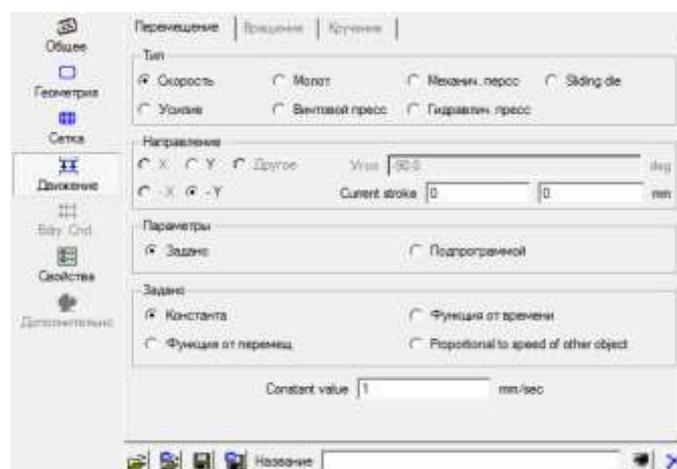


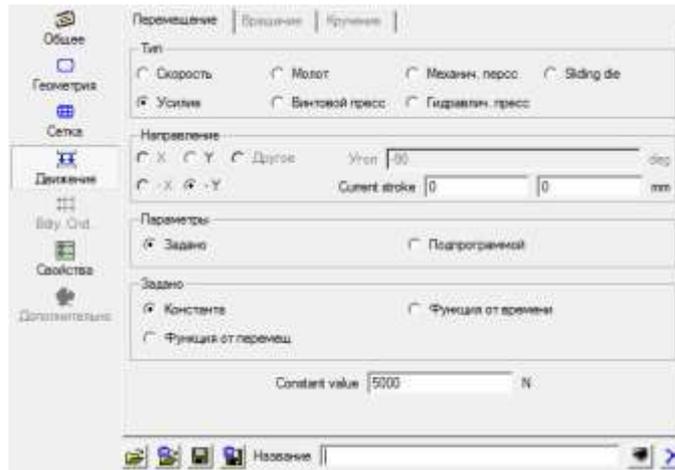
Рисунок 3.17 - Контактные поверхности между заготовкой, пуансоном, матрицей и прижимом

Т.к. коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие** объектов примените параметры первого контакта к остальным.

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта (рисунок 3.17). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

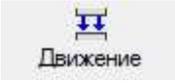


а



б

Рисунок 3.18 - Пункт Движение из Панели инструментов  
Задание движения и нагрузок на инструменте

Укажите ЛКМ Top Die (пуансон) в Дереве объектов для приложения движения. Затем нажмите кнопку **Движение**  и, убедившись, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в строку **Constant value**, расположенную в самом низу, значение 1 мм/с (рисунок 3.18, а).

Действуя аналогично, зададим усилие прижима. Для этого укажите ЛКМ Object 4 (прижим) в Дереве объектов. Затем нажмите кнопку **Движение** и в блоке **Тип** установите флажок напротив надписи **Усилие**. Введите в строку **Constant value** значение 5000 Н (рисунок 3.18, б).

В соответствии с заданными условиями нагружения пуансон будет перемещаться вниз (-Y) с постоянной скоростью 1 мм/с, а к прижиму будет приложено усилие 5 кН в том же направлении.

### Задание числа шагов расчета

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем введите величину шага 0,15 мм в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 3.19).

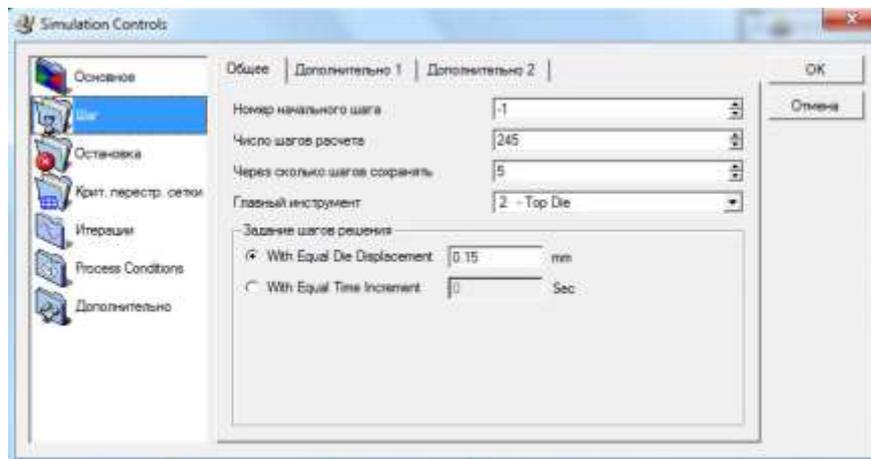


Рисунок 3.19 - Окно Simulation controls на закладке Шаг

Для того, что бы задать количество шагов необходимо перемещение главного инструмента (пуансона) разделить на размер шага и полученное значение, округленное до целого в большую сторону, внести в ячейку в строке Число шагов расчета (рисунок 3.19). Примем число шагов расчета равным 245, что соответствует перемещению пуансона на 35 мм при величине шага 0,15 мм.

В строку **Через** сколько шагов сохранять введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите Top Die. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 3.20). Для закрытия окна нажмите кнопку **Закрыть**.

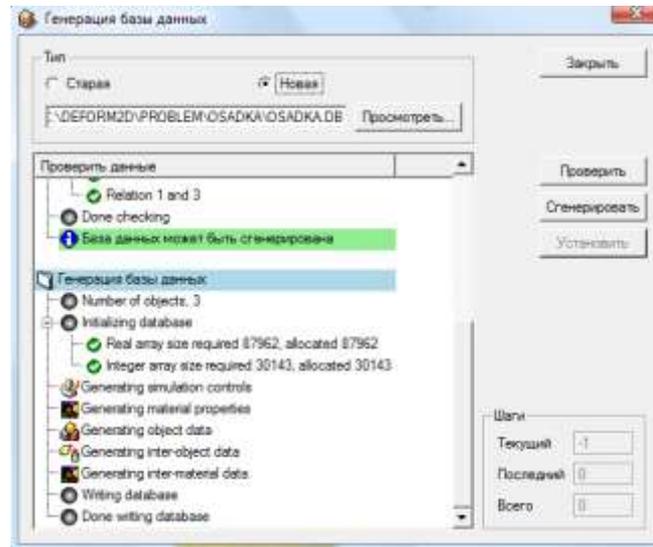


Рисунок 3.20 - Окно Генерация базы данных

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку . Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается.

### Анализ результатов моделирования

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **PostProcessor** на надпись «DEFORM-2D Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **Onestepback**  и **Onestepforward** .

Опишите характер изменения усилия прессования по стадиям процесса (рисунок 3.22). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 3.21) в разделе **Plotobjects** выберите пуансон TopDie и прижим Object 4. По оси абсцисс отложим перемещение пуансона, поэтому в разделе **X-axis** установите

«Перемещ». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «First order». Нажмите **ОК**.

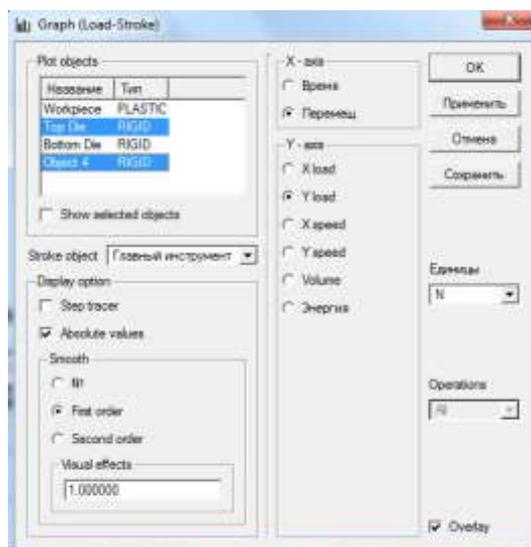
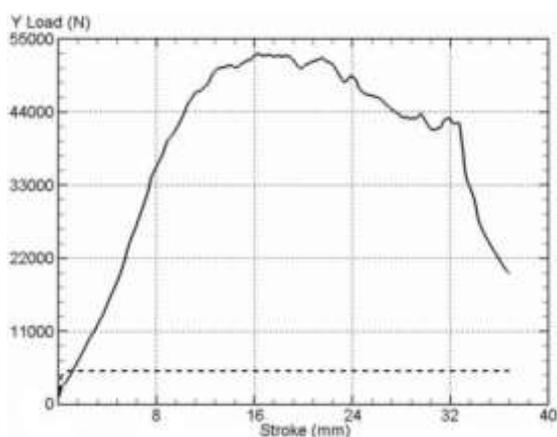


Рисунок 3.21 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от стадии вытяжки (рисунки 3.24-3.25). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «Stress» («Strain\_Total») и подтип «Effective» («vonMises») (рисунок 3.23). В разделе **Экран** установите «Solid», а в **Scaling** – «Local». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.



----- — усилие вытяжки; - - - — усилие прижима

Рисунок 3.22 - Изменение усилия в зависимости от перемещения пуансона

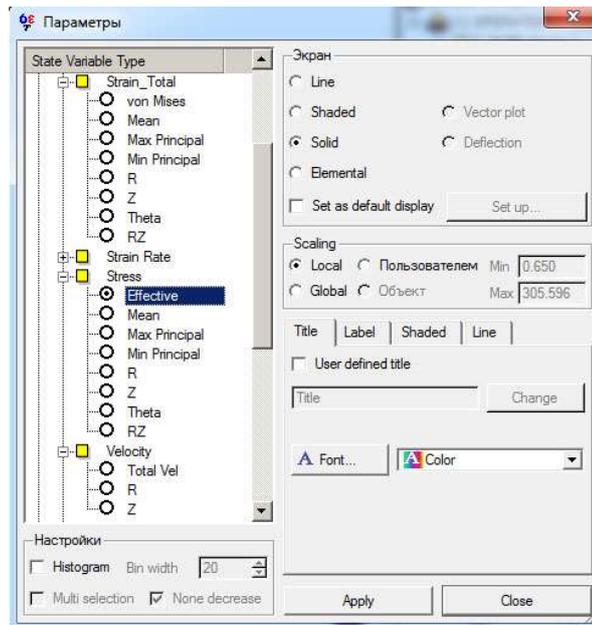


Рисунок 3.23 - Окно Параметры

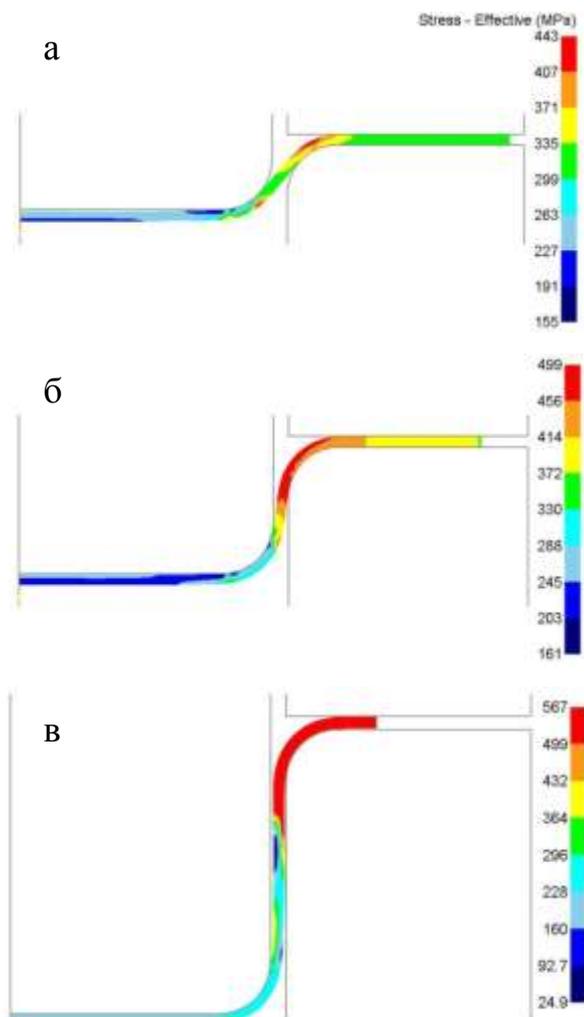


Рисунок 3.24 - Распределение интенсивности напряжений по стадиям вытяжки

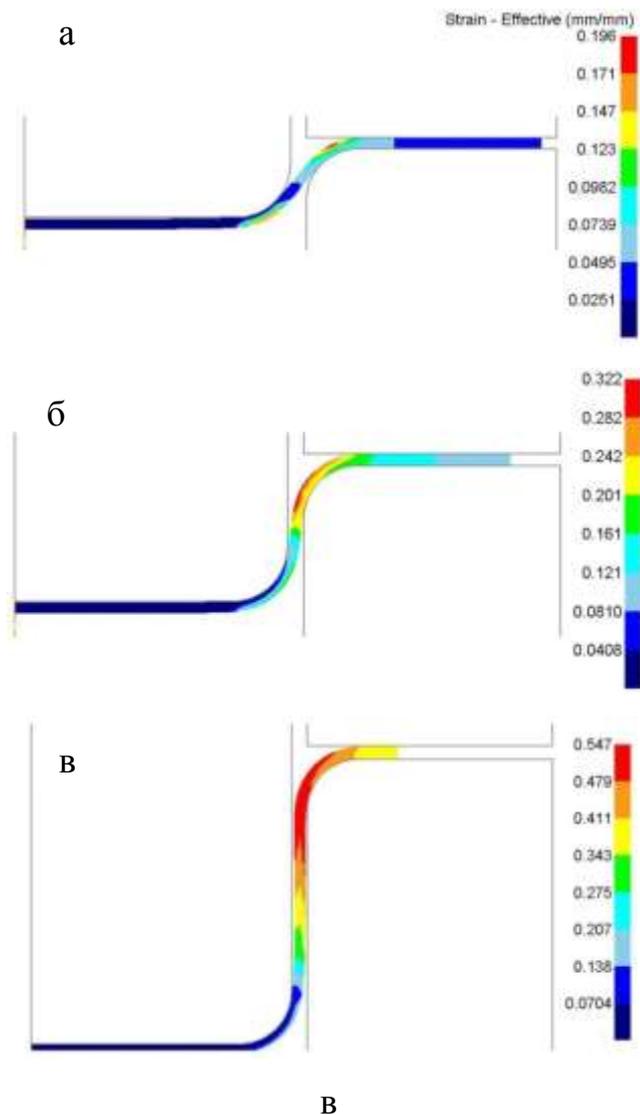
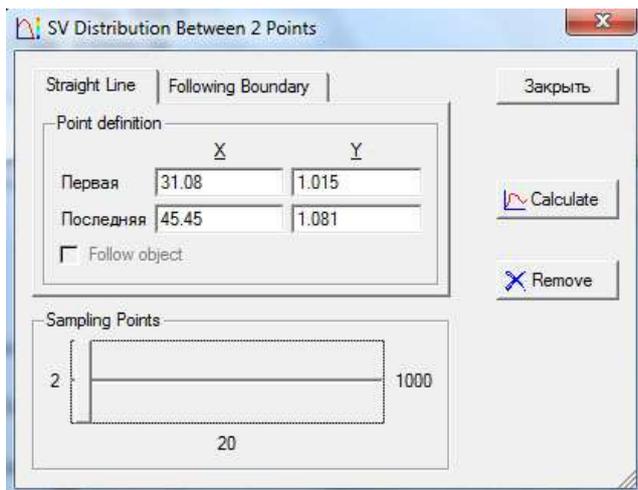


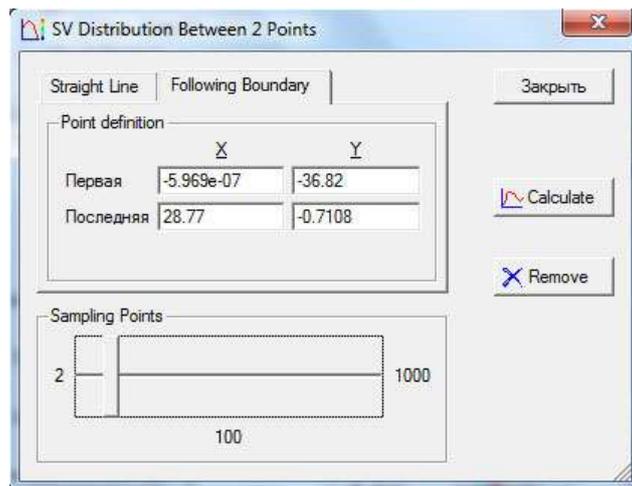
Рисунок 3.25 - Распределение интенсивности деформаций по стадиям вытяжки

Перед построением эпюры изменения меридиональных напряжений по фланцу в процессе вытяжки (рисунок 3.28) необходимо отобразить распределение этих напряжений в деформируемой заготовке. Для этого нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «Stress» и подтип «R». Нажмите **Apply**, а затем **Close** (рисунок 3.23).

Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку Straight Line (прямая линия) и в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 20 (рисунок 3.26, а).

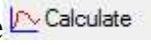


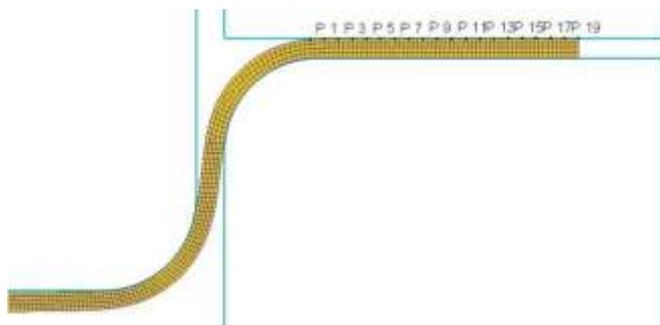
а



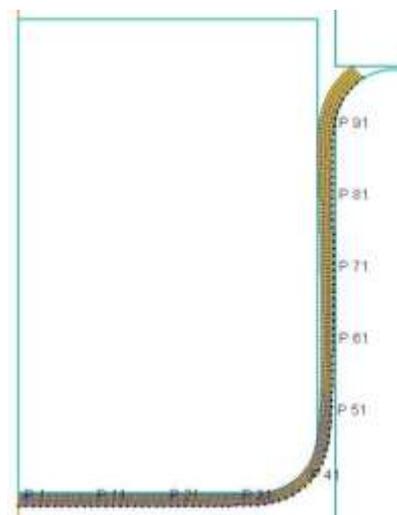
б

Рисунок 3.26 - Окно SV Distribution Between 2 Points

В окне **Display**, предварительно увеличив фланец кнопкой **Увеличить** , щелчком ЛКМ укажите точку начала радиусного перехода P1 и крайнюю точку P20 (рисунок 3.27, а). Нажмите на кнопку **Calculate** , при этом в графическом окне произойдет построение графика. Щелкните кнопку **Закреть**.



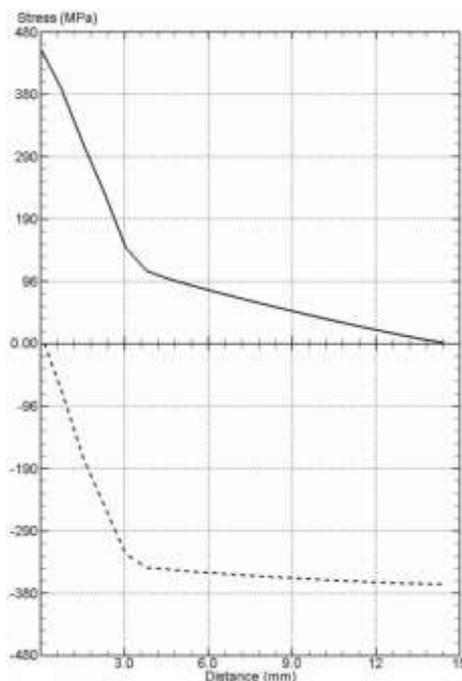
а



б

Рисунок 3.27 - Построение графика по точкам

Действуя аналогичным образом, постройте график изменения окружных напряжений по фланцу (рисунок 3.28). Для этого достаточно отобразить распределение этих напряжений и программа автоматически пересчитает ранее построенный график. Вызовите окно **Параметры** (рисунок 3.23), а затем выберите тип переменной «Stress» и подтип «Theta».

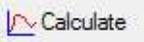


----- — меридиональные; - - - — окружные напряжения

Рисунок 3.28 - Эпюры распределения напряжений по фланцу заготовки при  
ВЫТЯЖКЕ

Постройте графики изменения деформационных характеристик по образующей изделия (рисунки 3.29-3.30). Начнем с отображения распределение интенсивности деформаций: нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип «Strain\_Total» и подтип «von Mises». Нажмите **Apply**, а затем **Close** (рисунок 3.23).

Нажмите кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Following Boundary** (по границе) и в разделе **Sampling Points** передвиньте ползунок на значение 100 (рисунок 3.26, б). В окне **Display** щелчком ЛКМ укажите точку P1, лежащую на оси изделия, и

крайнюю точку P100 (рисунок 3.27, б). Нажмите на кнопку **Calculate** , при этом произойдет построение графика (рисунок 3.29). Щелкните кнопку **Заккрыть**.

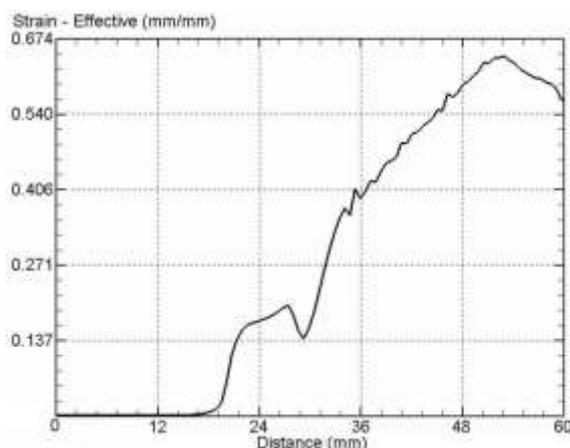
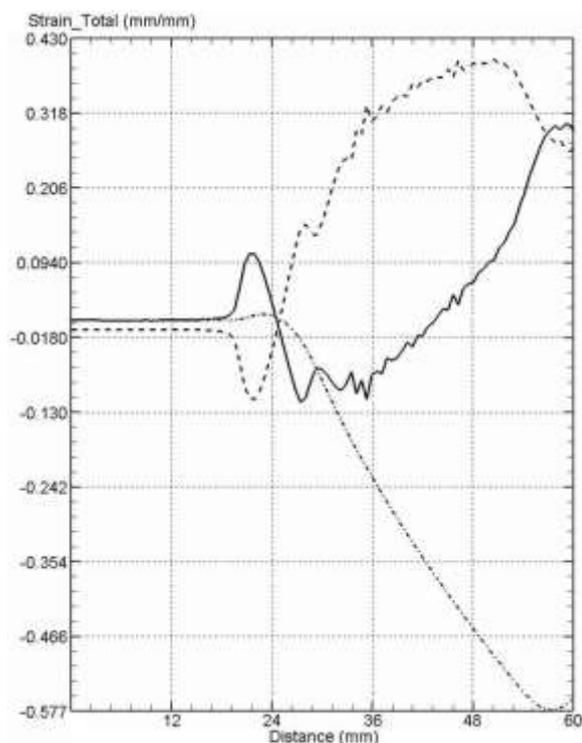


Рисунок 3.29 - График изменения интенсивности деформаций по образующей изделия



----- — меридиональные; - - - - осевые; - · - · - · — окружные деформации  
Рисунок 3.30 - Эпюры распределения деформаций по образующей изделия

Последовательно изменяя отображение деформаций в изделии, постройте эпюры распределения остальных характеристик: меридиональных (R), осевых

(Z) и окружных (Theta) деформаций (рисунок 3.30) [19].

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MS Word и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса вытяжки;
  - схема вытяжки без утонения с прижимом;
  - схемы напряжений и деформаций при вытяжке с прижимом.
4. Результаты моделирования вытяжки с прижимом:
  - компьютерная модель вытяжки;
  - график усилия вытяжки в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций по стадиям вытяжки;
    - графики изменения интенсивности, меридиональных, окружных и осевых деформаций по образующей заготовки;
    - эпюры распределения меридиональных и окружных напряжений на фланце заготовки при вытяжке.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите схему распределения меридиональных и окружных напряжений во фланце при вытяжке из плоской заготовки.
2. Приведите факторы, влияющие на предельный коэффициент вытяжки.
3. Дайте определение процесса вытяжки.
4. Перечислите детали, полученные из листа, с помощью вытяжки.

5. С какой целью применяют прижим при вытяжке?
6. Как вычислить коэффициент вытяжки за переход?
7. В чём особенность вытяжки с широким фланцем?
8. Каким условиям должно удовлетворять усилие прижима?
9. Как определить число переходов при вытяжке?
10. Какие существуют способы вытяжки?
11. В каких случаях вытяжка идёт с прижимом и без прижима?
12. Где находятся опасные сечения детали, получаемые вытяжкой?
13. За счёт чего можно уменьшить меридиональные растягивающие напряжения при вытяжке?
14. Как определить диаметр заготовки для осесимметричной детали, получаемой вытяжкой?
15. Как изменяется толщина стенки вдоль образующей при вытяжке с прижимом?
16. В каких случаях используют вытяжку без прижима?
17. На каких участках заготовки при вытяжке имеет место плоско-напряжённое состояние?
18. Какую роль играют закругления кромок матрицы и пуансона?
19. Из каких составляющих складывается усилие при вытяжке?
20. Почему усилие при вытяжке имеет экстремум?
21. Опишите схемы главных деформаций на различных участках заготовки при вытяжке?
22. На каком участке окружные и меридиональные напряжения растягивающие?
23. Как построить объект с помощью геометрических примитивов?
24. Как сохранить построенную геометрию объектов?
25. Как определить наиболее опасные участки на заготовке?
26. Как задать нагрузки на инструмент (прижим)?

## 3.2 Гибка полосы П-образной формы

**Цель работы:** Определение технологических параметров при гибке полосы П-образной формы путем моделирования процесса в программе DEFORM-2D

### Краткие теоретические сведения

Гибка листового материала — технологическая операция листовой штамповки, в результате которой из полоской или изогнутой заготовки при помощи штампов получается изогнутая пространственная деталь (рисунок 3.31).

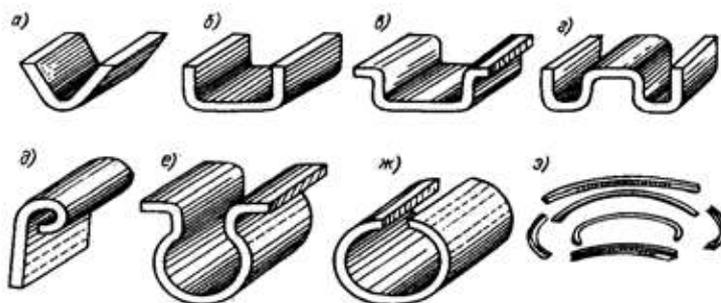


Рисунок 3.31 - Детали получаемые при гибке

Гибка может быть одноугловая, двухугловая, четырехугловая и многоугловая (рисунок 3.31, а—г). К гибке также относятся операции по закатке — завивке края на плоской заготовке, например при изготовлении разных оконных и дверных петель, хомутиков, незамкнутых трубочек и т.д. (рисунок 3.31, д - ж).

Гибка заготовки осуществляется одновременным действием внешних изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

Рассмотрим чистый изгиб заготовки в виде широкой полосы.

Под действием изгибающих моментов, приложенных к противоположным краям заготовки, радиус срединной поверхности уменьшается. Начиная с определенного радиуса кривизны в поверхностных

слоях заготовки появляются пластические деформации, причем по мере дальнейшего деформирования толщина зон пластических деформаций увеличивается. Пластическая деформация распространяется вглубь от поверхностей заготовки, а толщина упруго деформированного слоя уменьшается по мере увеличения кривизны срединной поверхности.

При изгибе моментом  $M$  часть слоев заготовки (в очаге пластической деформации) получает удлинение в тангенциальном направлении, а другая часть сжатия (зона растягивания и зона сжатия) (рисунок 3.32).

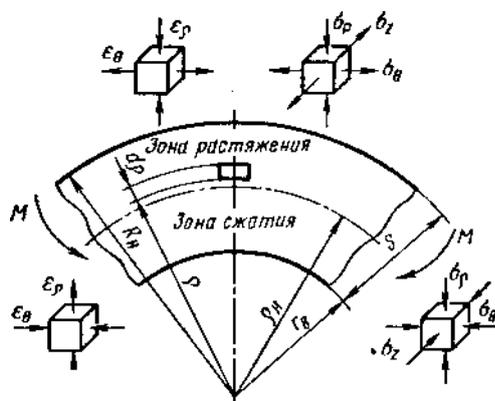


Рисунок 3.32 - Напряженно-деформированное состояние при гибке моментом широкой полосы

Поверхность, разделяющую зоны растяжения и сжатия, называют нейтральной поверхностью напряжения. Вблизи этой поверхности происходит смена знаков тангенциальных напряжений и деформаций. Значение радиуса нейтральной поверхности находится по формуле:

$$\rho = \sqrt{Rr}.$$

Из формулы видно, что нейтральная поверхность напряжений при уменьшении внутреннего радиуса  $r$  смещается от срединной поверхности к внутренней и при  $r \rightarrow 0$  выходит на внутреннюю поверхность.

Напряжение  $\sigma_\rho$ , вызванное надавливанием волокон друг на друга, является сжимающим, в то время как напряжение  $\sigma_\theta$  положительно в зоне тангенциального удлинения и отрицательно в зоне тангенциального сжатия. Радиальное напряжение  $\sigma_\rho$  достигает по абсолютному значению максимальной

величины на нейтральной поверхности напряжений. При  $r > 5s$  абсолютное значение  $\sigma_{pmax}$  мало и влиянием  $\sigma_p$  можно пренебречь. В этом случае можно считать, что при гибке справедлива схема линейного напряженного состояния, а при  $r < 5s$  — схема плоской деформации эпюры распределения напряжений по толщине заготовки приведены на рисунке 3.33.

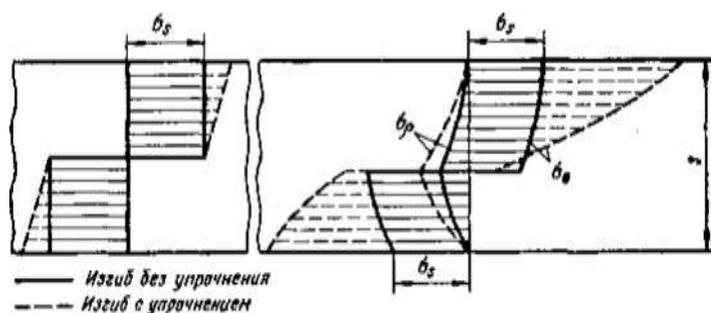


Рисунок 3.33 - Эпюры напряжений при изгибе для  $r=S$

При проведении гибки необходимо всегда учитывать наличие и упругих деформаций материала, вследствие которых форма изделия после гибки отличается от формы штампа. Поэтому при проектировании и изготовлении штампов для гибки следует учитывать величину пружинения материала. Для получения заданного угла и радиуса после гибки необходимо угол и радиус на штампе (на пуансоне) уменьшать на величину пружинения. Опыты показали, что величина пружинения зависит от рода и толщины материала, формы детали, относительного радиуса гибки, угла гибки, а также от силы удара. Чем выше предел текучести изгибаемого материала, чем больше относительный радиус  $r/s$  и меньше толщина материала  $s$  и чем больше угол гибки  $\alpha$ , тем больше пружинение при прочих равных условиях. При одноугловой гибке пружинение будет больше, чем при двухугловой. В случае двухугловой гибки на величину пружинения влияет также зазор между матрицей и пуансоном; при отрицательном зазоре (когда зазор меньше толщины материала) пружинение сводится к минимуму.

Пружинение возникает между прямолинейными участками заготовки (рисунок 3.34). Это объясняется тем, что при разгрузке сил заготовки,

находящаяся в зоне растяжения в следствии упругой деформации укорачиваются, а слои, находящиеся в зоне сжатия, удлиняются. Разноименные упругие деформации в зонах растяжения и сжатия вызывают поворот поперечных сечений заготовки на угол пружинения  $\Delta\alpha$ , в результате чего происходит изменение радиуса её кривизны и, следовательно, угла изгиба.

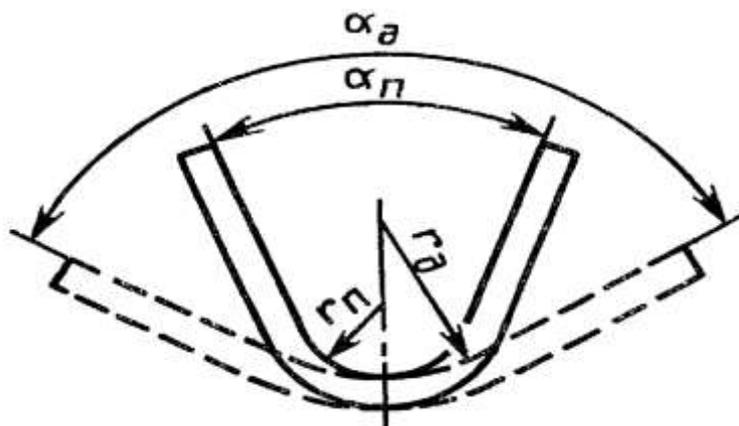


Рисунок 3.34 - Схема упругой деформации при гибке

Внеконтактные участки изгиба оказывают влияние на величину угла пружинения и при гибке П-образных деталей. В этом случае на величину угла пружинения влияет зазор между пуансоном и матрицей и подчеканка средней части заготовки.

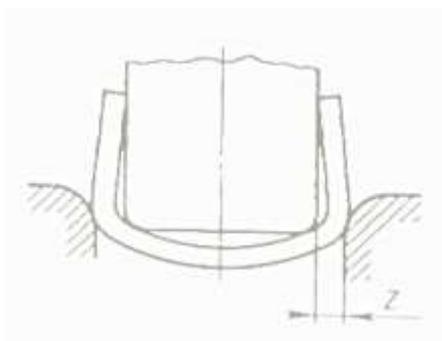
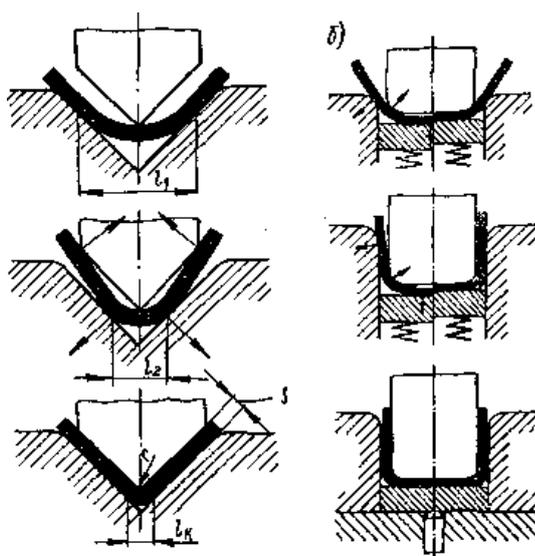


Рисунок 3.35 - Схема гибки П-образных деталей

На рисунке 3.35 схематично показана форма заготовки в промежуточной фазе деформирования. Из схемы видно, что уменьшение зазора  $z$  приводит к спрямлению полок при протягивании их через матрицу. Таким образом,

внеконтактные участки изгиба полок получают деформацию с увеличением радиуса кривизны, что обуславливает возникновение  $\Delta\alpha_{\text{поллок}}$  обратного знака. Значит, с уменьшением зазора (соответственно при более полном спрямлении полки) общий угол пружинения уменьшается.

Последовательность процесса угловой гибки приведена на рисунке 3.36. На всем протяжении процесса гибки заготовка имеет внутреннее закругление которое больше радиуса кривизны пуансона, причем при гибке происходит постепенное уменьшение радиуса кривизны и плеча изгиба ( $l_1, l_2, l_k$ ). Заготовка постепенно уменьшающимся закруглением прилегает в двух точках к стенкам матрицы и с некоторого момента оказывается прижатой к пуансону в трех точках. Только в конце хода, при калибрующем глухом ударе, заготовка прилегает к пуансону.



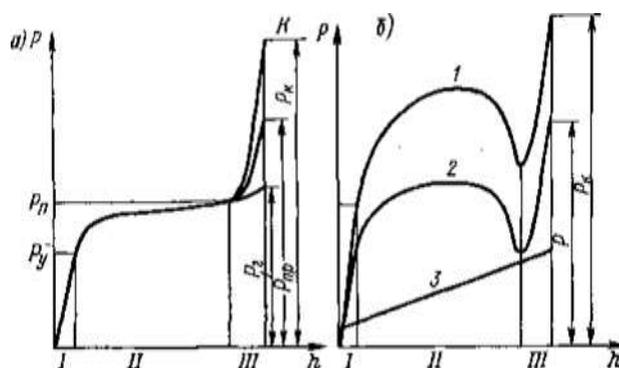
б - последовательность процесса двухугловой гибки скобы

Рисунок 3.36 - Последовательность процесса угловой гибки

Этот случай гибки значительно отличается от рассмотренного не только тем что он требует обязательного применения прижима, ко и иной величиной изгибающего момента, так как в данном случае изгиб происходит с малым расстоянием между опорами. Большое значение имеет усилие прижима. В левой части верхних схем показана последовательность гибки при недостаточной силе прижима, в результате чего деталь получается

некачественной — недоштампованной. В правой части схем показана последовательность гибки при достаточно большой силе прижима, обеспечивающей полный загиб полка при плоском дне.

На рисунке 3.37 приведены диаграммы зависимости усилий гибки от глубины продвижения пуансон Л для рассмотренных случаев гибки: угловой (рисунок 3.37, а) и двухугловой (рисунок 3.37, б). По мере увеличения глубины  $h$  можно выделить три участка: / — упругого изгиба; // — пластического изгиба и /// — участок калибровки, когда усилие резко возрастает.



$P_r$  — усилие гибки,  $P$  — усилие с прижимом в конце хода,  $P_y$  — упругий изгиб,  $P_n$  — усилие пластического изгиба.

Рисунок 3.37 - Диаграммы усилия гибки

Угловая гибка обычно производится с калибровкой материала, для чего требуется усилие  $P_K$ . Эта величина, равно как и положение точки К на кривой, не поддается теоретическому расчету и устанавливается экспериментально (см. ниже).

На рисунке 3.37, б приведены две кривые изменения усилия: / — для двухугловой гибки скобы с прижимом и калибровкой ( $P_K$ )- Снижение усилия в конце пластического изгиба вызывается небольшим перемещением вниз загнутой скобы перед калибрующим ударом; 2 — для двухугловой гибки без прижима, но с калибровкой в конце хода ( $P$ ). Прямая 3 соответствует усилию прижима, возрастающему по мере сжатия буфера.

Гибка без прижима применяется лишь для деталей невысокой точности так как допускает смещение заготовки при гибке. Гибка с прижимом

применяется для деталей повышенной точности так как не допускает смещения заготовки в процессе гибки.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите DEFORM-2D и создайте новую задачу, нажав на кнопку ... на панели управления. Нажимайте кнопку next до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название заготовки: ГИБКА. Нажмите кнопку Finish.

После запуска процессора убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система СИ и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача соответствует плоскодеформированному состоянию (вызовите ок- по Simulation controls нажатием на кнопку Simulation controls ...)

### Построение геометрии инструмента и заготовки

Определим напряжения, деформации, силу деформирования при гибке широкой полосы толщиной 3мм П-образной формы (рисунок 3.38) из стали 20 на двухугловом штампе без прижима.

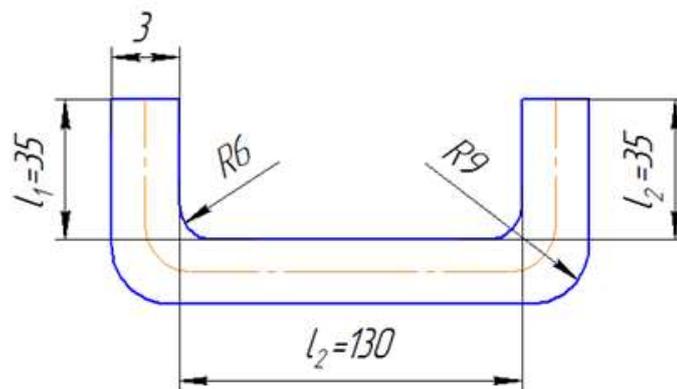
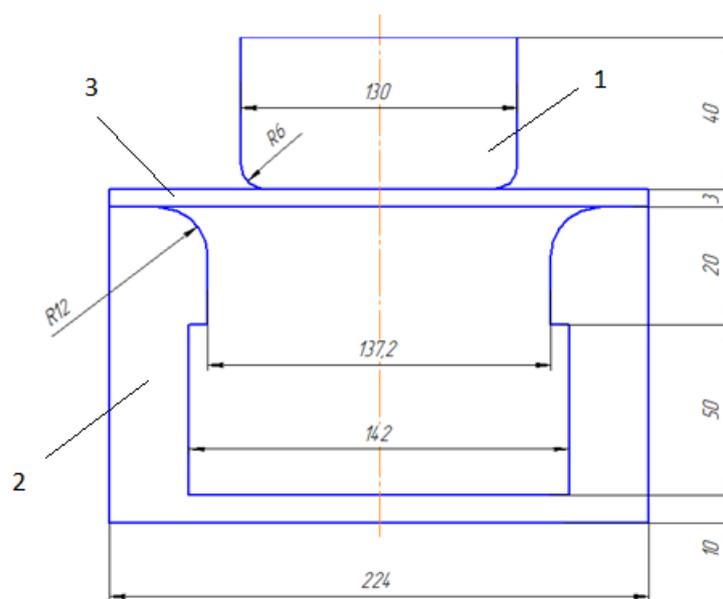


Рисунок 3.38 - Поперечное сечение профиля П-образной формы

Длина заготовки по средней линии  $l = l_1 + l_2 + l_3 + \pi(9 + 1,5) = 224$  мм.

По литературным данным радиус закругления матрицы  $r_m$  берется в диапазоне  $(2-6)S$ . Принимаем  $r_m = 4S = 4 \cdot 3 = 12$  мм. Радиус закругления пуансона  $r_{п}$  примем равным внутреннему радиусу детали  $r_{п} = 6$  мм, что превышает предельно допустимый радиус  $r_{min} = 0,5S$ , в соответствии с технологическими

рекомендациями зазор между пуансоном и матрицей  $z$  берется равным  $(0,1-0,3)S$ . Принимаем  $z=0.2*3=0.6\text{мм}$ . Остальные размеры штампа выбираем конструктивно. Материал заготовки Сталь 20, ближайший зарубежный аналог которой, сталь марки AISI-1020 по стандарту СМА. Схема операции со всеми характерными размерами приведена на рисунке 3.39.



1-пуансон;2-матрица; 3-заготовка

Рисунок 3.39 - Схема гибки П-образной детали

С помощью команды "Primitive" создайте геометрию поперечного сечения заготовки с размерами  $W=224\text{мм}$ ,  $H=3\text{мм}$  и пуансона с размерами  $W=130\text{мм}$ ,  $H=40\text{мм}$ ,  $R2=R4=6\text{мм}$ . Затем создайте геометрию матрицы путем перехода к закладке "Edit" в пункте «геометрия» и введения координат точек построения (рисунок 3.39) Для наиболее точного и быстрого расположения объектов воспользуйтесь командой «интерференция» окна «позиционирование объектов».

Конечная геометрия заготовки, пуансона и матрицы изображена на рисунке 3.40

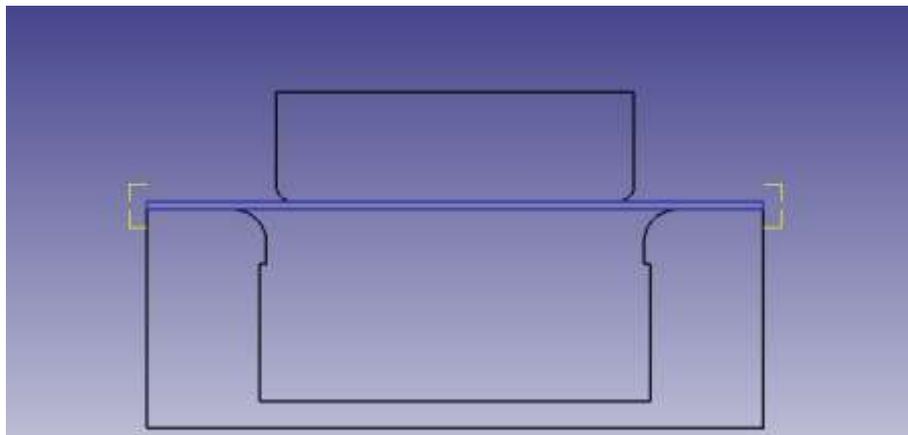


Рисунок 3.40 - Изображение в окне Display после позиционирования геометрии заготовки и инструмента

Постройте конечно-элементную модель заготовки, содержащую 1500 элементов и задайте материал заготовки AISI 1020.

При задании контактного взаимодействия объектов на закладке «трение» укажите пункт "Columb" коэффициент трения 0,15. Задайте движение пуансона со скоростью 1мм\с в направлении -Y с помощью пункта «давление», расположенного на панели инструментов.

Задайте шаг задачи по времени 0,1 сек и укажите число шагов равным 400, что будет соответствовать перемещению пуансона на величину 40мм.

Создайте базу данных и выполните расчет. Откройте задачу в постпроцессоре и постройте график изменения усилия в процессе двухугловой гибки (рисунок 3.41). Опишите характер изменения усилия в зависимости от перемещения пуансона.

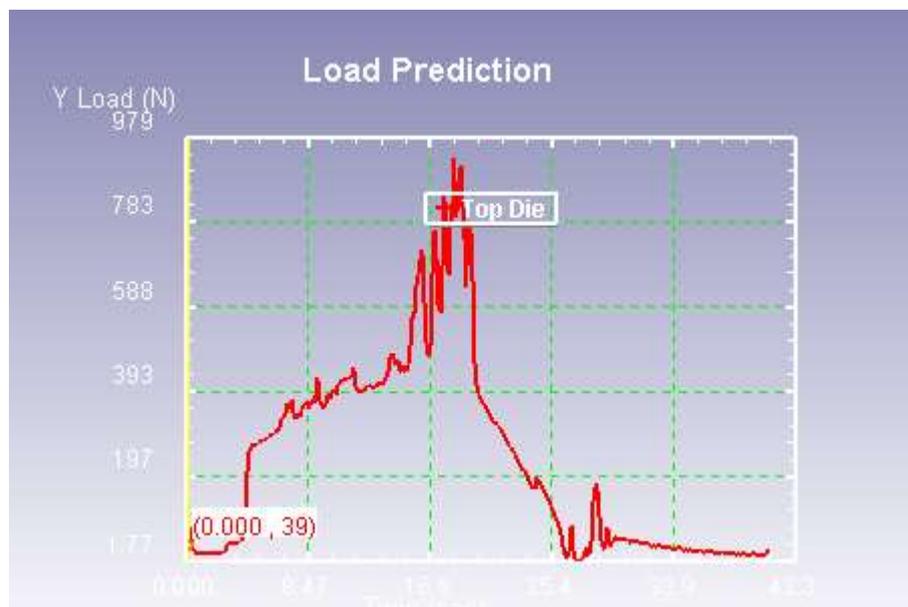


Рисунок 3.41 - График усилия гибки в зависимости от перемещения пуансона

Дайте анализ напряженно-деформированного состояния в зависимости от стадии гибки по построенным графикам распределения интенсивности напряжений и деформаций и геометрии получаемой детали, рисунок

Обратите внимание на то, что в рассматриваемом варианте двухугловой гибки наблюдается значительное выпучивание среднего участка заготовки, что не позволяет получить качественную деталь. Предложите технические решения, позволяющие устранить это явление (применение прижима, уменьшение зазора между матрицей и пуансоном, изменение схемы гибки и т. д.). Создайте новую задачу и с помощью моделирования проведите проверку правильности выбора нового технического решения.

Проведите анализ распределения напряжений  $\sigma_y$  в зонегиба по толщине заготовки (рисунок 3.45).

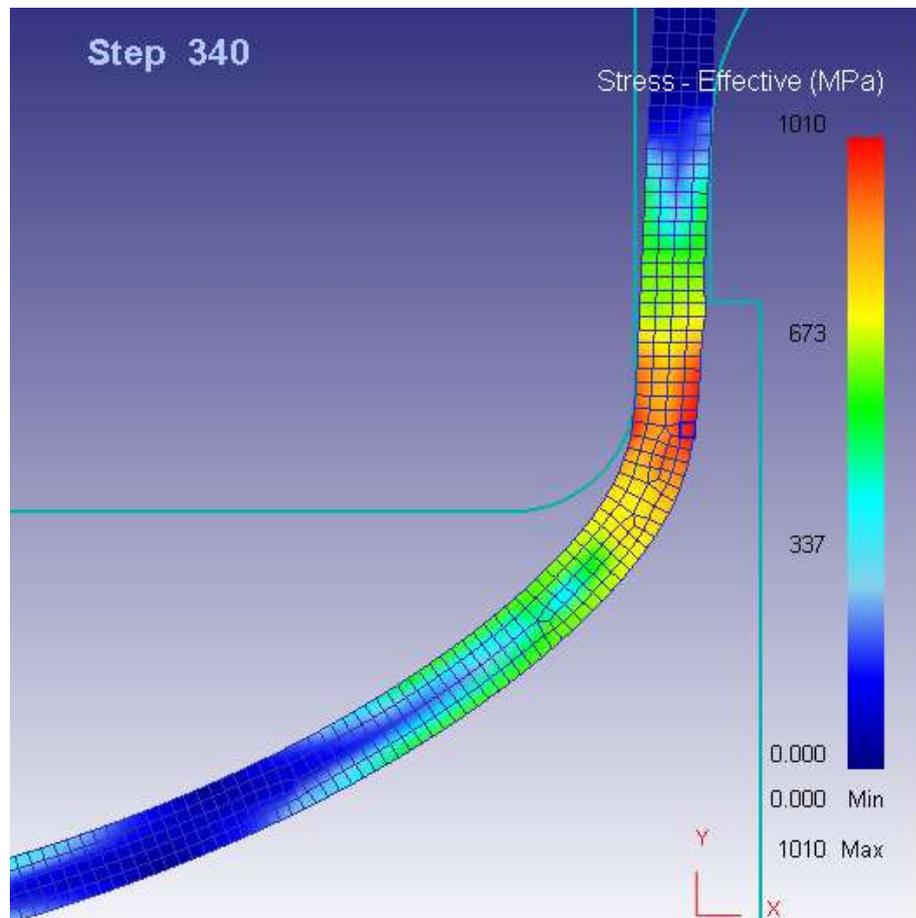


Рисунок 3.42 - Распределение интенсивности напряжений

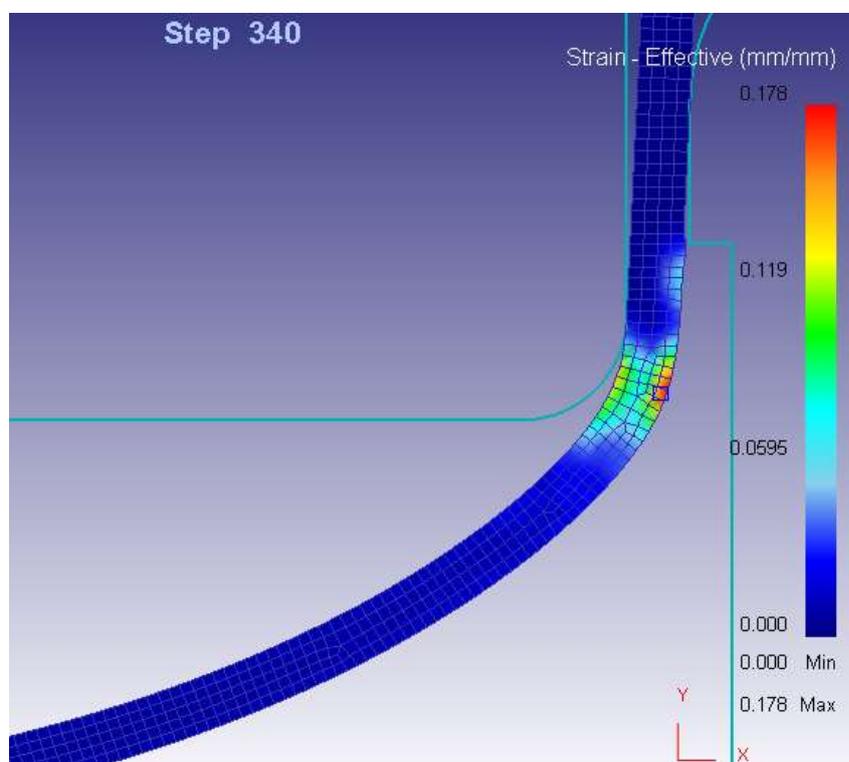


Рисунок 3.43 - Распределение интенсивности деформаций

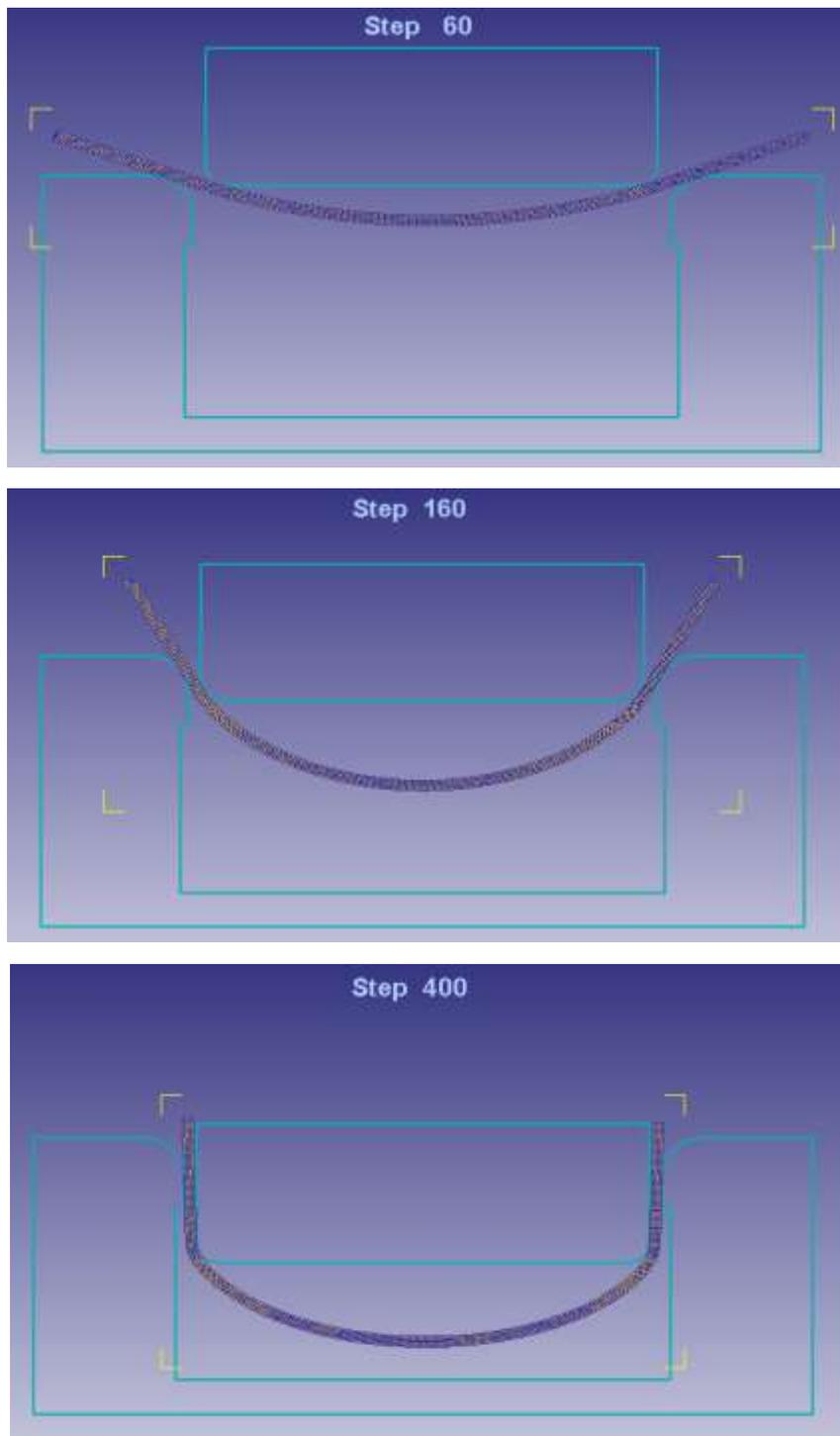


Рисунок 3.44 - Геометрия деформируемой заготовки на различных стадиях моделирования

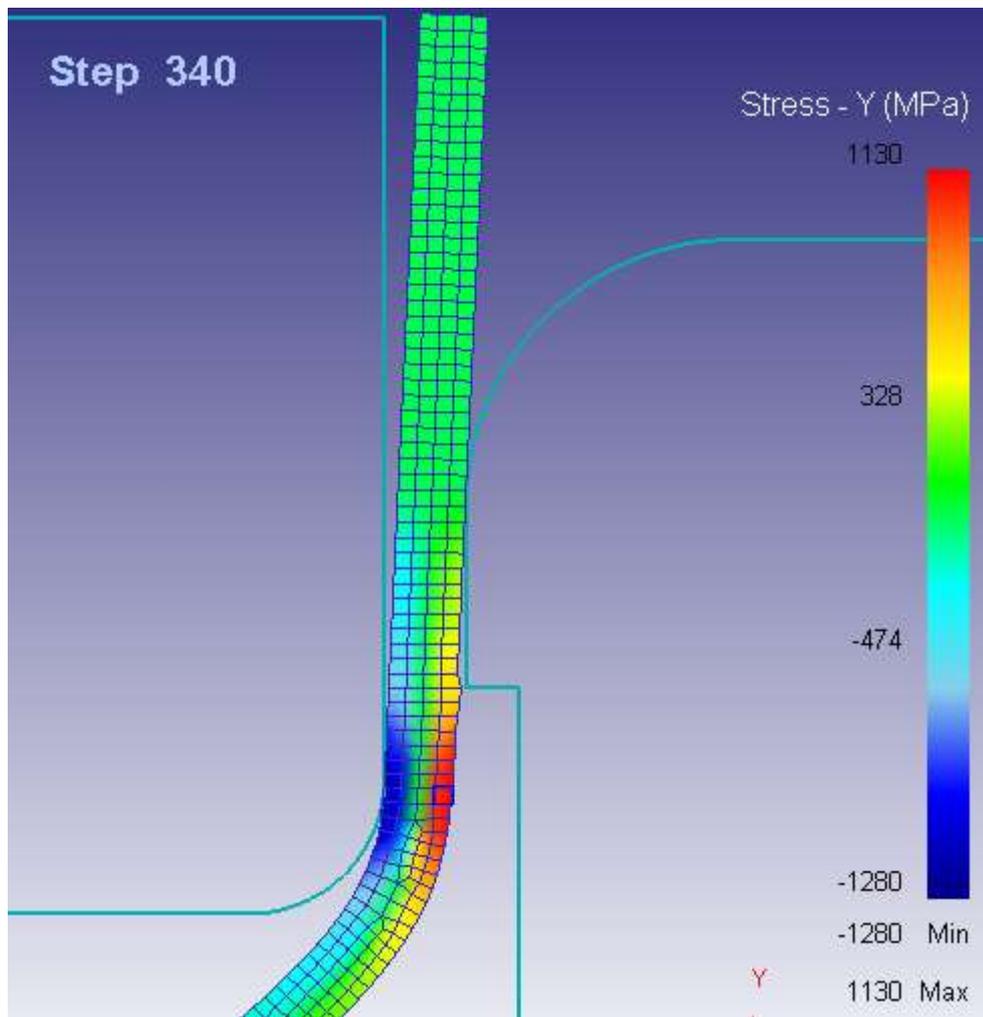


Рисунок 3.45 - Распределение напряжений в направлении оси у

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MS Word и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - Схема одноугловой и двухугловой гибки;
  - Эпюры напряжений при гибке моментом;
4. Результаты моделирования гибки П-образного профиля:
  - компьютерная модель гибки;
  - график усилия гибки в зависимости от перемещения инструмента;

- распределение интенсивности напряжений и деформаций по стадиям гибки;
- предложить пути увеличения точности П-образных деталей при гибке и сделать проверку предлагаемых способов на компьютерной модели;
- эпюры распределения меридиональных и окружных напряжений на фланце заготовки при вытяжке.

5. Анализ полученных результатов моделирования.

6. Выводы.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте определение операции гибки.
2. Опишите схему распределения меридиональных и окружных напряжений при гибке широкой полосы моментом.
3. Поясните смысл термина "Нейтральная поверхность напряжений".
4. Сущность "пружинения" при гибке.
5. Где находятся опасные сечения при гибке?
6. В каких случаях гибку осуществляют с прижимом?
7. В каких случаях при гибке справедлива линейная схема напряженного состояния?
8. Какие существуют способы гибки?
9. Перечислите детали, получаемые из листа, с помощью гибки
10. Опишите схемы главных напряжений и деформаций при гибке
11. Какую роль играют закругления матрицы и пуансона?
12. Как определить размеры заготовки при гибке?
13. Какие факторы влияют на "пружинение" при гибке?

### 3.3 Раздача трубной заготовки

**Цель работы:** Рассчитать технологические параметры раздачи трубной заготовки диаметром 49 мм на диаметр 53.2 мм. Закрепить навыки работы в программе DEFORM-2D приобретенные при выполнении предыдущих лабораторных работ.

#### Краткие теоретические сведения

Раздача- операция для увеличения диаметра краевой части полой цилиндрической заготовки. Её выполняют внедрением в заготовку пуансона с увеличивающимся диаметром по длине (рисунок 3.46).

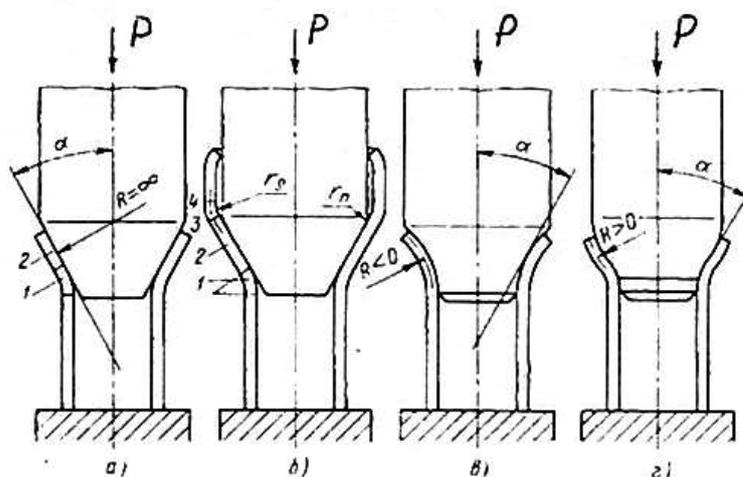


Рисунок 3.46 - Схемы деформированного и напряженного состояния при раздаче (в) и эпюры напряжений (б)

Под действие внешней силы  $P$  заготовка перемещается относительно пуансона с различной формой рабочего участка и принимает форму оболочки, состоящей из сочетания участков различной формы тороидного 1 и конического 2 (рисунок 3.46, а); двух тороидных 1 и 3, конического 2 и цилиндрического 4 (рисунок 3.46, б); участка, образованного вращением дуги радиуса  $R$  вокруг оси симметрии заготовки (рисунок 3.47, в, г).

Пуансоны для раздачи имеют осесимметричную форму. Рабочая часть коническая, выпуклая или вогнутая.

В результате раздачи происходит уменьшение толщины стенки и длины

образующей заготовки в очаге пластической деформации, охватывающем участок с увеличенными поперечными размерами. В процессе раздачи на внутренней поверхности заготовки, контактирующей с пуансоном и перемещающейся относительно него, возникают контактные нормальные  $\sigma_n$  и касательные напряжения  $\mu\sigma_n$ , а также в очаге пластической деформации возникают окружные растягивающие  $\sigma_\theta$  и радиальные сжимающие  $\sigma_r$  напряжения, (рисунок 3.47). Нижняя цилиндрическая часть заготовки деформируется упруго. Наружная часть заготовки не нагружена внешними силами, а контактное нормальное напряжение  $\sigma_n$ , передаваемое пуансоном, при малой относительной толщине стенки мало по сравнению с напряжением текучести  $\sigma_T$ . Поэтому можно считать, что это напряженное состояние при раздаче плоское.

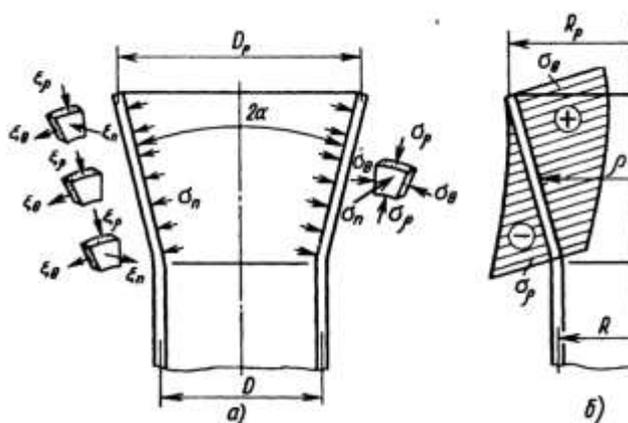


Рисунок 3.47 - Схемы деформированного и напряженного состояния при раздаче (а) и эпюры напряжений (б)

Деформированное состояние при раздаче неоднородно по очагу пластической деформации.

$\mu$  - изменяется в зависимости от соотношения нормальных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ . В точках, где напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  равны между собой по абсолютному значению, толщина заготовки в процессе деформирования не изменяется, деформированное состояние плоское. В остальных участках заготовки деформированное состояние объемное, причем там, где  $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$  - происходит утолщение стенки, а на участке, где  $|\sigma_r| < |\sigma_\theta|$  - утонение. Зона утолщения

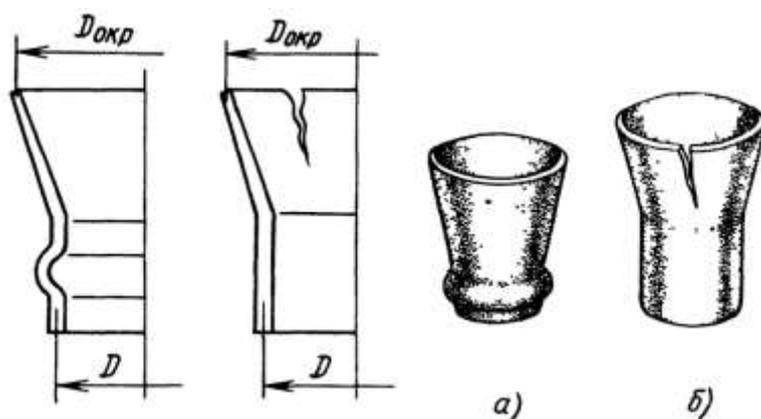
стенки мала по сравнению с зоной утонения. Поэтому с некоторым приближением можно считать, что в очаге деформации при раздаче стенка заготовки только утоняется. Наименьшая толщина заготовки находится у ее кромки и определяется по формуле

$$S_p = S \sqrt{\frac{D}{D_p}}$$

Формоизменение заготовок оценивают коэффициентом раздачи, представляющем собой отношение наибольшего среднего диаметра деформированной ее части  $D_p$  к среднему диаметру заготовки  $D$

$$K_p = \frac{D_p}{D}$$

Предельный коэффициент раздачи  $K_{pp}$  регламентируется одним из двух видов потери устойчивости, а именно — складкообразованием у основания заготовки или появлением трещины на деформированной части заготовки, (рисунок 3.48)



а- складкообразование, б- появление трещины

Рисунок 3.48 - Виды дефектов

Появление того или иного вида дефектов зависит от характеристик механических свойств материала заготовки, ее относительной толщины  $s/D$ , угла наклона образующей пуансона  $\alpha$ , условий контактного трения и условий закрепления заготовки в штампе.

Предельную степень деформации при раздаче конусным пуансоном

можно повысить, если на кромке заготовки получить небольшой фланец шириной  $5-6s$  при внутреннем радиусе изгиба  $r \geq s$ . При раздаче фланец воспринимает без разрушения более высокие окружные растягивающие напряжения, чем кромка заготовки без фланца. При этом предельная степень деформации увеличивается на 15—20 %.

На рисунке 3.49 приведен график изменения усилия раздачи ( $P$  с чертой) коническим пуансоном с малым радиусом округления на переходе от конической части к цилиндрической. Из рисунка видно, что в начале деформирования происходит упругое сжатие заготовки; это длится до тех пор, пока проекция элементарных усилий раздачи на перпендикуляр к оси симметрии не окажется достаточной для начала пластической деформации. В начале пластической деформации краевой части заготовки при значительных углах конусности пуансона наблюдается некоторое уменьшение усилия раздачи, объясняемое тем, что при увеличении диаметра краевой части уменьшается усилие, необходимое для создания изгибающего момента, образующего первый участок свободного изгиба.

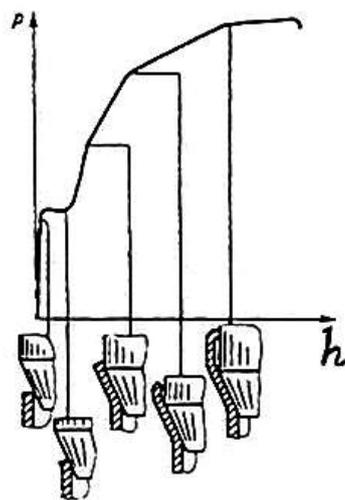


Рисунок 3.49 - График изменения усилия раздачи по ходу процесса

По мере увеличения объема очага деформации и длины контактной поверхности заготовки по пуансону наблюдается сравнительно интенсивное увеличение усилия деформирования вплоть до момента, когда край заготовки

не подойдет к границе между конической и цилиндрической частями пуансона. После этого краевая часть заготовки теряет контакт с конической поверхностью пуансона, диаметр края заготовки продолжает увеличиваться, а момент, образованный напряжениями  $\sigma_\theta$ , не достигнет величины, достаточной для изгиба в меридиональном направлении. С этого момента начинается образование второго участка свободного изгиба. Этому этапу раздачи соответствует плавное уменьшение интенсивности роста усилия.

Последующее перемещение пуансона относительно заготовки приводит к тому, что диаметр края заготовки начинает уменьшаться, причем краевые элементы испытывают действие сжимающих напряжений  $\sigma_\theta$ , которые при определенной длине краевого участка образуют момент, достаточный для спрямления предварительно изогнутых на участке свободного изгиба элементов заготовки. При этом наблюдается некоторое увеличение интенсивности роста усилия деформирования.

После образования недеформируемого участка нового диаметра усилие раздачи стабилизируется и наступает этап установившегося деформирования, при котором размеры очага деформации не изменяются и он с двух сторон ограничен недеформируемыми участками заготовки.

Как показывает практика для раздачи заготовок одних и тех же размеров деформирующее усилие тем больше, чем выше характеристики прочности материала заготовки, степень деформации и силы контактного трения. Угол наклона образующей пуансона а также влияет на деформирующее усилие раздачи. Исследование показывает, что существуют оптимальные углы, при которых усилие раздачи наименьшее. При малых коэффициентах трения  $\mu$  оптимальные углы конусности равны  $15\div 20$ .

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

### **Создание новой задачи**

**Описание задачи:** Материал заготовки – AISI 1010 (аналог стали 10).  
Форма пуансона и размеры заготовки показаны на рисунке 3.50.

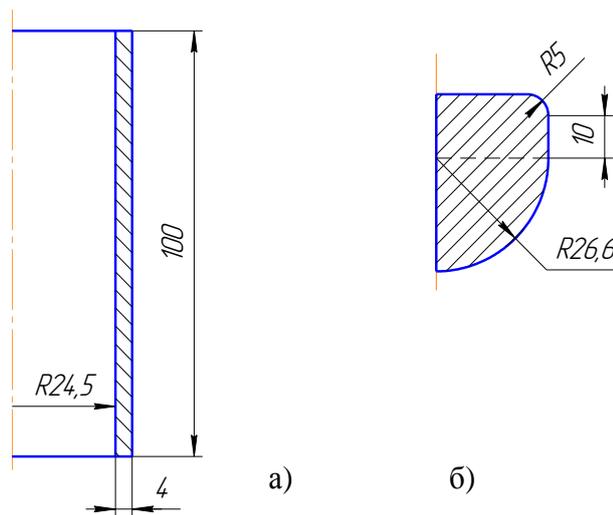


Рисунок 3.50 - Размеры заготовки и пуансона

Особенностью решаемой задачи является наличие участка свободного пластического изгиба. Для оценки радиуса пластического изгиба рассчитаем базовую задачу в которой примем, что радиус инструмента равен радиусу получаемой детали т.е.  $R=26.6$  мм.

### *Расчет первого варианта задачи*

Создайте новую задачу под названием Var1. Постройте конечно-элементную модель заготовки содержащую 1000 КЭ, с геометрическими размерами указанными на рисунке 3.50.

Задайте материал заготовки AISI 1010.

На панели инструментов в пункте **Граничные условия** укажите граничные условия **Velocity** (скорость) значение 0, направление Y, после чего в окне **Display** укажите ЛКМ нижнюю сторону заготовки которая должна упираться в нижний инструмент указав на нижний левый и нижний правый угол заготовки. Указанная сторона заготовки будет подсвечена нажмите ЛКМ на кнопку **Добавить** .

Постройте геометрию пуансона ( $R=26.6$ ). Расположите пуансон относительно заготовки так, как это показано на рисунке 3.51.

При задании контактного взаимодействия на закладке **Трение** укажите

пункт **Columb** коэффициент трения 0.12. Задайте движение верхнего инструмента со скоростью 1 мм/с с помощью пункта **Движение** расположенного на **Панели инструментов**



Задайте шаг задачи по перемещению. Укажите число шагов равным 1000.

Для остановки расчёта используйте закладку **Остановка** панели **Настройки задачи**. Пункт **Остановка** в закладке **Расстояние между инструментом** необходимо указать метод – расстояние по оси Y равное 0. После этого в окне **Display** необходимо указать последовательно точки пуансона и нижнего торца заготовки как показано на рисунке 3.51.

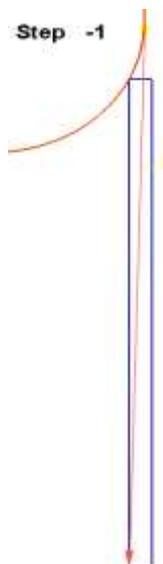


Рисунок 3.51 - Окно **Display** после задания параметров остановки

Создайте базу данных и выполните расчёт. Откройте решаемую задачу в постпроцессоре. Обратите внимание на то, что размер отверстия у трубы больше чем требовалось получить, т.е. 26.6. Заметьте, что диаметр отверстия изменяется по её высоте. Дайте оценку полученному результату.

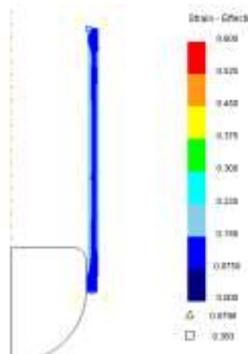
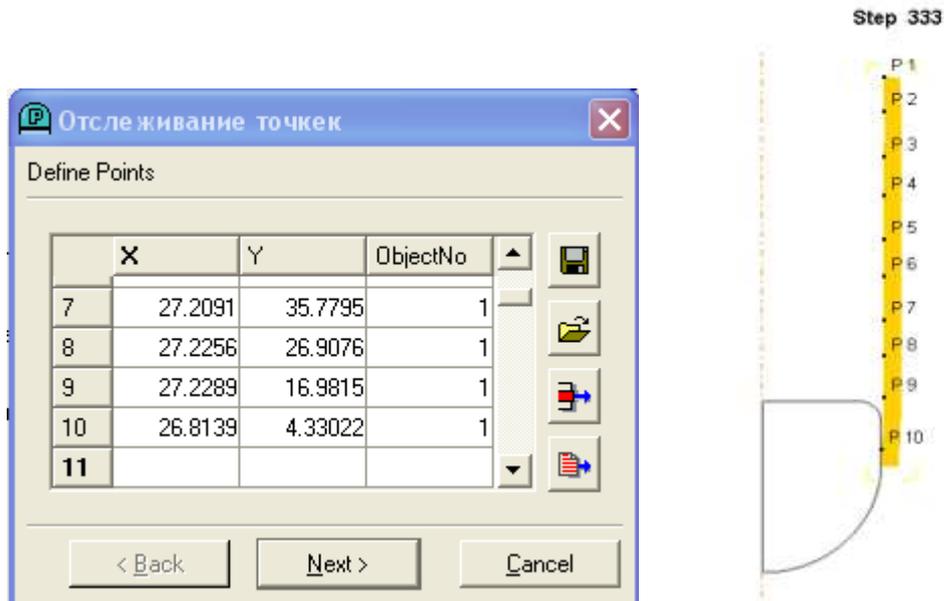


Рисунок 3.52 - Результат расчёта первого варианта

Для оценки среднего значения диаметра отверстия полученного в трубе используйте команду **Отслеживание точек** которая позволяет получить координаты указанных точек. Вызовите окно **Отслеживание точек** нажав на кнопку **Отслеживание точек**  (рисунок 3.53, а). Последовательно укажите 10 точек на примерно равном расстоянии по высоте полученного полуфабриката (рисунок 3.53, б), нажмите кнопку **Next**. Снова вызовите команду **Отслеживание точек** и нажмите кнопку **Сохранить** . Укажите место сохранения и имя файла.

Запустите программу MS Excel. Откройте сохранённый файл. Рассчитайте первое значение по первому столбцу.

Если сумма значений выводимая Excel равна 0, необходимо выполнить замену разделителя целой и десятичной части числа с ”.” на “,”. Наиболее просто данную операцию можно выполнить при помощи команды **Поиск** меню **Редактирование**.



а

б

а) - Окно **Отслеживание точек**, б) - Окно Display после задания точек

Рисунок 3.53 - **Отслеживание точек**

Полученные данные свидетельствуют о том, что для получения точного размера отверстия необходимо учитывать радиус свободного пластического изгиба рисунок 3.54. Рассчитайте в Excel среднее значение отклонения ( $R-R_{п}$ ) от требуемого размера полученного из расчёта полуфабриката.

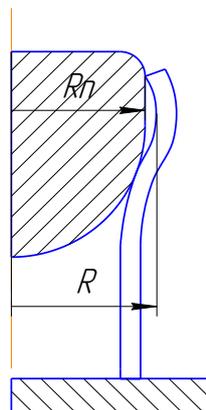
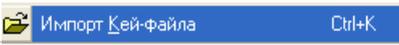


Рисунок 3.54 - Иллюстрация свободного пластического изгиба

### ***Расчёт второго варианта задачи***

Создайте новую задачу и сохраните её под именем Var2. Для того чтобы повторно не выполнять задание исходных данных импортируйте данные о

первом шаге из рассмотренной ранее задачи с помощью команды **Импорт Кей-**

**Файла**  меню **Файл**.

Уменьшите на полученное с помощью Excel значение отклонения радиус пуансона и выполните расчёт второго варианта.

Откройте рассчитанную задачу в постпроцессоре. На **Панели инструментов** выберите пункт **Параметры**. В качестве интересующего параметра укажите параметр **Strain Effective** . Дайте оценку полученным результатам. Объясните, почему в заготовке не наблюдается участков разных цветов, но заготовка деформируется.

С помощью команды **Отслеживание точек** и программы MS Excel оцените внутренний диаметр трубы.

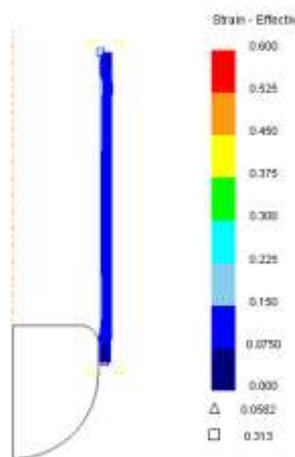


Рисунок 3.55 - Результат расчёта второго варианта

### *Расчёт 3 варианта*

Создайте задачу и сохраните её под именем Var3.

Импортируйте данные из задачи Var1. На закладке **Общее** установите тип заготовки **Упруго-пластический**.

Выполните расчёт задачи.

Откройте полученное решение в постпроцессоре и дайте оценку полученному результату (рисунок 3.56).

Выполните с помощью команды **Отслеживание точек** и программы MS Excel расчёт внутреннего диаметра трубы.

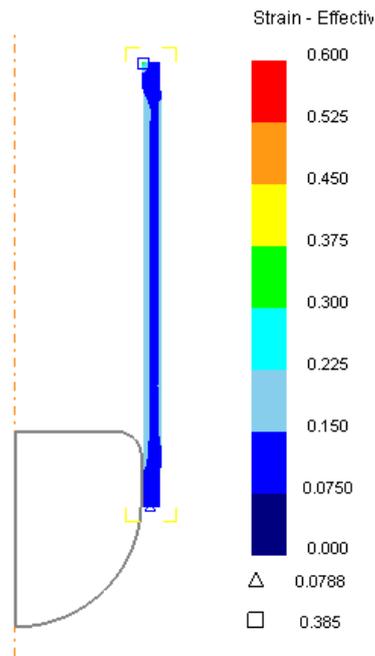


Рисунок 3.56 - Результат расчёта третьего варианта

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MSWord и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса раздачи;
  - схемы раздачи;
  - напряженно-деформированное состояние.
4. Результаты моделирования раздачи трубной заготовки
  - определение среднего диаметра трубы после раздачи;
  - нахождение размеров заготовки, обеспечивающих точные размеры готовой трубы;
  - анализ моделирования материала заготовки, как пластического и упруго-пластического;
  - выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите схему распределения меридиональных и окружных напряжений при раздаче полой заготовки.
2. Приведите факторы, влияющие на предельный коэффициент раздачи.
3. Дайте определение процесса раздачи.
4. Перечислите детали, полученные с помощью операции раздачи.
5. Как рассчитать коэффициент раздачи.
6. Опишите конструкцию пуансона для процесса раздачи.
7. Картина деформированного состояния при раздачею
8. Какие факторы ограничивают предельную степень деформации при раздаче.
9. В каких случаях появляются трещины на деформированной части полой заготовки?
10. Чем регламентируется предельный коэффициент раздачи?
11. Как изменяется усилие в процессе раздачи?
12. Как выбрать угол наклона образующей конического пуансона?
13. Как изменяется толщина стенки на деформируемом участке заготовки при раздаче?
14. Для чего используется команда импорта «Key файла»?
15. Какая команда используется для измерения внутреннего диаметра в готовой трубе?
16. В чем отличие упруго-пластической модели материала от пластической?

### 3.4 Вырубка и пробивка

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе вырубки круглой детали с прижимом из стальной или алюминиевой заготовок и привитие навыков работы с программным комплексом DEFORM-2D.

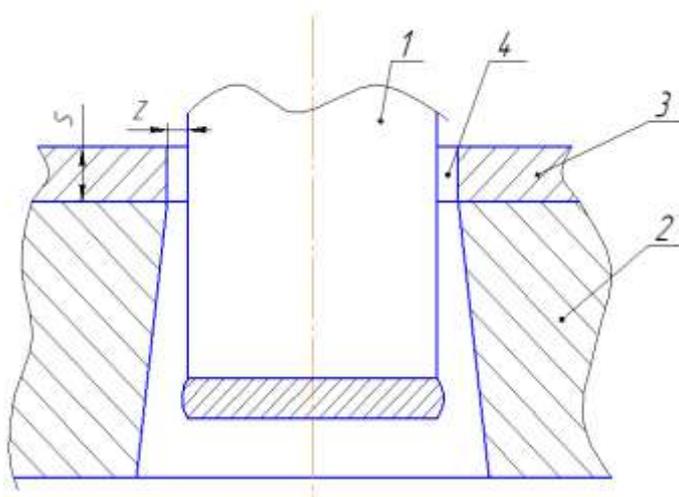
#### Краткие теоретические сведения

Процессы вырубки и пробивки являются разделительными операциями холодной листовой штамповки и завершаются разделением металла в очаге пластической деформации.

Вырубка - это отделение части заготовки по замкнутому контуру. Отделенная часть является изделием (деталью). При вырубке можно получить любой внешний контур заготовки.

Пробивка - это отделение части заготовки по замкнутому контуру. Отделенная часть является отходом.

Вырубка и пробивка производятся в инструментальных штампах с помощью пуансона 1 и матрицы 2, которые работают как ножи замкнутой формы (рисунок 3.57). Пуансон вдавливают отделяемую часть плоской заготовки 3 в отверстие матрицы 2. Для чистого среза нужно, чтобы рабочие



1-пуансон, 2-матрица, 3-заготовка, 4-зазор

Рисунок 3.57 - Схема вырубки и пробивки

Кромки пуансона и матрицы были острыми, а зазор между пуансоном и матрицей небольшим и оптимальным (значительно меньше толщины листовой заготовки S).

Благодаря наличию зазора между режущими кромками, силы  $P$ , приложенные к противоположным поверхностям заготовки, образуют момент, стремящийся повернуть заготовку. Поворот заготовки приводит к тому, что контактные напряжения  $\sigma_x$  имеют максимальную величину у режущих кромок и уменьшаются до нуля на границе контактного участка (рисунок 3.58).

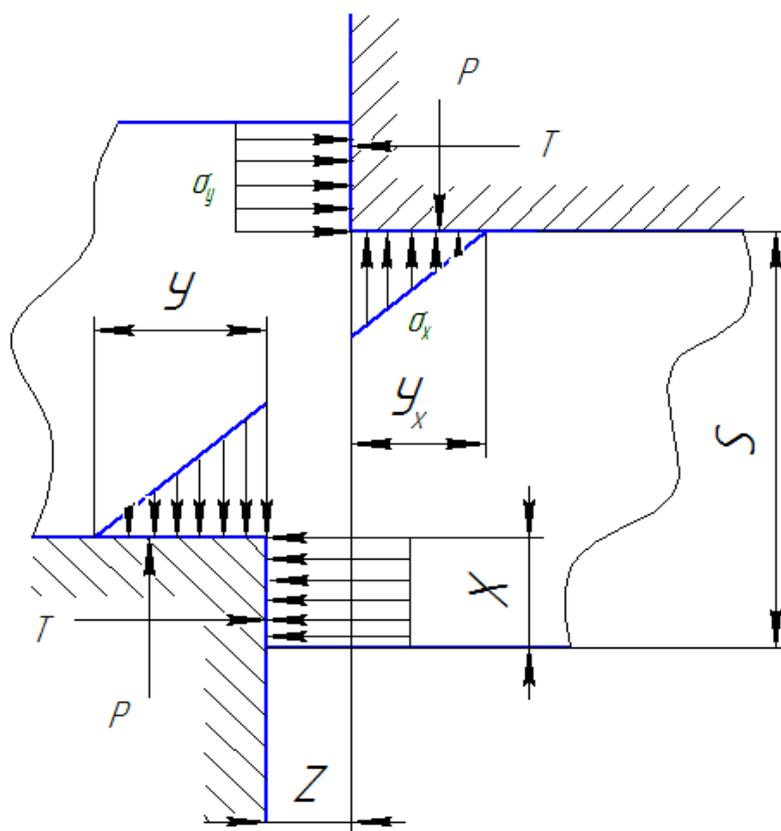


Рисунок 3.58 - Схема деформирования при вырубке и пробивке

Концентрация напряжений у режущих кромок приводит к тому, что очаг пластической деформации зарождается у режущих кромок и увеличивается по мере роста усилия  $P$ . В определенный момент деформирования очага деформации, распространяющиеся от режущих кромок, сливаются, образуя единый очаг пластической деформации (рисунок 3.59).

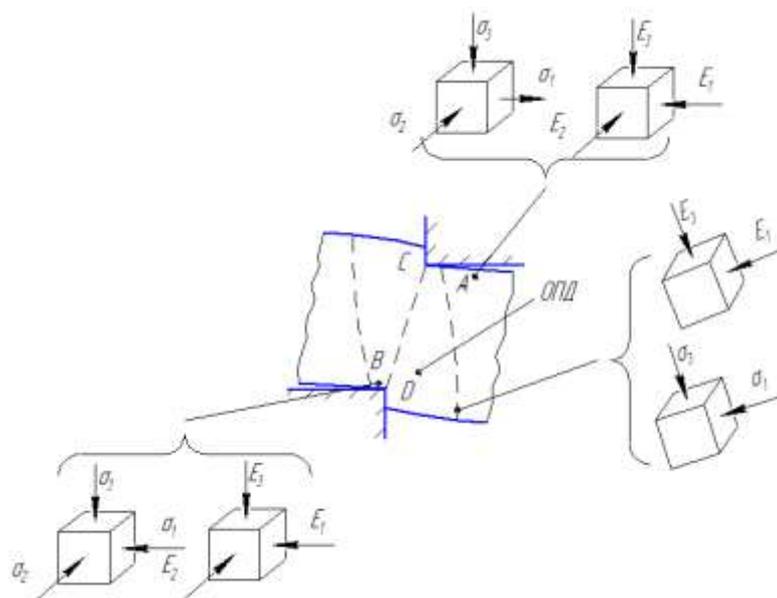


Рисунок 3.59 - Схема очага пластической деформации

Сближение режущих кромок приводит к тому, что начинается сдвиг одной части заготовки относительно другой. На стадии сдвига слои металла, параллельные плоскостям заготовки, изгибаются и удлиняются.

На ранней стадии сдвига. Режущие кромки пуансона и матрицы внедряются в заготовку и образуются участки контакта заготовки с боковыми поверхностями режущего инструмента, на которых возникают горизонтальные силы  $T$ , вызывающие контактные сжимающие напряжения  $\sigma_y$ , рисунок...

Исходя из условия пластичности  $\sigma_y - \sigma_x = \sigma_s$  следует, что напряжения  $\sigma_y$  вблизи плоскости контакта заготовки с торцом инструмента  $\sigma_y$ , будет сжимающим, а вблизи свободных поверхностей растягивающим.

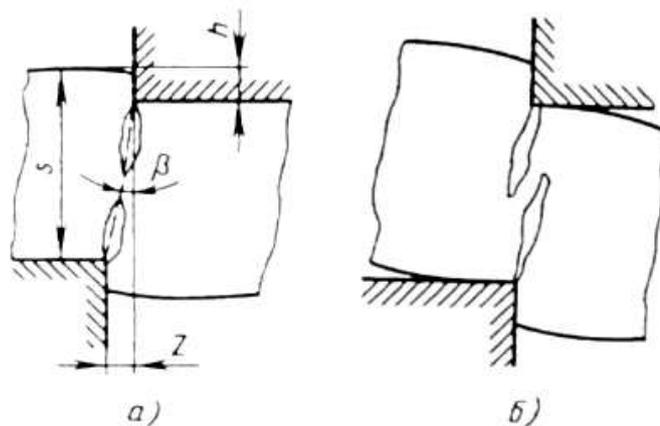
При вырубке (пробивке) круглых деталей в штампах в металле возникает следующее напряженно-деформированное состояние.

В верхней зоне под рабочей плоскостью пуансона (точка А на рисунок 3) в направлении совпадающим с нормалью к поверхности штампа, возникает напряжение сжатия в радиальном направлении напряжение растяжения  $\sigma_1$ , и в тангенциальном направлении — незначительное сжатие  $\sigma_2$ . Соответственно выбранным главным направлениям появляется деформация сжатия  $\epsilon_1$ , в

радиальном направлении – деформация растяжения  $\varepsilon_1$ , а в тангенциальном направлении – незначительная деформация растяжения  $\varepsilon_2$ , т.е. в верхней зоне металла под пуансоном будет сдвиг, смежный с сжатием.

В нижней зоне над матрицей (точки В на рисунке 3.59) в металле возникает в направлении 3 напряжение сжатия, в направлении оси 1 — напряжение растяжения и в тангенциальном направлении 2 — незначительное сжатие. Соответственно, вдоль оси 3 имеется деформация сжатия, вдоль оси 1 — деформация растяжения и вдоль оси 2 — незначительная деформация сжатия. Следовательно, в этой зоне будет сдвиг, смежный с растяжением В слоях металла на образующей поверхности разделения металла в направлении 3 главной оси, расположенной к линии CD примерно под углом  $45^\circ$  возникают напряжения и деформации сжатия, а в перпендикулярном направлении вдоль оси 1 — растяжения. Деформация и напряжение в тангенциальном направлении 2 невелики и могут быть приняты равными нулю. Такое напряженно-деформированное состояние соответствует (близко) сдвигу. Таким образом можно установить, что при вырубке круглых деталей в плоскости диаметрального сечения заготовки по линии разделения металла между режущими кромками пуансона и матрицы АВ возникает плоское напряженно-деформированное состояние, близкое к сдвигу.

Так как очаг деформации зарождается у режущих кромок, то и накопленная в процессе сдвига интенсивность деформаций будет максимальной вблизи режущих кромок. Для каждого металла и данной схемы напряженного состояния существует предельное значение интенсивности деформаций, которую может выдержать металл без разрушения. Отсюда следует, что по мере сближения режущих кромок наступает момент, когда пластичность металла будет исчерпана и начнется разрушение заготовки. Зарождение трещины происходит у режущей кромки (рисунок 3.60, а).



а-при нормальном зазоре, б-при малом зазоре

Рисунок 3.60 - Схема образования и развития трещин

Благодаря концентрации напряжений в устье трещины, последняя быстро развивается в толщину заготовки и при встрече трещин, идущих от режущих кромок навстречу друг другу, процесс разделения заготовки заканчивается. Таким образом, разделение заготовки на части может завершаться при внедрении режущих кромок на определенную долю толщины. В этом случае поверхность среза будет иметь два существенно отличающихся по гладкости участка: блестящий поясик и шероховатый участок.

Высота блестящего \*\*\*\* возрастает с увеличением пластических свойств металла заготовки и колеблется от  $(0,1-0,3)S$ .

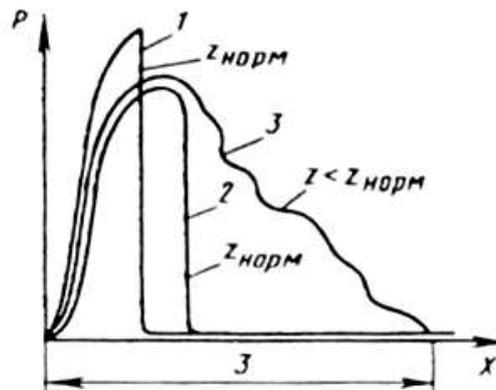
Трещины, образующиеся от режущих кромок, обычно слегка повернуты от вертикали к свободным поверхностям заготовки под углом  $P = 4...6^\circ$  причем этот угол увеличивается с увеличением пластичности металла. Образованию трещин и отклонению их от вертикали к свободной поверхности способствует расклинивающее действие сил  $P$  и  $T$ .

Условие совпадения трещин определяется из геометрических соображений (рисунок 3.60, а) из соотношения

$$z = (s - h)tg\beta.$$

Отсюда следует, что совпадение трещин обеспечивается определенным зазором, зависящим от свойств металла, и так как высота блестящего пояса с изменением пластичности металла меняется в большем диапазоне, чем угол  $p$ ,

то зазор должен уменьшаться с увеличением пластичности металла.



1-малопластичный металл, 2 и 3- пластичный металл

Рисунок 3.61 - Изменение усилия вырубке (пробивки) от хода инструмента

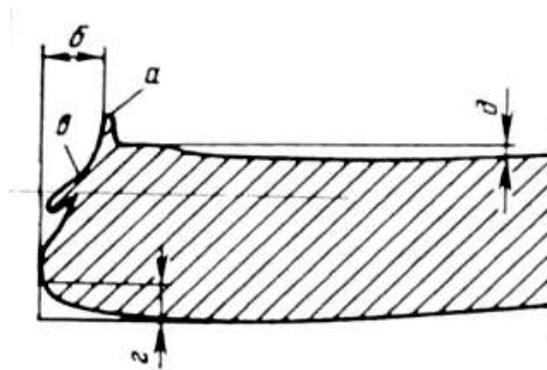
На рисунке 3.61 приведены типовые графики изменения усилия  $P$  при вырубке и пробивке. Из графиков видно, что на начальных стадиях деформирования усилие возрастает медленно (смятие и образование локальных очагов у режущих кромок), а затем усилие увеличивается достаточно быстро (образование единого очага деформации и начало сдвига одной части заготовки относительно другой). При определенной глубине внедрения режущих кромок усилие резко снижается для малопластичных металлов или плавно изменяется, имея максимум для пластичных металлов. Однако и для пластичных металлов в определенный момент, когда трещины, идущие от режущих кромок, завершают отделение частей заготовки, усилие резко падает. Такой характер изменения усилия по пути имеет место при оптимальном зазоре, обеспечивающем слияние трещин, идущих от режущих кромок.

При зазоре, меньшем оптимального, когда трещины не встречаются и образуются пояски вторичного среза, усилие снижается ступенчато, рывками, обеспечивая срезание перемычек, остающихся между трещинами

Таким образом, при зазоре, меньшем оптимального, максимальное усилие увеличивается незначительно, но существенно возрастает работа деформирования, а кроме того, вследствие заклинивания перемычек между

трещинами существенно возрастают напряжения, действующие на боковые поверхности режущего инструмента, что приводит к их повышенному износу.

Одним из характерных видов деформации при вырубке и пробивке является потеря плоскостности детали вследствие действия изгибающих моментов, вызванных силами резания  $P$ , вторым — утяжины образующиеся у свободных поверхностей вблизи поверхности среза (рисунок 3.62).



а — заусенец; б — уменьшение поперечного размера;  
в — вторая поверхность скола; г — утяжина; д — прогиб

Рисунок 3.62 - Виды дефектов

Для устранения дефектов применяют прижимы или уменьшают зазоры между режущими кромками. Оба эти способа уменьшают действующие на заготовку в процессе резания изгибающие моменты.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Описание задачи:

Материал заготовки - AL1100.

Коэффициент трения по закону Кулона 0,15.

Скорость движения пуансона 1 миллиметр в секунду.

Температура процесса 20°C.

1. Запустите DEFORM-2D и создайте новую задачу.

2. Установите на панели Simulation controls следующие настройки:

Единицы измерения — Си,

Геометрия — Осесимметричная,

Режим - Deformation (Деформирование).

3.Создайте геометрию заготовки с помощью команды Primitive, Cylinder (цилиндр) с размерами  $W=21$  мм,  $H=1$  мм.

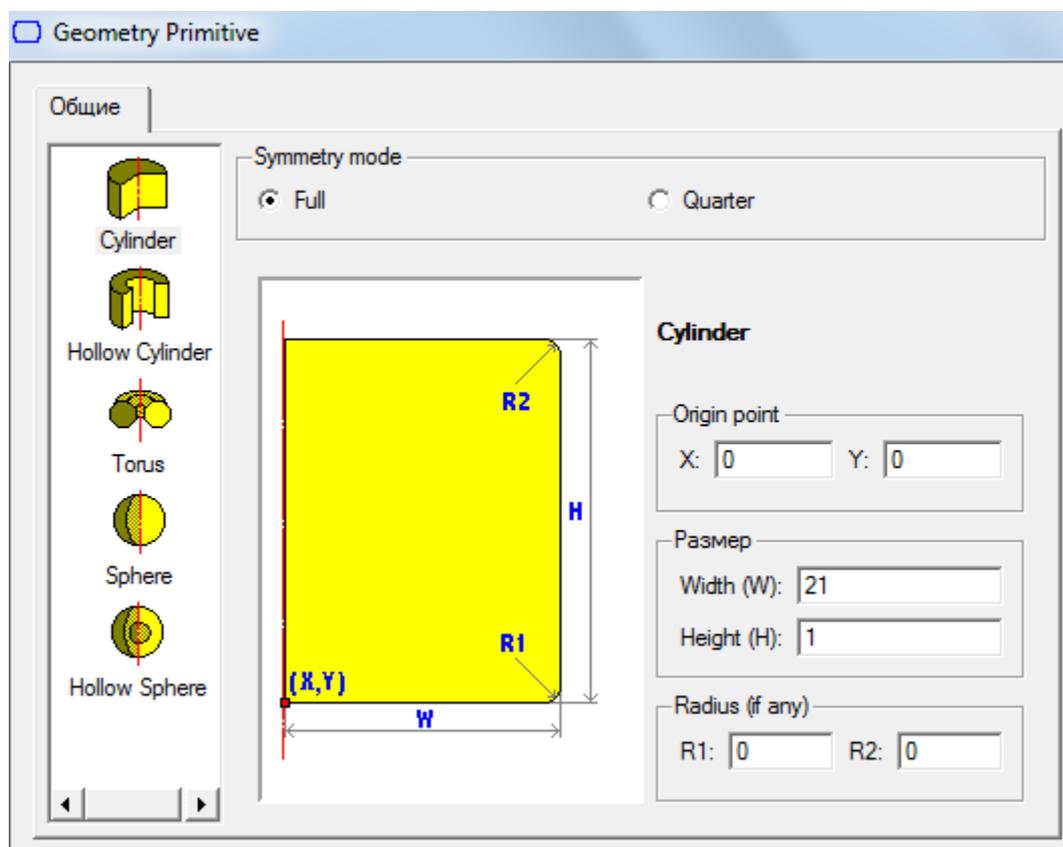


Рисунок 3.63 - Геометрия пуансона(а), матрицы(б), прижима(в)

4. Постройте с помощью команды Edit геометрию пуансона, матрицы и прижима с размерами, указанными на рисунке 3.64.

Объект (2) Top Die

	Y	R	
1	0	1	0
2	9.9	1	0.05
3	9.9	6	0
4	0	6	0

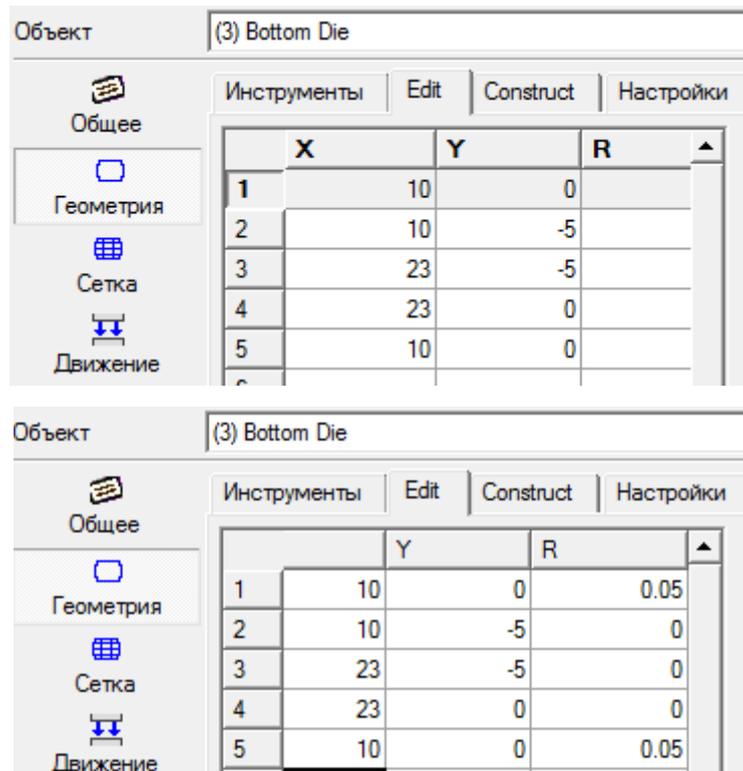
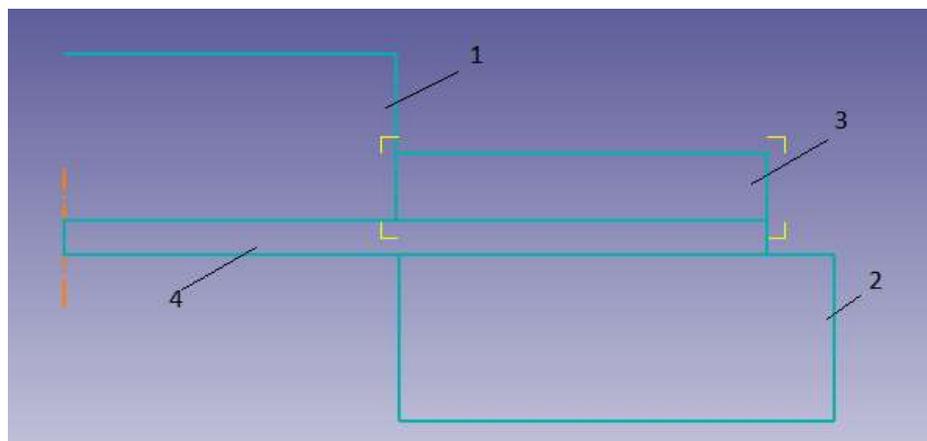


Рисунок 3.64 - Исходные данные для построения геометрии пуансона (Top Die) матрицы (Bottom Die) и прижима (Object4)

Геометрическая модель штампа для вырубki показана на рисунке 3.65.



1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – прижим; 4 – заготовка

Рисунок 3.65 - Геометрическая модель штампа

5. Разбейте построенную геометрию листовой заготовки на сетку конечных элементов. Выберите объект Заготовка, далее Сетка – Настройка – Общее. Введите параметры сетки, как указано на рисунке 3.66.

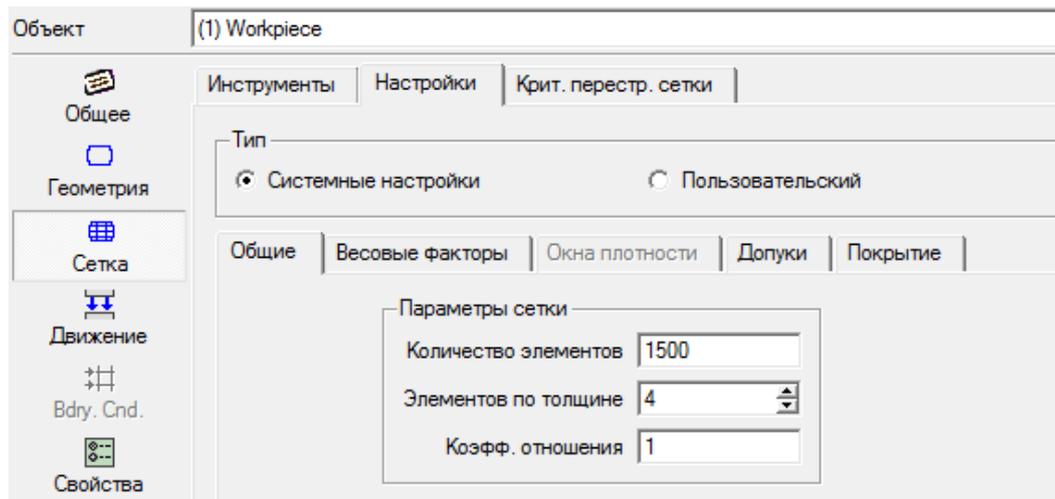


Рисунок 3.66 - Системные настройки параметров сетки конечных элементов

Для сгущения сетки в месте концентрации напряжений используйте окна плотности. Величина плотности регулируется ползунком и может принимать значения от 0 до 1, рисунок 11. Этот показатель носит относительный характер, а не абсолютный. Например, если нужно повысить плотность КЭ, то необходимо увеличить верхний параметр. Зададим весовые факторы, как указано на рисунке 3.67.

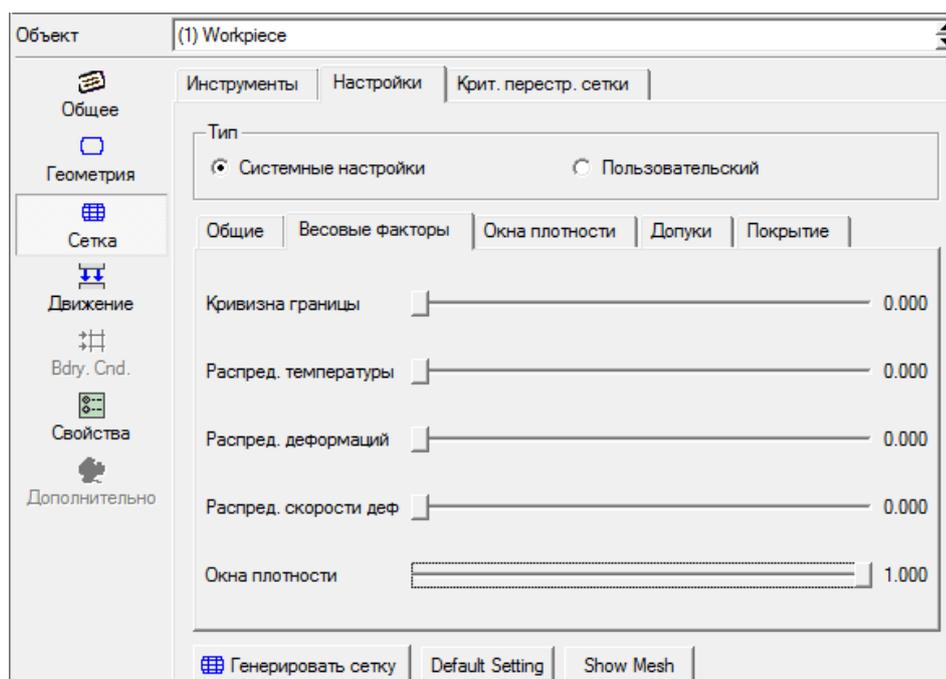


Рисунок 3.67 - Окно Весовые факторы

Далее переходим во вкладку Окно плотности. Примеры построения окон плотности 1, 2, и 3 приведены на рисунке 3.68.

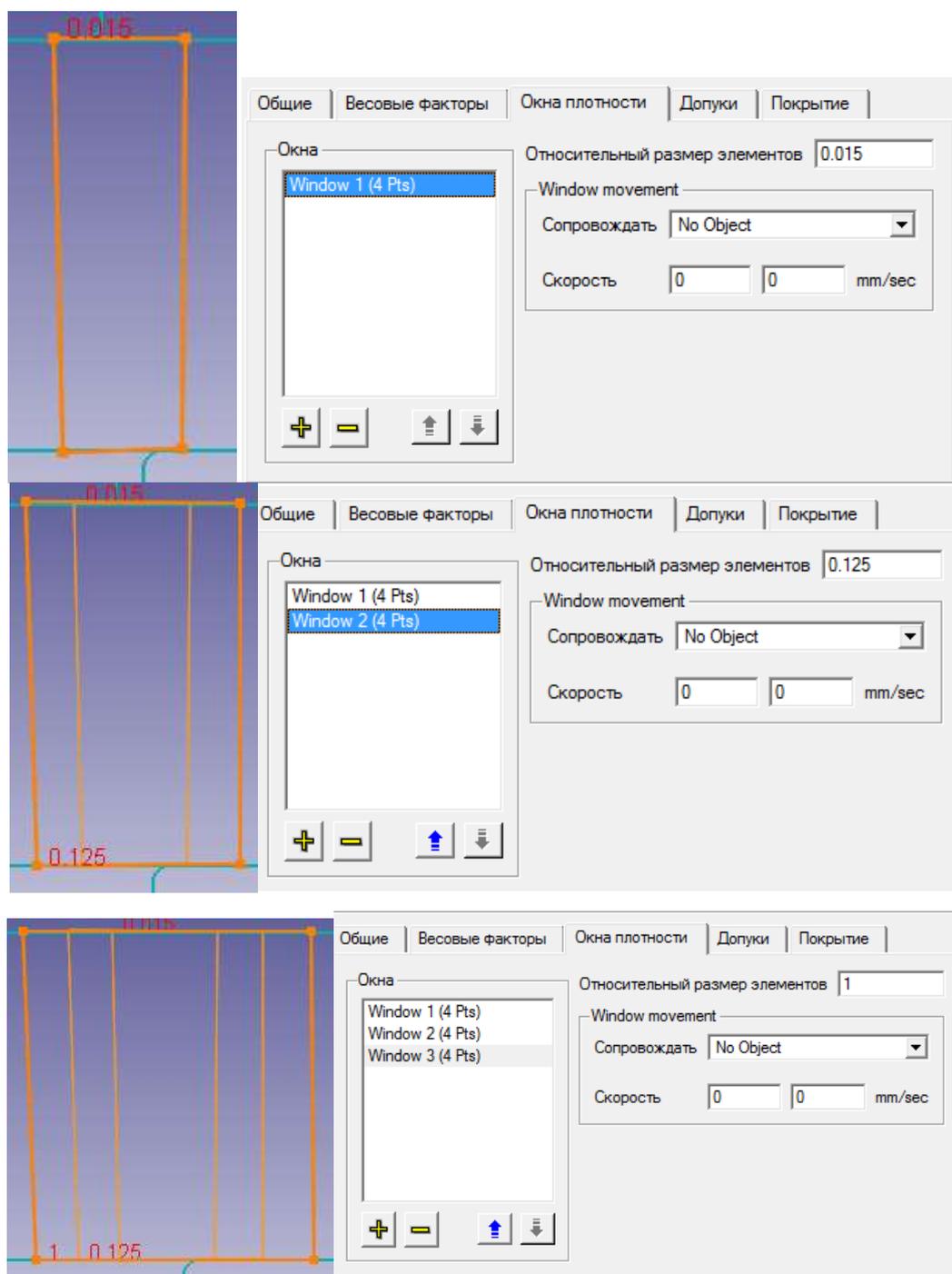


Рисунок 3.68 - Построение окон плотности

Введите значение допусков, приведенные на рисунке 3.69.

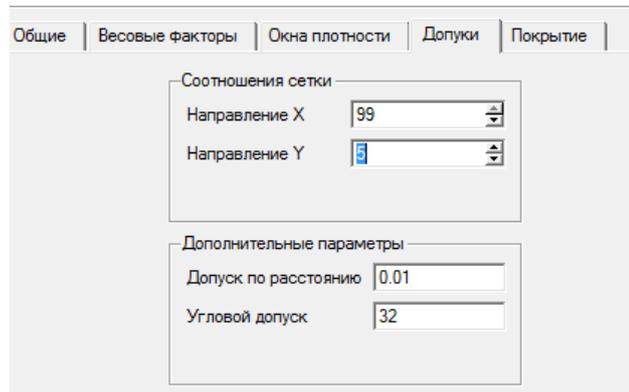


Рисунок 3.69 - Значение допусков

Нажмите ЛКМ на кнопку «Сгенерировать сетку» (рисунок 3.70).

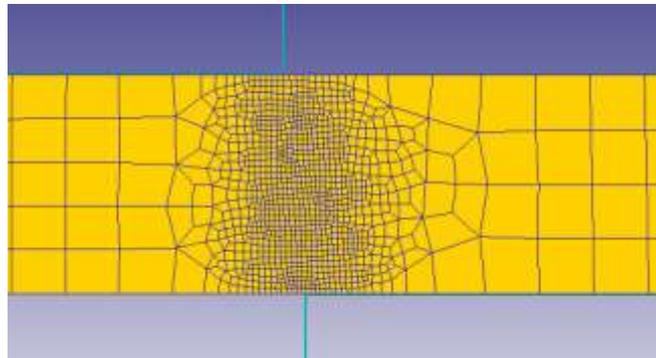


Рисунок 3.70 - Результат генерирования сетки

6. Задайте Материал заготовки. Зайдите в библиотеку материалов через вкладку Общее для заготовки и выберите материал AISI-1045 (аналог стали 45), далее нажмите ЛКМ на кнопку загрузить окна MaterialLibrary.

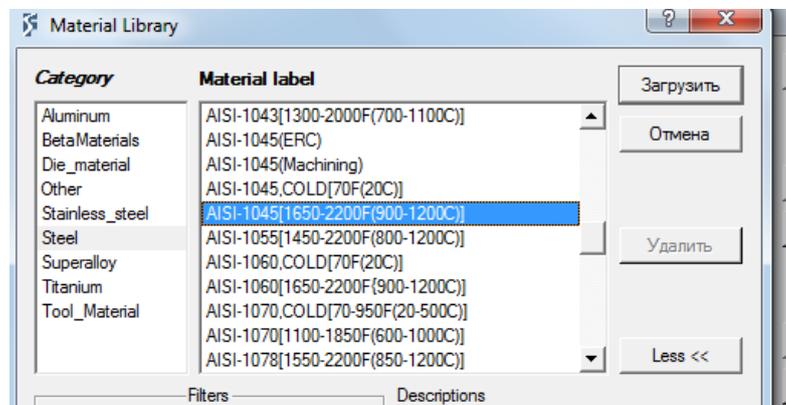


Рисунок 3.71 - Материал заготовки

7. Зайдите в свойства в настройках заготовки. И задайте значение Fracture (Модель разрушения) как показано на рисунке 3.72.

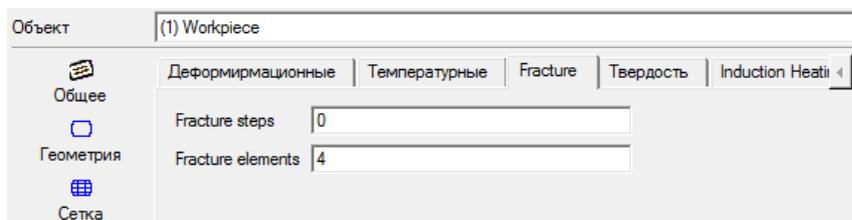


Рисунок 3.72 - Свойства заготовки

8. Задайте скорость движения пуансона, равную 1 мм\сек., как показано на рисунке 3.73.

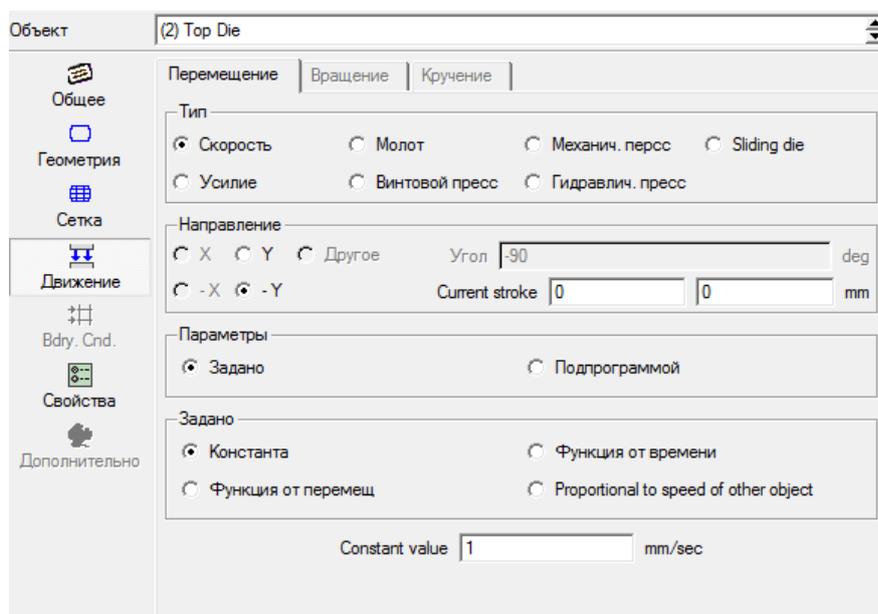


Рисунок 3.73 - Задание скорости движения пуансона

9. Откройте окно Simulation Controls.

Убедитесь что во вкладке «Основное» единица измерения установлена, как система «Си» (рисунок 3.74).

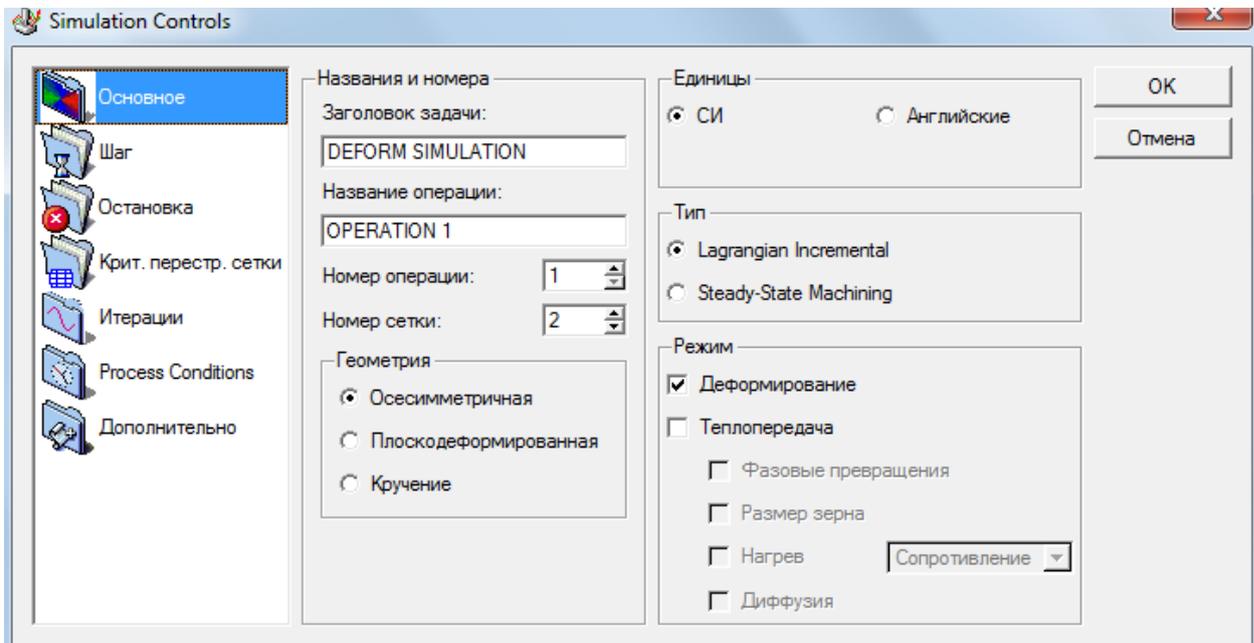


Рисунок 3.74 - Окно Simulation Controls

Переходим во вкладку Simulation Controls->Шаг,

И задаём общие и дополнительные параметры шага расчёта, как показано на рисунках 3.75 и 3.76.

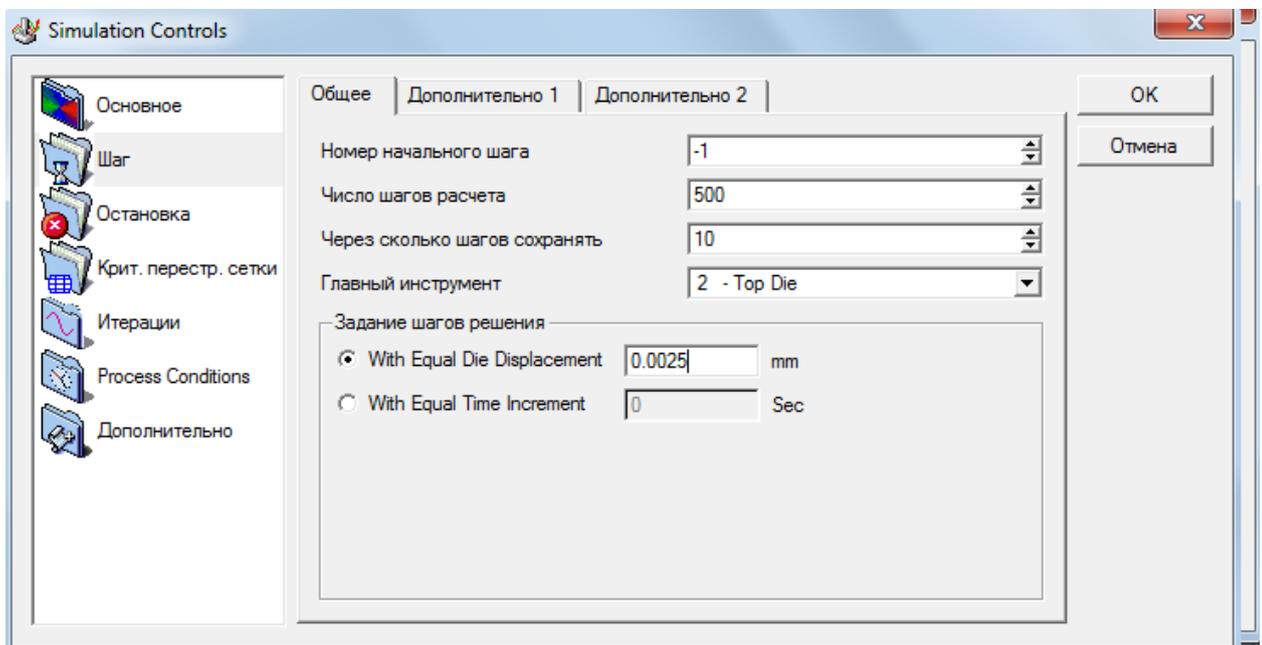


Рисунок 3.75 - Параметры шагов расчета

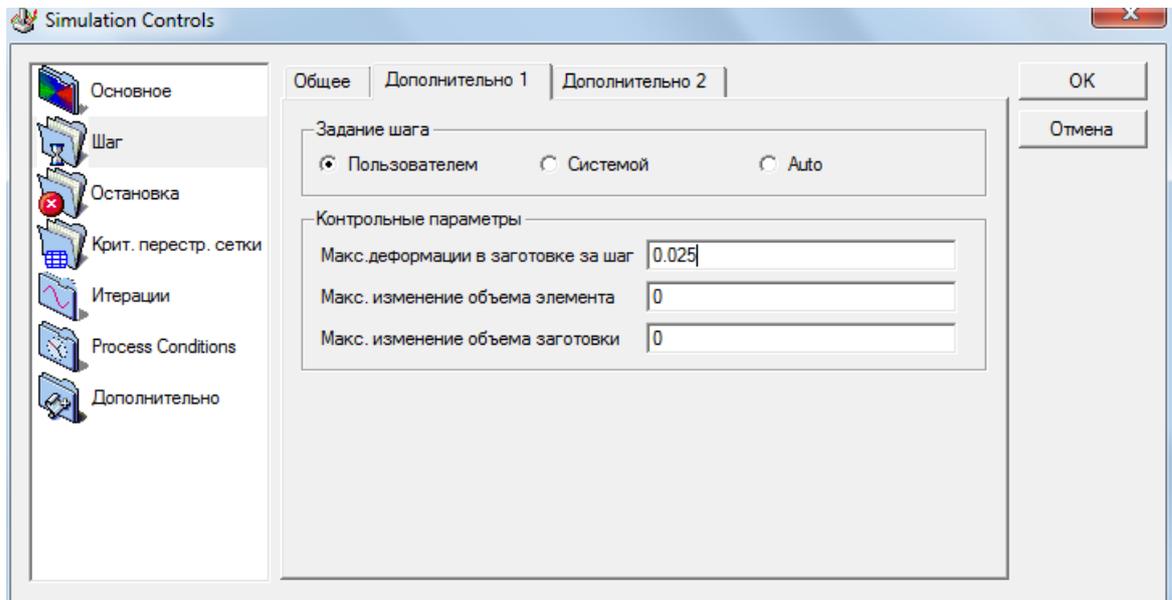


Рисунок 3.76 - Дополнительные параметры шага расчета

Настройте параметры остановки процесса вырубки.

Simulation Controls->Остановка, как показано на рисунке 3.77.

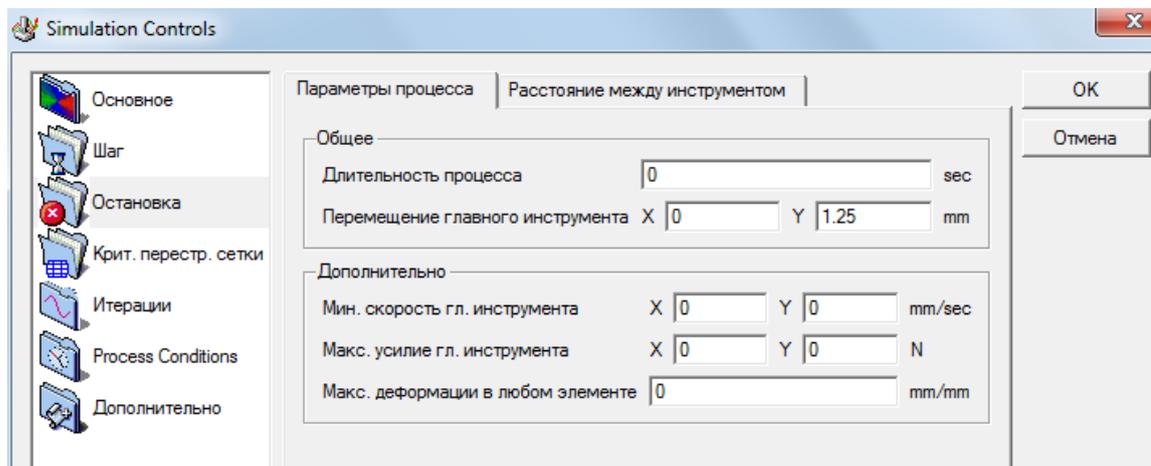


Рисунок 3.77 - Параметры остановки процесса

12. Задайте свойства материала заготовки. Для этого в главной панели нажмите ЛКМ на «Материал».

Задайте для материала свойства упругости как показано на рисунке 3.78.

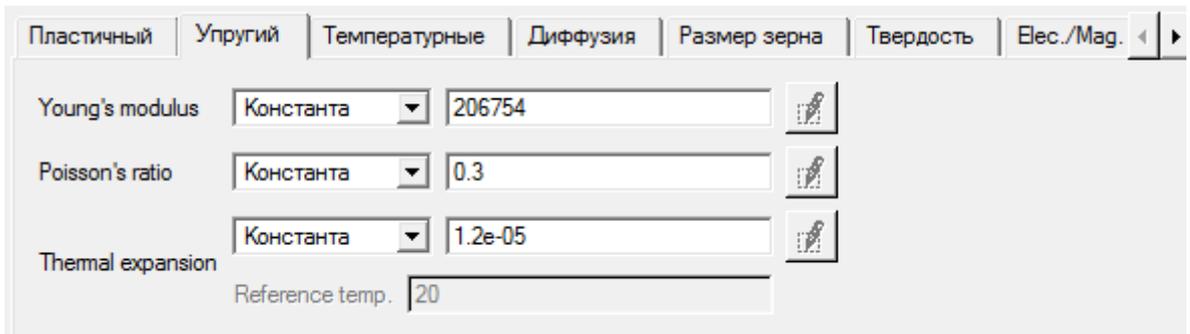


Рисунок 3.78 -. Свойства упругости материала AISI

На данный момент наилучшим образом реализованная в программе модель разрушения – это модель Латама-Кокрофта.

Найдите в окне «Материал» вкладку «Дополнительно» и задайте значения нормализации. В раскрывающейся панели. Материал->Дополнительно->Fracture выберите пункт Normalized C&A, далее ЛКМ нажмите на карандаш рядом с ним и введите критическое значение нормализации, рисунки 3.79 и 3.80. Коэффициент 0,9 – это коэффициент преобразования механической энергии в тепловую.

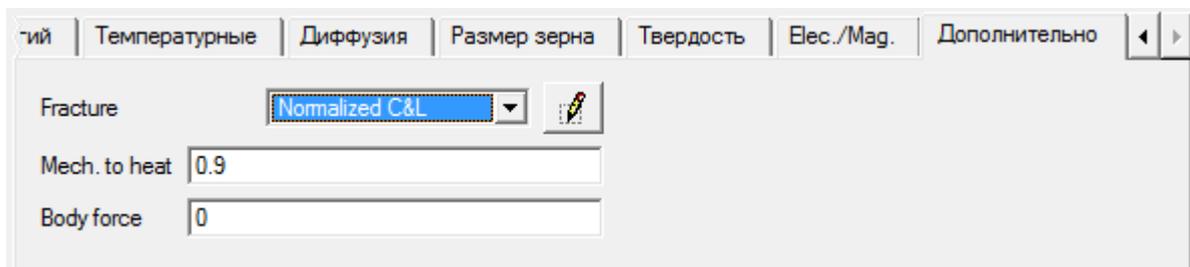


Рисунок 3.79 - Normalized C&L

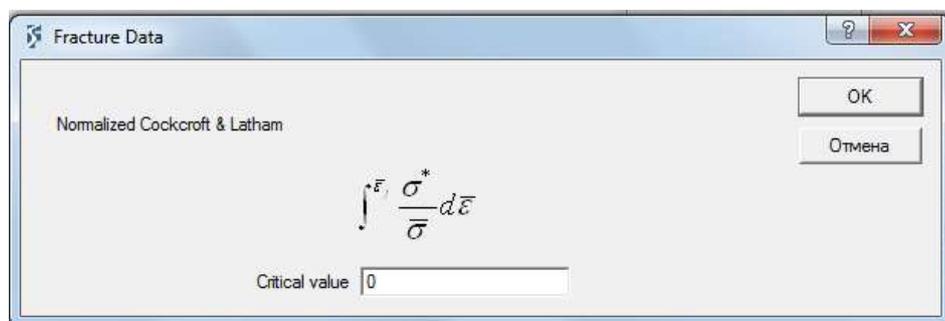


Рисунок 3.80 - Критическое значение нормализации

13. Зададим контактные значения взаимодействия объектов.

Нажмите ЛКМ в верхней панели на кнопку inter-object, и задайте взаимодействие объектов как показано на рисунке 3.81. Значение коэффициента трения равно 0.15, что показано на рисунке 3.82.

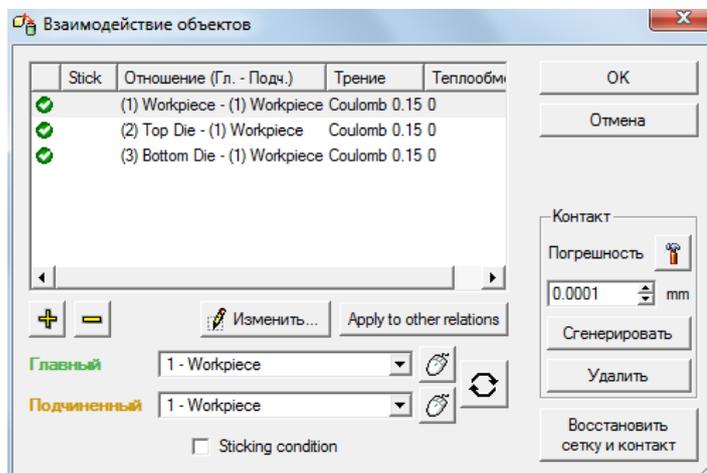


Рисунок 3.81 - Взаимодействие объектов

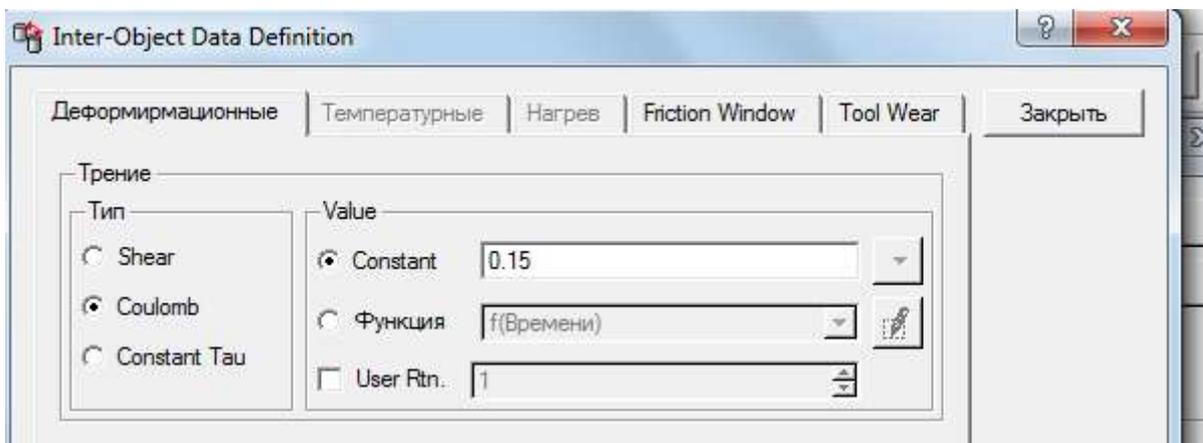


Рисунок 3.82 - Коэффициент трения по закону Кулона

Нажмите ЛКМ на кнопку «Сгенерировать». Результат показан на рисунке 3.83.

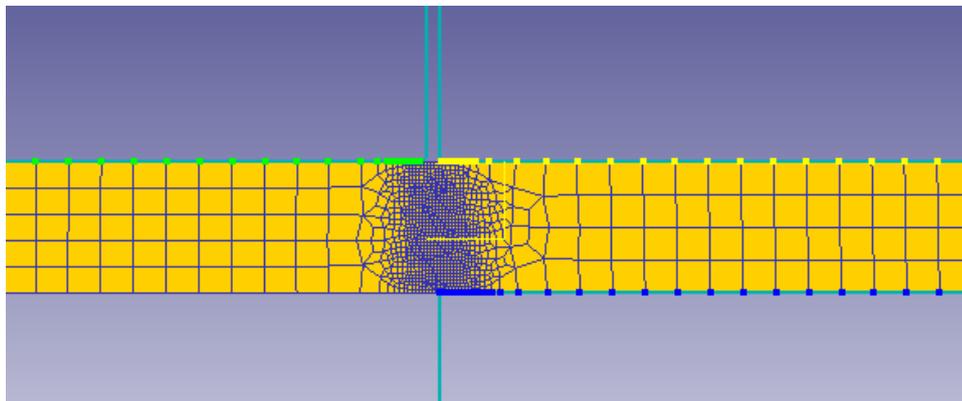


Рисунок 3.83 - Результат генерирования взаимодействия объектов

Генерируем базу данных, проводим расчет и анализ результатов выполненной работы.

На рисунке 3.84 приведен график усилия вырубki в зависимости от хода пуансона.

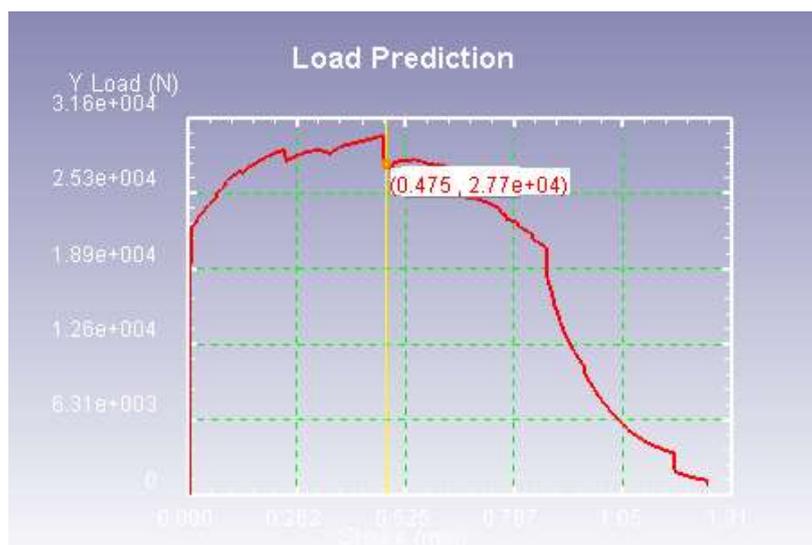


Рисунок 3.84 - Изменение усилия вырубki

На рисунке 3.85 приведено поле скоростей при вырубке.

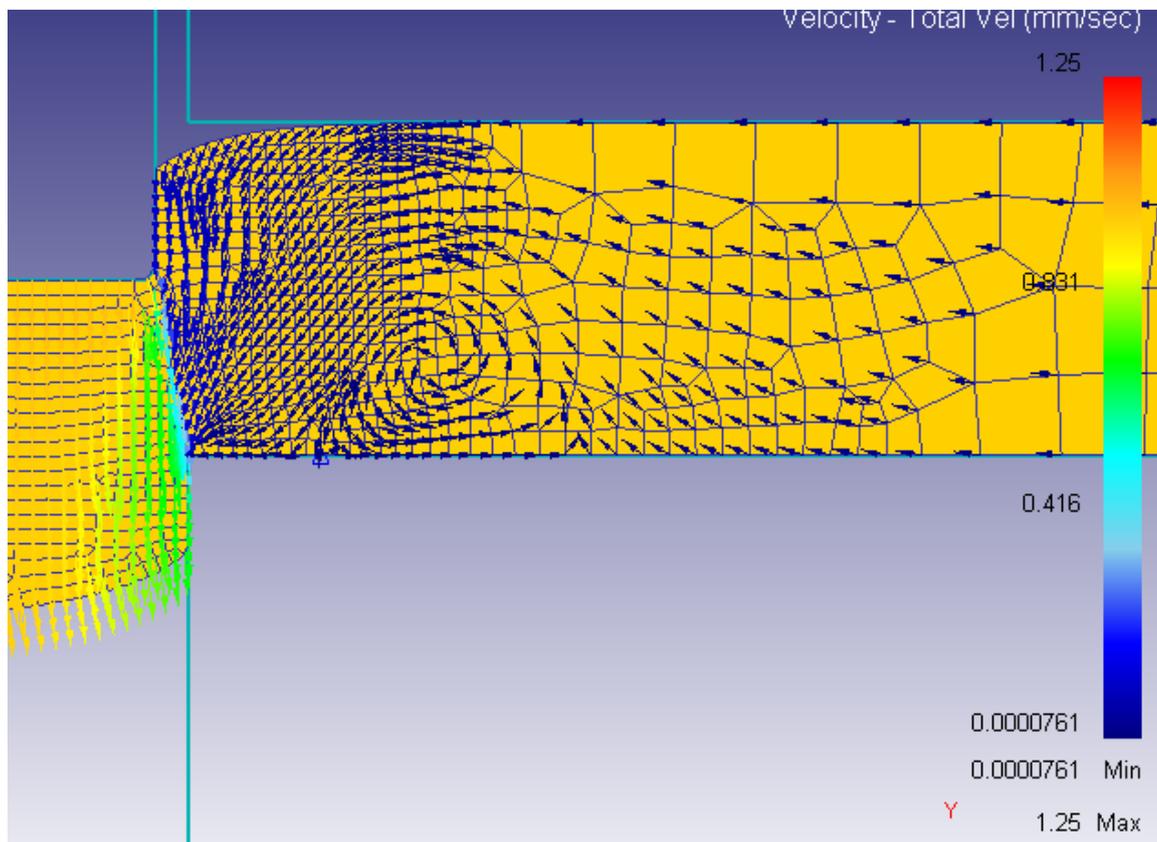


Рисунок 3.85 - Поле скоростей

На рисунках 3.86 и 3.87 показаны графики интенсивности напряжений и деформаций

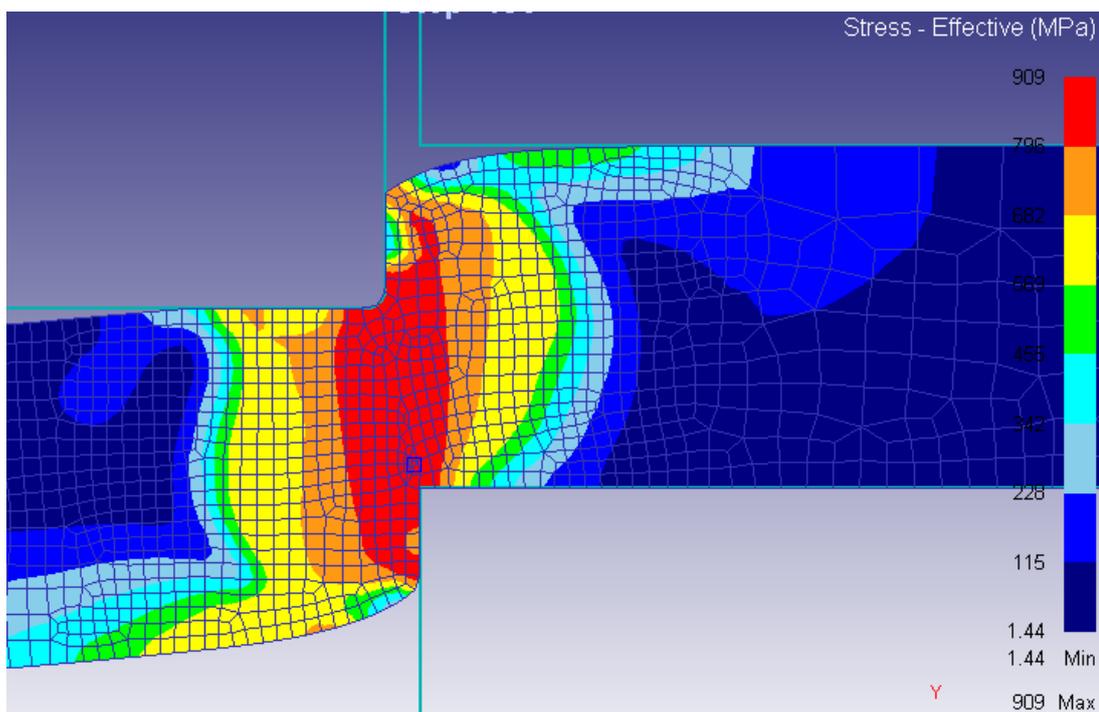


Рисунок 3.86 - Интенсивность напряжений

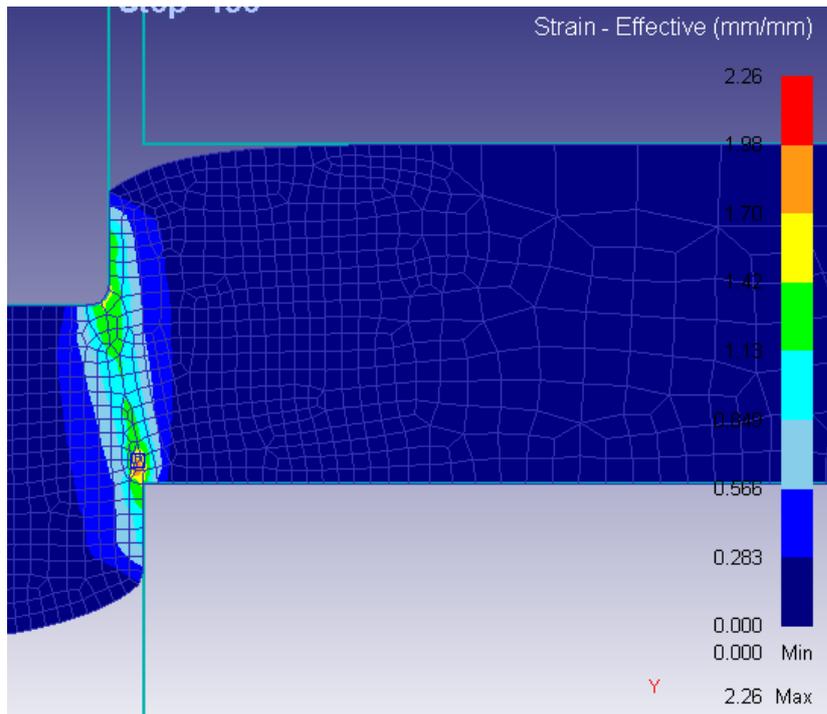


Рисунок 3.87 - Интенсивность деформаций

Заключительная стадия вырубки приведена на рисунке 3.88.

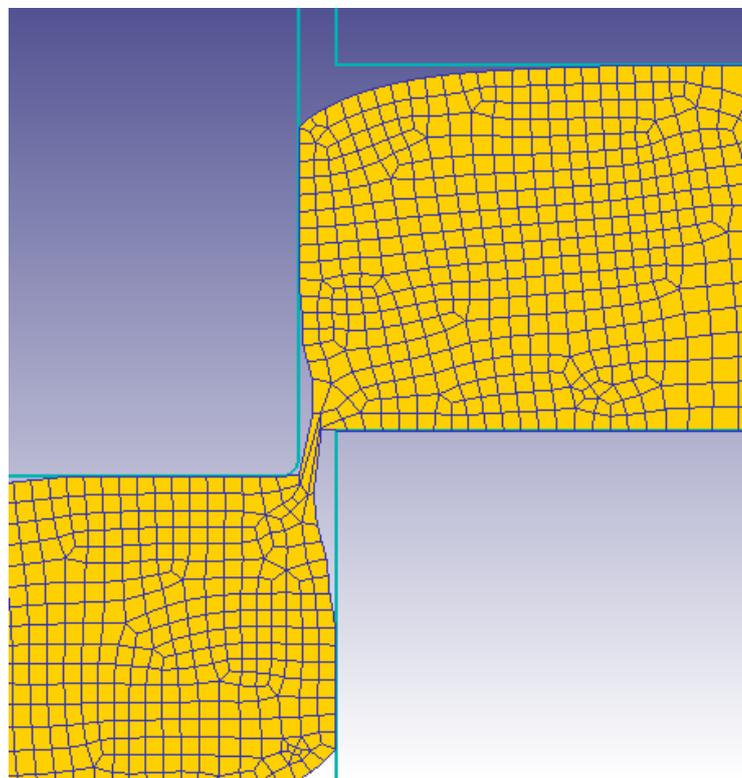


Рисунок 3.88 - Заключительная стадия вырубки

Как видно на рисунке 3.88, результат работы не удовлетворяет нашей задаче вырубки, заготовка вытягивается. Это произошло за счёт того, что мы взяли критический коэффициент нормализации ноль.

Попробуйте проделать все предыдущие действия, но критический коэффициент нормализации примите за 0.6, как показано на рисунке 3.89.

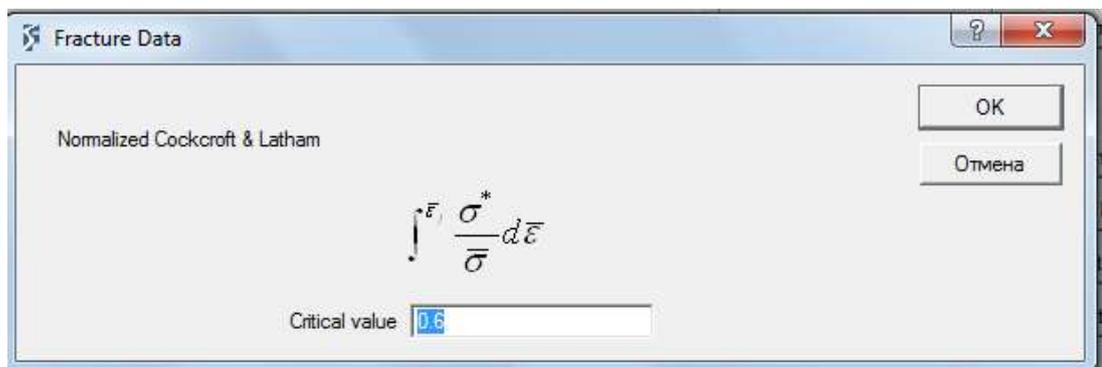


Рисунок 3.89 - Коэффициент нормализации

Сгенерировав вновь базу данных и просмотрев результаты расчёта, зайдите в постпроцессор программы и просмотрите данные. Видно, что заготовка в результате «рвётся» по границам зёрен в местах с предельным напряжением, рисунок 3.90.

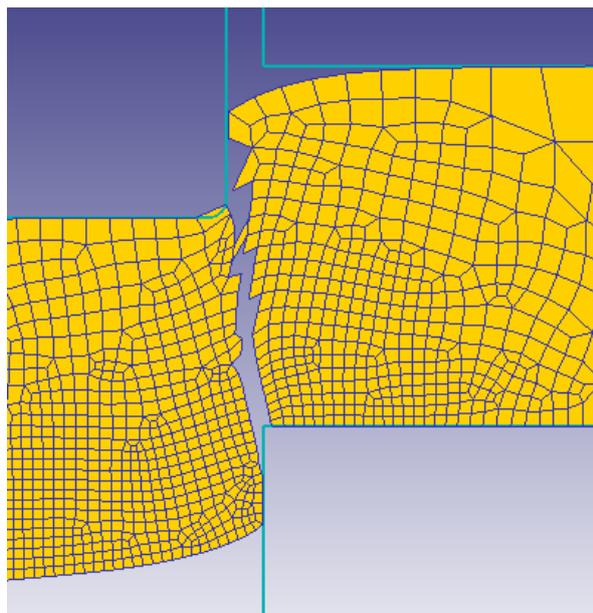


Рисунок 3.90 - Процесс вырубки на заключительной стадии

Характер изменения усилия на рисунке 3.91 говорит о резком снижении усилия вырубке на определенной глубине внедрения пуансона, это отвечает оптимальному зазору между инструментом в штампе.

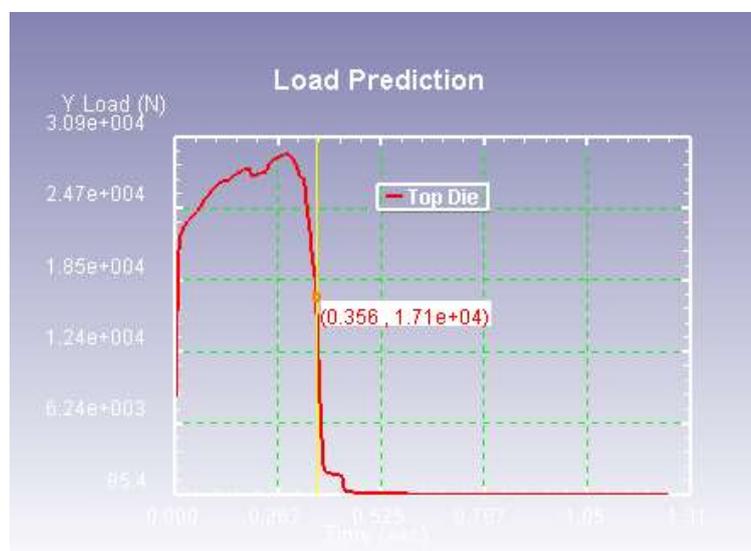


Рисунок 3.91 - Кривая усилия вырубке

Интенсивность напряжений достигает максимальных значений в зоне сдвига (рисунок 3.92).

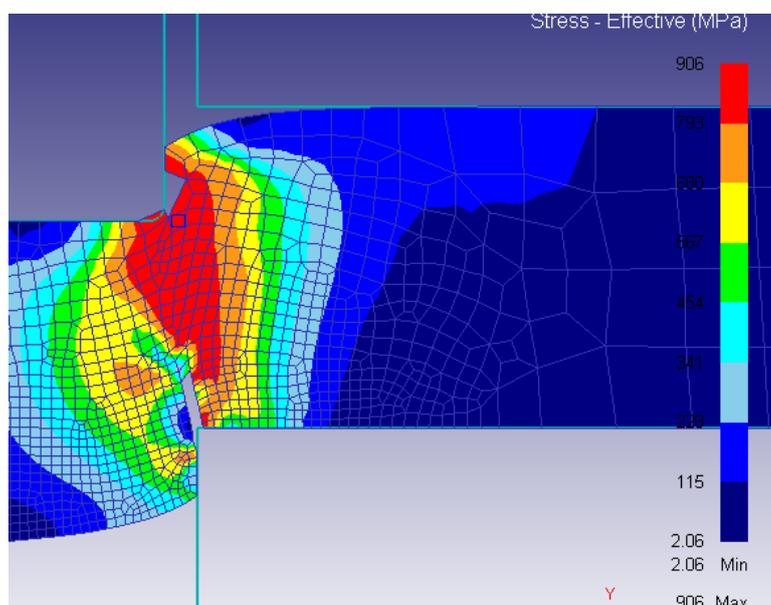


Рисунок 3.92 - Характер изменения интенсивности напряжений при вырубке

## **СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MSWord и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса вырубки и пробивки;
  - схема процесса;
  - график усилия вырубки(пробивки);
  - схема деформирования при вырубке;
4. Результаты моделирования вырубки:
  - компьютерная модель вырубки;
  - график усилия вырубки в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и касательных напряжений по стадиям вырубки;
5. Анализ полученных результатов моделирования;
6. Выводы.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Сформулируйте особенности конструкции пуансона и матрицы при вырубке (пробивке)?
2. Приведите факторы, влияющие на качество поверхности среза при вырубке и пробивке.
3. Опишите характер изменения усилия деформирования в процессах вырубки и пробивки.
4. Каким должен быть зазор между пуансоном и матрицей при вырубке и пробивке?
5. Назовите стадии процесса деформирования при вырубке и пробивке?
- 6.Какие внешние силы действуют при вырубке и пробивке?
7. Как правильно выбрать размеры сетки конечных элементов при вырубке и пробивке?

8. В каких случаях целесообразно применять прижимы при вырубке и пробивке?

9. Как сохранить геометрию объекта?

10. Какие основные параметры моделируемого процесса можно рассмотреть в постпроцессоре?

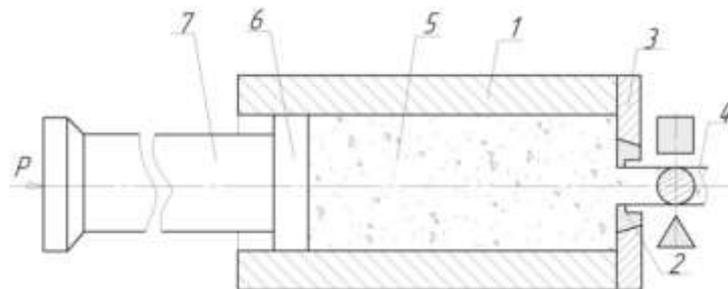
## 4 ПРЕССОВАНИЕ

### 4.1 Прессование круглого профиля

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе холодного прессования круглого профиля из алюминиевого сплава АД31 с прямым истечением и привитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса *DEFORM-2D*.

#### Краткие теоретические сведения

Прессование – это процесс обработки металлов давлением, применяемый для получения длинномерных профилей простых и сложных поперечных сечений из различных металлов и сплавов [20].



1 – контейнер, 2 – матрица, 3 – матрицедержатель, 4 – профиль,  
5 – заготовка, 6 – пресс-шайба, 7 – пресс-штемпель

Рисунок 4.1 - Схема прессования профилей

Представление о процессе прессования можно получить из рассмотрения схемы, приведенной на рисунке 4.1. Прессованием (выдавливанием, экструдированием) называется процесс истечения металла из замкнутого объема, заключенного в контейнере 1 между пресс-шайбой 6 и матрицей 2, через отверстие в матрице под действием сжимающих сил  $P$ . Форма отверстия в канале матрицы определяет форму поперечного сечения пресс-изделия 4. Заготовкой 5 является, как правило, цилиндрический слиток с диаметром чуть

меньше внутреннего диаметра контейнера. Заготовку, обычно нагретую до температуры, при которой ведется прессование, помещают в контейнер 1 гидравлического пресса, представляющей собой втулку с цилиндрической полостью. В процессе прессования контейнер подогревают, чтобы уменьшить охлаждение заготовки.

Как видно из рисунка 4.1, замкнутая полость в контейнере 1 образуется следующим образом. С одной стороны полость в контейнере замыкается матрицей 2, установленной в матрицедержателе 3. Отверстие в матрице, соответствующее сечению прессуемого профиля, называют каналом или очком. С другой стороны полость контейнера закрывают пресс-шайбой 6, предохраняющий пресс-штемпель 7 от воздействия высоких температур и давлений.

Усилие прессования  $P$  передается от пресса заготовке через пресс-штемпель и пресс-шайбу. Металл заготовки под давлением пресса заполняет полость контейнера и затем, не имея другого выхода, кроме отверстия в матрице, выдавливается из последнего в виде длинномерного пресс-изделия, называемого профилем 4.

Прессование продолжается до тех пор, пока в контейнере между пресс-шайбой и матрицей остается незначительный объем металла, называемый пресс-остатком. По окончании прессования профиль отрезают от пресс-остатка, а пресс-остаток удаляют из контейнера в отходы. После этого в контейнер загружается новая заготовка и цикл прессования повторяется. Таким образом, прессование является периодическим, циклически повторяющимся процессом.

Прессование называется с прямым истечением потому, что направление усилия прессования совпадает с направлением течения металла [26].

Наиболее распространенный процесс прямого прессования через плоскую матрицу, представленный на рисунок 1, можно условно разделить на индикаторной диаграмме, отображающей изменение усилия на пресс-шайбе в течение рабочего хода пресса, на три стадии: начальную I, основную II и заключительную III (рисунок 4.2).

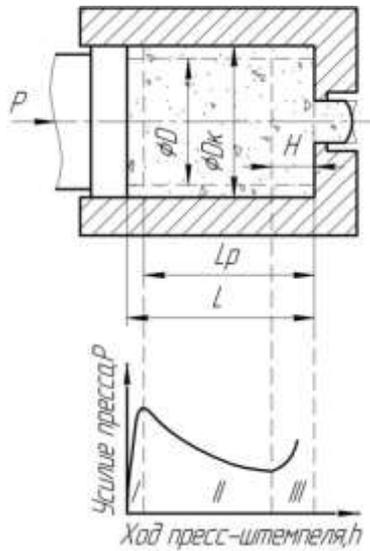


Рисунок 4.2 - Стадии прессования

Начальная стадия характеризуется интенсивным возрастанием усилия прессования  $P$ . Её часто называют распрессовкой заготовки. В связи с тем, что диаметр заготовки  $D$  меньше, чем диаметр контейнера  $D_K$ , то металл заготовки заполняет объем полости контейнера и частично выдавливается в канал матрицы. На этой стадии происходит по существу свободная осадка заготовки. По аналогии со свободной ковкой на заготовке при осадке образуется «бочка». Правда, бочкообразность ее невелика, она ограничивается стенками контейнера, а зазор между стенкой и заготовкой составляет 2-3% от диаметра контейнера.

Основная стадия – начинается с выдавливания профиля через канал матрицы, она проходит при установившемся течении металла. По мере выдавливания заготовки из контейнера и уменьшения величины поверхности контакта заготовки с контейнером усилие прессования снижается, так как снижается величина той доли усилия пресса, которая идёт на преодоление сил трения по контейнеру  $T_{кр}$  (рисунок 4.2). Эта стадия характеризуется наличием различных устойчивых объёмов внутри заготовки, в которых происходит упругие и пластические деформации (рисунок 4.3).

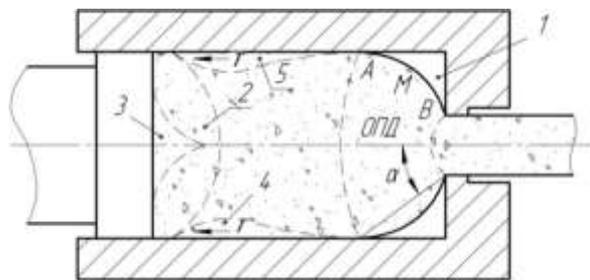


Рисунок 4.3 - Схема образования различных устойчивых объёмов внутри заготовки

Наибольшие деформации развиваются в заготовке в непосредственной близости от матрицы. Это очаг пластической деформации (ОПД). Основная часть заготовки в это время деформируется мало и может рассматриваться как упругое тело.

В металле заготовки проявляются различные упругие зоны, вызванные взаимодействием деформируемого металла и инструмента. В зоне стыка контейнера с плоской матрицей образуется упругая зона 1 (рисунок 4.3). Её иногда называют «мёртвой». Упругая зона у матрицы образует как бы неподвижную матричную воронку. Образующая зоны 1 имеет поверхность **брахистохроны** (линии АМВ).

Упругую зону 1 у матрицы невозможно выпрессовать, поэтому она идёт в отходы в виде пресс-остатка. Существование упругих зон 2 и 3 у пресс-шайбы объясняется удалённостью объёмов и их заხოложенностью (2) и симметричностью течения (3). Зона 3 проявляется в последний момент при приближении пресс-шайбы к матрице.

Течение металла у пресс-шайбы вызывает появление заторможенных объёмов 4. Эти объёмы создаются также и потому, что захоложенный тонкий слой металла 5 соскабливается в процессе прессования в более компактный объём. Образование зон 4 приводит к собиранию загрязнений с поверхности заготовки в объём у пресс-шайбы. Это позволяет при прямом прессовании получить чистую поверхность изделий.

На заключительной стадии пресс-шайба приближается к матрице (рисунок 4.4). На поверхности пресс-шайбы наблюдается интенсивное течение

металла в радиальном направлении, что и приводит к росту усилия прессования, необходимого для преодоления сил трения  $T_{ш}$  по ее поверхности. Упругая зона 2 исчезает, т.к. она начинает питать очаг пластической деформации.

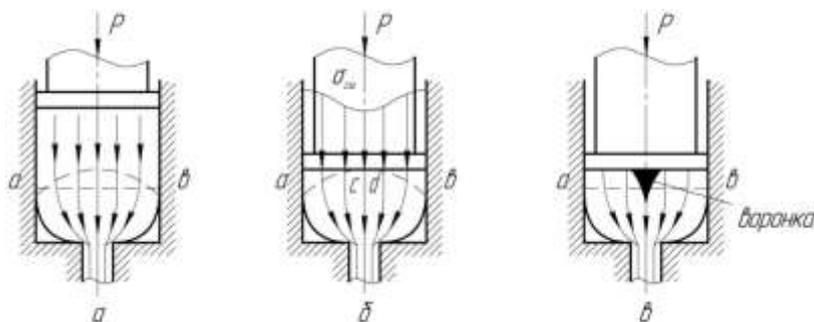


Рисунок 4.4 - Схема заключительной стадии прессования

До подхода пресс-шайбы к ОПД питание происходит по всей границе  $ab$  за счёт вышележащих слоёв (рисунок 4.4, а). После пересечения плоскостью пресс-шайбы верхней границы ОПД, на участках  $ac$  и  $db$  питание осуществляющие по-прежнему. На участке  $cd$  питание вышележащими слоями прекращается (рисунок 4.4, б). По закону наименьшего сопротивления металл периферийных слоёв устремляется к центру, за счет чего происходит восполнение недостающего объёма металла. Такое течение в какой-то промежуток времени обеспечивает целостность металла в ОПД [21].

С того момента, когда расход металла из центральных слоёв окажется больше поступления металла из периферийных слоёв начинается образование центральной воронки (полости), глубоко проникающей в очаг деформации и пресс-изделие (рисунок 4.4, в). Эту полость называют пресс-утяжиной.

Чтобы исключить образование пресс-утяжины заготовку прессуют не до конца, оставляя пресс-остаток. В пресс-остаток попадает металл, находящийся в «мёртвой» зоне, а также различные загрязнения с поверхности заготовки.

Рассмотрим типичную картину искажения координатной сетки при прямом методе прессования круглого профиля через плоскую матрицу на основной стадии процесса. Заготовка предварительно разрезается на два

полуцилиндра. На плоскость реза одного из полуцилиндров наносят координатную сетку. Затем части заготовки составляют вместе по поверхности разъёма, предварительно покрытого, например, машинным маслом для предотвращения сварки и подвергают прессованию как цельное металлическое тело. После прессования заготовка вновь разнимается, и по ней судят о характере течения металла (рисунок 4.5).

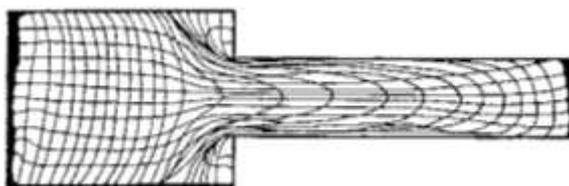


Рисунок 5. Схема искажения координатной сетки при прямом прессовании через плоскую матрицу

По искажениям координатной сетки видно, что:

1. Все прямые продольные линии до прессования остаются прямыми после прессования за исключением переднего конца прутка.
2. Все продольные линии претерпевают изгибы у входа в ОПД и у выхода из него. Изгибы линий определяют торцевые границы ОПД. Изгибы направлены во взаимно-противоположные стороны, что свидетельствует о немонотонности деформации. Немонотонность деформации уменьшается от периферии к центру.
3. Все поперечные линии начальной координатной сетки симметрично изгибаются выпуклостью в направлении движения прессуемого металла. Это указывает на большое отставание периферийных слоев от центральных. Отставание объясняется действием силы трения, формой канала матрицы и т.д.
4. На переднем конце прутка имеют место незначительные деформации. Причина – передний конец расположен напротив отверстия в матрице и не претерпевает тех изменений, которым подвергается основная масса заготовки. Поэтому передний конец прутка удаляют в отход.

5. Все осевые квадраты превращаются в фигуры близкие к прямоугольникам, а все периферийные квадраты – к сильно вытянутым параллелограммам, что указывает на нарастание сдвиговых деформаций от центра к периферии.

6. Изменение ранее прямых продольных и поперечных линий указывает на большую неравномерность деформаций не только по длине прутка, но и по сечению [56].

Основной вид напряженного состояния заготовки в главных осях – трехосное сжатие с напряжениями, радиальным  $\sigma'_R$ , направленным к оси прессования, тангенциальным  $\sigma'_\theta$ , направленным по касательной к центральной окружности, проходящей через рассматриваемую точку и осевым напряжением  $\sigma'_z$ , направленным вдоль оси прессования. За счет напряжений металл выдавливается через матрицу, получая в поперечном сечении заготовки две главные деформации укорочения  $\epsilon'_R$  и  $\epsilon'_\theta$  и одну главную деформацию удлинения  $\epsilon'_z$  в направлении оси прессования (рисунок 4.6).

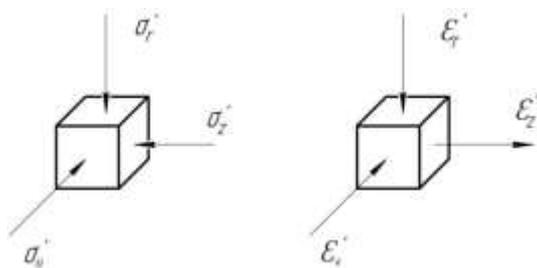


Рисунок 4.6. Схемы главных напряжений и деформаций при прессовании

На некоторых участках заготовки при прессовании могут возникнуть осевые растягивающие напряжения. В ОПД внутренние слои двигаются быстрее периферийных. В результате появляются дополнительные напряжения: в периферийных слоях растягивающие, т.к. каждый внутренний слой, двигаясь быстрее соседнего внешнего, увлекает его за собой, а во внутренних – сжимающие, так как каждый внешний слой сдерживает движение соседнего внутреннего. Вследствие стремления к выравниванию напряжений возникает зона наружных слоев с дополнительными осевыми напряжениями растяжения,

уменьшающимися по направлению от периферии к оси, и зона внутренних слоев с дополнительными осевыми напряжениями сжатия, увеличивающимися к оси.

В зоне внутренних слоев дополнительные напряжения сжатия, налагаясь на основные напряжения сжатия, не изменяют вида напряженного состояния металла: всестороннего неравномерного сжатия. В зоне наружных слоев дополнительные напряжения растяжения, налагаясь на основные осевые напряжения сжатия, уменьшают их, а при некоторых условиях, становятся больше основных осевых напряжений сжатия, изменяют вид напряженного состояния металла и переводят всестороннее неравномерное сжатие в двухстороннее (поперечное) сжатие и продольное растяжение. Зона с растягивающими напряжениями находится ближе к выходу из ОПД, т.к. по направлению к выходу основные напряжения падают, а дополнительные возрастают [54].

При прессовании напряженно-деформированное состояние на основной стадии в любой точке деформируемой заготовки в цилиндрической системе координат  $(R, \theta, Z)$  описывается симметричными тензорами напряжений и деформаций:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_R & \tau_{R\theta} & \tau_{RZ} \\ \tau_{\theta R} & \sigma_{\theta} & \tau_{\theta Z} \\ \tau_{ZR} & \tau_{Z\theta} & \sigma_Z \end{pmatrix}, T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_R & \frac{1}{2}\gamma_{R\theta} & \frac{1}{2}\gamma_{RZ} \\ \frac{1}{2}\gamma_{\theta R} & \varepsilon_{\theta} & \frac{1}{2}\gamma_{\theta Z} \\ \frac{1}{2}\gamma_{ZR} & \frac{1}{2}\gamma_{Z\theta} & \varepsilon_Z \end{pmatrix},$$

где  $\sigma_R, \sigma_{\theta}, \sigma_Z$  – радиальное, тангенциальное и осевое нормальные напряжения соответственно;

$\tau_{RZ}, \tau_{R\theta}, \tau_{Z\theta}$  – касательные напряжения;

$\varepsilon_R, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_Z$  – радиальная, тангенциальная и осевая деформации;

$\gamma_{RZ}, \gamma_{R\theta}, \gamma_{Z\theta}$  – сдвиговые деформации.

Интегральными характеристиками напряженно-деформированного состояния в рассматриваемой точке деформируемой заготовки являются:

- 1) интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_R - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_R)^2 + 6(\tau_{R\theta}^2 + \tau_{\theta Z}^2 + \tau_{ZR}^2)};$$

2) интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_Z)^2 + (\varepsilon_Z - \varepsilon_R)^2 + 6(\gamma_{R\theta}^2 + \gamma_{\theta Z}^2 + \gamma_{ZR}^2)};$$

По этим характеристикам можно определить зоны интенсивной и затрудненной пластической деформации.

При прессовании круглого профиля во всех участках деформируемой заготовки, кроме ОПД, тангенциальные и радиальные главные деформации практически равны. Это определяет приближенное равенство тангенциальных и радиальных главных нормальных напряжений  $\sigma'_\theta \approx \sigma'_R$ . В соответствии с законом наименьшего сопротивления на всех участках прессуемого объема, кроме ОПД:  $|\sigma'_Z| > |\sigma'_R|$ ; а в ОПД, не считая зоны с растягивающими осевыми напряжениями:  $|\sigma'_Z| \leq |\sigma'_R|$ . Таким образом, главное осевое напряжение  $\sigma'_Z$  убывает по направлению от пресс-шайбы к входу в ОПД и дальше к выходу из него. Соответственно убывает тангенциальное  $\sigma'_\theta$  и радиальное  $\sigma'_R$  главные нормальные напряжения [55].

Как видно из рисунка 4.4, б, эпюра осевых нормальных напряжений  $\sigma_{Zш}$  на пресс-шайбе показывает уменьшение этих напряжений к оси прессования, что согласуется одним из основных законов теории обработки металлов давлением о течении металла в направлении наименьшего сопротивления к каналу матрицы.

Перед другими видами обработки металлов давлением прессование имеет следующие преимущества:

1) обеспечивает наибольшую пластичность деформируемого металла, поэтому прессованием можно формоизменять малопластичные металлы, например, чугун;

2) позволяет за один переход получить профили сложной формы поперечного сечения;

3) обеспечивает высокую точность размеров профиля, так как упругие деформации инструмента, ничтожны малы;

4) легко осуществляется переход с одного профиля на другой путем замены матрицы;

5) позволяет деформировать заготовки с высокой степенью деформации за проход.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D*, указав левой кнопкой мыши (ЛКМ) последовательно **Пуск** → **Программы** → *DEFORM-2D*. Будет вызвано **Главное окно** *DEFORM-2D*, показанное на рисунке 4.7.

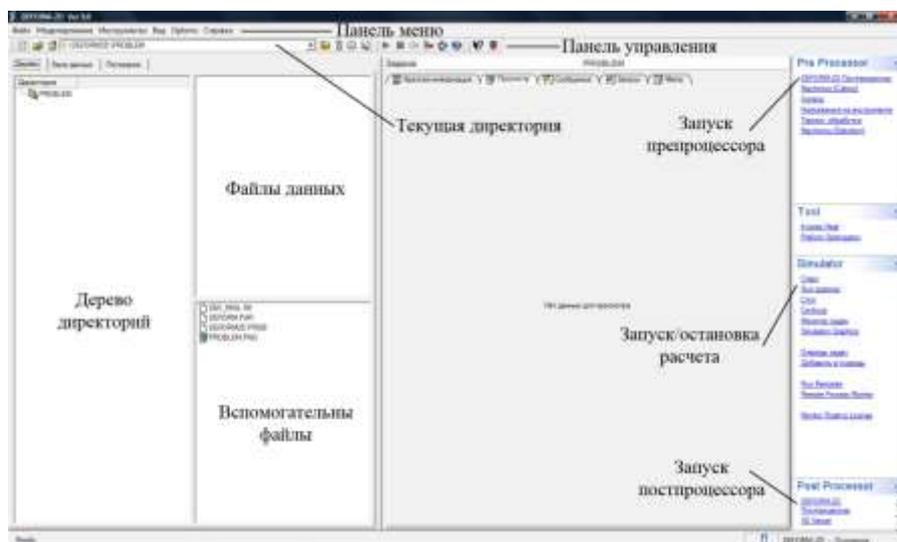


Рисунок 4.7 - Главное окно *DEFORM-2D*

Рассмотрите расположение панелей и кнопок. В верхней части окна находится **Панель меню**, содержащая меню: **Файл**, **Моделирование**, **Инструменты**, **Вид**, **Настройки**, **Справка**. Рассмотрим наиболее часто используемые команды меню – **Файл** и **Моделирование**.

Меню **Файл** содержит команды, используемые для создания новых задач, и перемещения между директориями каталога операционной системы. Команда **Новая задача**  позволяет создать новую задачу и запустить препроцессор, позволяющий задавать исходные данные. Команда **Выход**  позволяет выйти

из программы.

Меню **Моделирование** необходимо для запуска задачи на расчет и управления задачами в ходе расчета. Для запуска задачи на расчет и аварийной остановки расчета используются команды **Старт**  и **Стоп** , вынесенные на **Панель управления**, расположенную непосредственно под **Панелью меню**.

В левой части экрана в **Главном окне** расположено **Дерево директорий**, которое отражает текущее расположение задачи по отношению к **Дереву каталогов**. В активной строке **Текущая директория** указана директория (папка) являющаяся корневой в окне **Дерево директорий**.

Создайте новую задачу, выбрав из меню **Файл** пункт **Новая задача** или нажав кнопку  на **Панели управления**. Появится окно **Параметры задачи**, в котором необходимо определить особенности моделируемого процесса. Не указывая тип решаемой задачи, нажмите кнопку **Next**, для того чтобы запустить препроцессор (тип задачи можно определить в препроцессоре).

В следующем окне снова нажмите на кнопку **Next**, приняв, что задача создается в «домашней» директории (по умолчанию это директория «*PROBLEM*», расположенная в папке «*DEFORM-2D*»).

В появившемся окне необходимо указать название задачи. Название задачи должно быть набрано английскими литерами без пробелов. Дайте название задачи, набрав *PRESSOVANIE*.

Нажмите кнопку **Finish**, произойдет запуск препроцессора *DEFORM-2D*. Его интерфейс состоит из нескольких частей (рисунок 4.8), а именно: **Окно-дисплей** (*Display window*), **Дерево Объекта** (*Object Tree*) и **Данные объекта** (*Object Data*). Также вверху экрана находится **Панель меню** и **Панель управления**, содержащие ряд кнопок. Наиболее часто используемые кнопки, расположенные на **Панели управления** представлены в приложении А.

Нажмите кнопку **Simulation controls**  (настройки задачи), появится окно **Simulation controls**, в котором по умолчанию будет активна закладка

**Основное**  (рисунок 4.9). Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» (напротив надписи «СИ» должен стоять

флажок) и выбран режим расчета деформаций (галочка напротив надписи «Деформирование»), а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (флажок напротив «Осесимметричная»). Для завершения работы с окном **Настройки задачи** нажмите кнопку **ОК**.

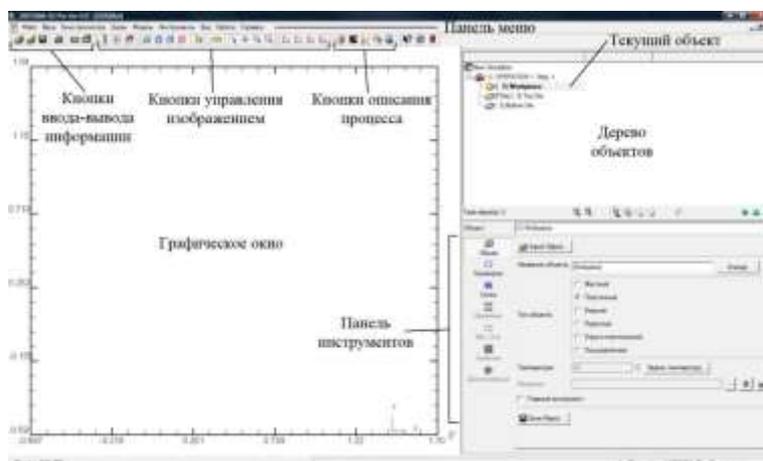


Рисунок 4.8 - Интерфейс препроцессора

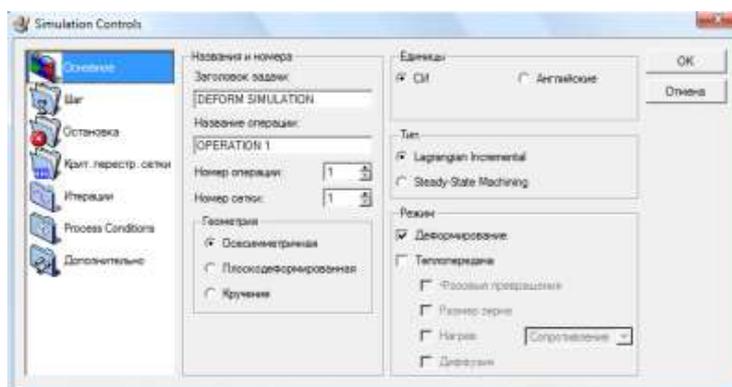


Рисунок 4.9 - Окно **Настройки задачи**

Обратите внимание на то, что в **Дереве объектов** после создания задачи был создан всего один исходный объект, а именно *Workpiece* (заготовка). Этот объект выделен в **Дереве объектов**, а на **Панели инструментов** активен пункт **Общее** (рисунок 4.10).



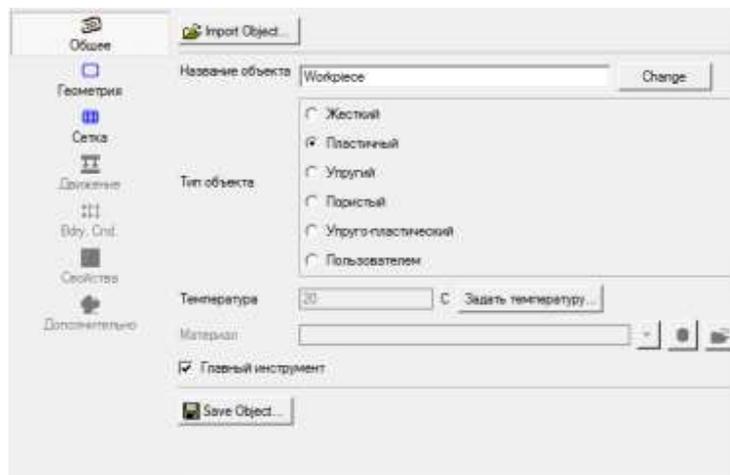


Рисунок 4.10 - Пункт **Общее** из **Панели инструментов**

Пункт **Общее** позволяет:

- 1) выбрать тип объекта участвующего в расчете (жесткий, упругий, пластичный, пористый и упруго-пластичный);
- 2) выбрать марку материала из библиотеки;
- 3) указать исходную температуру объекта;
- 4) сохранять в отдельном файле и импортировать объект из задач, которые решались ранее.

Все типы объектов используемые в *DEFORM-2D* кроме жесткого объекта, должны иметь сетку конечных элементов.

Непосредственно под пунктом **Общее** на **Панели инструментов** располагается пункт **Геометрия**  **Геометрия**, позволяющий работать с геометрией моделируемых объектов.

### Построение модели заготовки

По умолчанию при создании новой задачи программа сама создает в **Дереве объектов** один объект – заготовку. Геометрия объектов может быть получена построением по точкам, с помощью геометрических примитивов или импортирована из «*dxf*» и «*igs*» файлов.

Пункт **Геометрия** содержит четыре закладки (рисунок 4.11). Наиболее часто используемые кнопки пункта **Геометрия** представлены в приложении Б. По

умолчанию осуществляется переход на закладку **Инструмент**, которая позволяет импортировать геометрию объекта из других программ, создавать геометрию с помощью примитивов, сохранять уже имеющуюся геометрию и т.д. Для создания и редактирования геометрии с помощью средств *DEFORM-2D* служит закладка **Edit** (редактирование), содержащая **Поле ввода геометрии** (пустая табличка) и вспомогательные кнопки. Построение геометрии может осуществляться по точкам (*XYR*) или с помощью отрезков-дуг (*Line-Arc*).

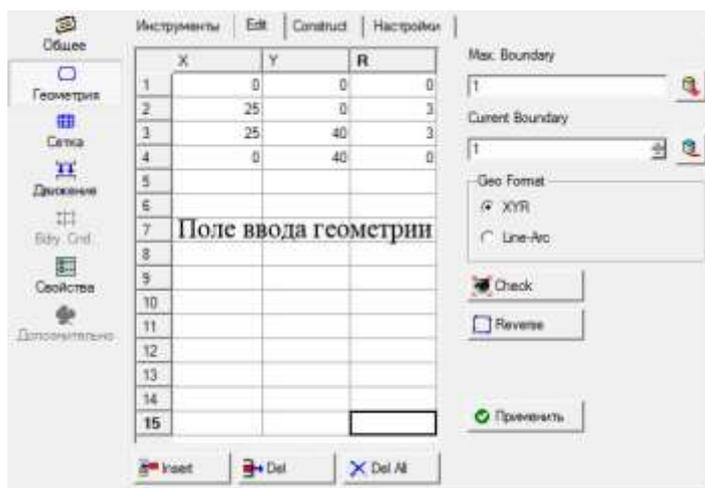


Рисунок 4.11 - Пункт **Геометрия** из **Панели инструментов**

Так как исходная заготовка диаметром 80 мм и высотой 25 мм осесимметричная, то для моделирования достаточно рассмотреть ее правую часть.

Перейдите к закладке **Edit** (рисунок 4.11). Нажмите ЛКМ на верхнюю левую ячейку **Поля ввода геометрии**, после чего последовательно введите значения, представленные в таблице 4.1. После ввода очередного значения, соответствующего данной ячейке, нажимайте на клавишу *Enter*, для перехода к следующей ячейке. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить**  Применить.

Разделение десятых долей осуществляется с помощью точки. При правильном вводе информации, введенные ранее значения должны выравниваться по правому краю ячейки.

Таблица 4.1 - Координаты точек для построения заготовки

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	25	0	3
3	25	40	3
4	0	40	0

Нажмите кнопку **Во весь экран**  на **Панели управления** для автоматического масштабирования изображения (функция этой команды будет объяснена ниже).

Рассмотрите полученную геометрию цилиндрической заготовки. Обратите внимание на то, что с внутренней стороны поверхности располагается серая полоса, которая показывает направление обхода от начальной точки к конечной против часовой стрелки (определяет внутреннюю область объекта). Если серая полоса располагается с внешней стороны, то необходимо изменить направление обхода, нажав на кнопку **Reverse**  (разворот). Если серую полосу не видно, то необходимо выбрать ЛКМ пункт **Общее** затем выбрать ЛКМ пункт **Геометрия**.

После того как геометрия построена, ее желательно проверить. Нажмите кнопку **Check**  (проверить), а затем в появившемся окне (рисунок 4.12) нажмите на кнопку **Check&Correct Geometry** (проверить и исправить геометрию). Должно появиться сообщение «*Geometry is legal*», которое сообщает о том, что геометрия была построена верно. Для возвращения к пункту **Геометрия** нажмите ЛКМ клавишу **ОК** и еще раз **ОК**.

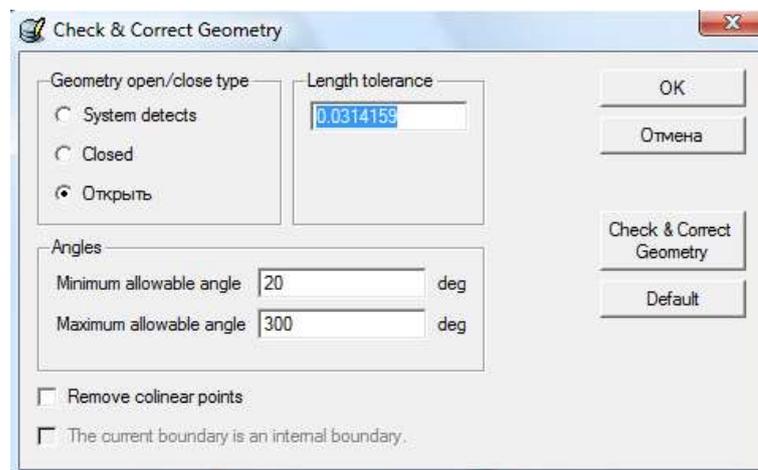


Рисунок 4.12 - Окно **Check&Correct Geometry**

Вызовите для редактирования заготовку (укажите ЛКМ в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece*) и убедитесь в том, что в пункте **Общее** стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка**  **Сетка**, задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**. Обратите внимание на то, что после редактирования сетки конечных элементов напротив надписи *Workpiece* в **Дереве объектов** появилась надпись «*undefined*». Значок  (*undefined*) означает, что необходимо присвоить материал заготовке (определить свойства материала заготовки).

Перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library**  (загрузить материал из библиотеки), расположенную в строке **Материал**. Появится окно **Material Library** (библиотека материалов), в котором выберите группу материалов «*Aluminum*» (алюминиевые сплавы) и марку сплава «*Al-1100, COLD[70F(20C)]*», после этого нажмите ЛКМ на кнопку **Загрузить**. Обратите внимание на то, что вместо надписи «*undefined*» в **Дереве объектов** появилось название марки материала.

Просмотреть и отредактировать свойства выбранного материала можно, нажав на кнопку **Материал**  на **Панели управления**. Появится окно **Материал**, в котором на соответствующих закладках заданы все свойства

материала. Например, нажав на кнопку  в строке **Flow Stress** (напряжение течения) на закладке **Пластичный**, можно просмотреть и отредактировать диаграмму «напряжение-деформация» (рисунок 4.13).

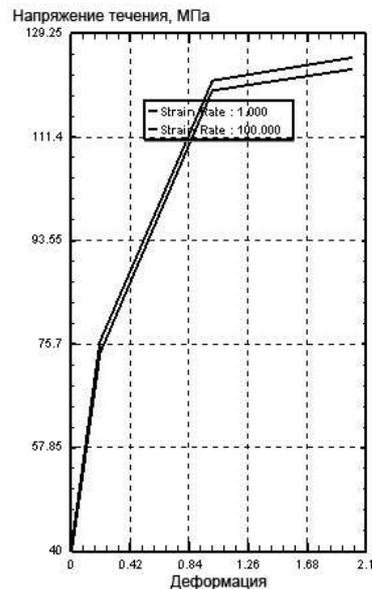


Рисунок 4.13 - Диаграмма "напряжение - деформация" сплава AL 1100

### Построение геометрии инструмента

Для добавления в решаемую задачу дополнительного объекта (инструмента) воспользуйтесь кнопкой **Добавить объект** , которая находится под **Деревом объектов**. После добавления объекта в **Дереве объектов** появится объект *Top Die* (верхний инструмент – пресс-шайба). Добавьте по аналогии с предыдущим пунктом объект *Bottom Die* (нижний инструмент – контейнер, совмещенный с матрицей). Инструмент моделируют недеформируемым (тип объекта «Жесткий» в пункте **Общее**).

Каждый из объектов, созданных в программе, обладает набором индивидуальных свойств. В рассматриваемой нами задаче геометрия верхнего и нижнего объекта будет различной. Для задания геометрии тому или иному объекту необходимо выделить его щелчком ЛКМ в **Дереве объектов**, после чего система будет присваивать свойства (геометрию) именно этому объекту.

По аналогии с заготовкой создайте геометрию контейнера, совмещенного

с матрицей (*BottomDie*), и геометрию пресс-шайбы (*TopDie*) по значениям, представленные в таблицах 4.2 и 4.3 соответственно.

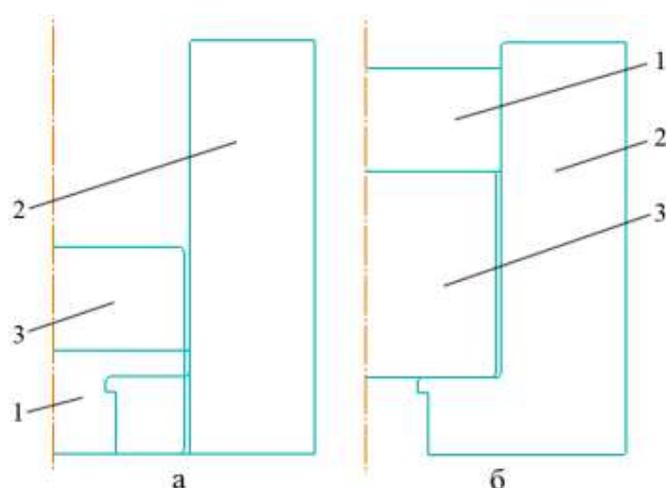
Таблица 4.2 -  
Координаты для  
построения контейнера,  
совмещенного с  
матрицей

№	X	Y	R
1	12	0	0
2	50	0	0
3	50	80	0
4	26	80	1
5	26	15	1
6	10	15	1
7	10	12	0
8	12	12	0
9	12	0	0

Таблица 4.3 -  
Координаты точек для  
построения пресс-  
шайбы

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	26	0	0
3	26	20	0
4	0	20	0

Конечная геометрия заготовки, пресс-шайбы и контейнера, совмещенного с матрицей, изображена на рисунке 4.14, а.



1 – пресс-шайба; 2 – контейнер, совмещенный с матрицей; 3 – заготовка

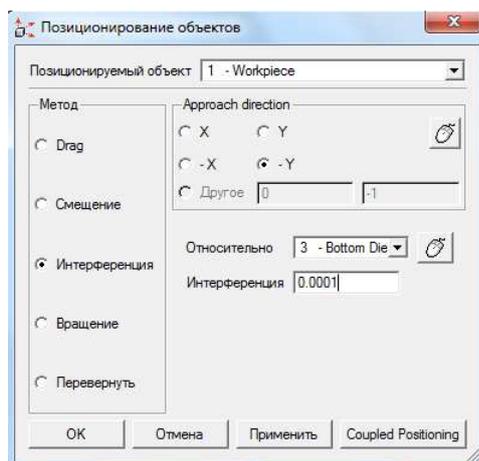
Рисунок 4.14 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а)

и позиционирования (б)

## Позиционирование объектов

Для расположения объектов по отношению друг к другу необходимо воспользоваться пунктом **Object positioning** (позиционирование объектов), который располагается на **Панели управления**. Описание команд данного пункта приведено в приложении В.

Для наиболее точного и быстрого расположения объектов так, как это показано на рисунке 4.14, б, воспользуйтесь командой **Интерференция** окна **Позиционирование объектов**. Для использования команды необходимо установить флажок напротив надписи «Интерференция» (рисунок 4.15). Затем нужно выбрать позиционируемый объект и объект, относительно которого будут размещены другие объекты.



Рисунке 4.15 - Окно **Позиционирование объектов**

Определите объект, который будет размещаться или позиционироваться, нажатием ЛКМ на треугольник  в строке **Позиционируемый объект** и выберите *Workpiece*. В строке **Относительно**, с помощью меню вызываемого нажатием ЛКМ на треугольнике , выберите объект *Bottom Die* (рисунок 4.15).

Далее необходимо определить часть позиционируемого объекта, которая касается объекта, относительно которого осуществляется позиционирование (часть *Workpiece*, которая касается *Bottom Die*). Поскольку заготовка *Workpiece* касается контейнера *Bottom Die* своей нижней частью, то необходимо поставить флажок напротив надписи «-Y» в блоке **Approach direction** (направление

сближения). Нажмите ЛКМ кнопку **Применить**. Произошло расположение объектов, нажмите ЛКМ на кнопку **ОК**.

По аналогии с заготовкой осуществите позиционирование пресс-шайбы *TopDie*. За направление сближения также выберите «-Y» в блоке **Approach direction**, в качестве позиционируемого объекта – *Top Die*, а в качестве объекта, относительно которого производится позиционирование – *Workpiece*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунке 4.14, б.

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  (взаимодействие объектов), расположенную на **Панели управления**, и на запрос системы о необходимости создания контактных пар, в появившемся окне ответьте положительно (нажмите кнопку **Yes**).

Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 4.16). В *DEFORM-2D* контактные пары, определяются относительно главного (обычно «жесткий», недеформируемый инструмент) и подчинённого объектов (пластически деформируемый объект, например, заготовка).

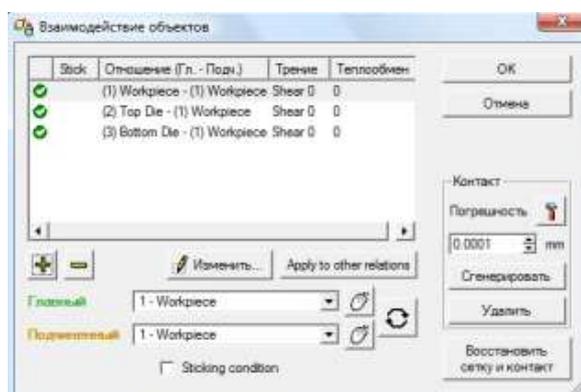
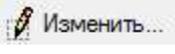


Рисунок 4.16 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

В окне **Взаимодействие объектов** (рисунок 4.16) нажмите кнопку

**Изменить**  , в появившемся окне поставьте флажок напротив надписи «*Constant Tau*» (закон трения по Зибелю) и укажите коэффициент трения равный 0,12 (рисунок 4.17). Нажмите кнопку **Заккрыть** в окне **Inter-Object Data Definition** (определение свойств взаимодействия объектов). Нажмите на кнопку **Apply to other relations** (применить к другим парам) для того, чтобы назначить условия взаимодействия объектов всем контактными парам.

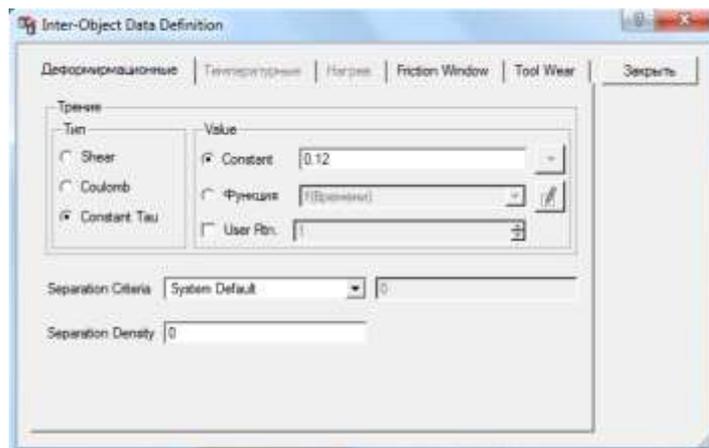


Рисунок 4.17 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Для генерации величины точности, с которой компьютер может создать контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность**  , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта, при этом в окне **Display** появится изображение мест контакта (разноцветные точки в местах взаимодействия объектов, рисунок 4.18). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

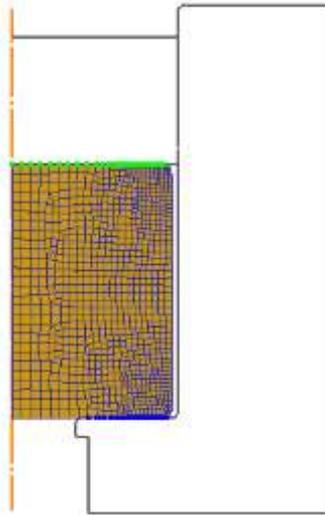


Рисунок 4.18 - Контактные поверхности между заготовкой, пресс-шайбой и контейнером

### Задание движения верхнего инструмента

В программе *DEFORM-2D* двигаться может любой объект, причём нет ограничений по количеству двигающихся объектов. Двигаться объекты могут как под действием приложенного усилия (т.е. двигаться с определённым усилием), так и с заданной скоростью.

По умолчанию все объекты являются неподвижными, т.к. приложенные к ним усилие и скорость равны нулю. Однако, если рассматривается процесс деформирования, то обязательно необходимо определить перемещение главного инструмента. Главным инструментом называется инструмент, под непосредственным перемещением которого осуществляется деформация заготовки.

В рассматриваемой нами задаче главным инструментом является *Top Die*, о чём свидетельствует значок «*PDie*», расположенный перед значком *Top Die* в **Дереве объектов**. При необходимости сделать главным инструментом можно любой объект с помощью постановки галочки в пункте **Главный инструмент** на закладке **Общее**.

Сделайте активным верхний инструмент *Top Die* (пресс-шайба) для задания характеристики приложенного к верхнему инструменту движения (укажите *Top Die* в **Дереве объектов**).

Нажмите кнопку **Движение**  на **Панели инструментов**. Убедитесь, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в активное окно, расположенное в самом низу, 1 мм/с (рисунок 4.19).

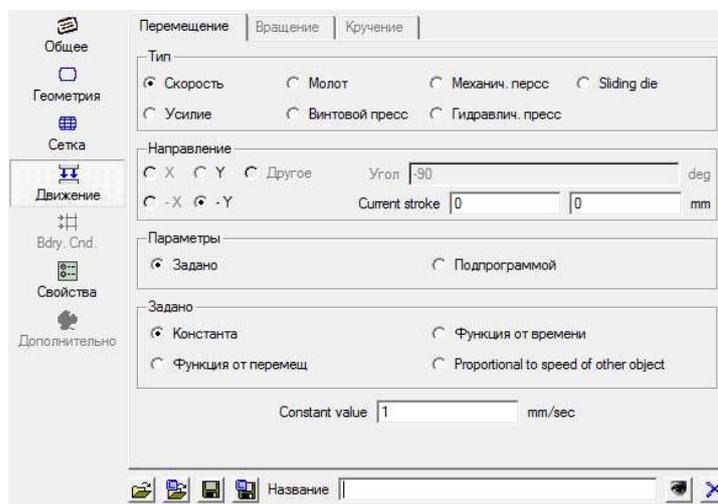


Рисунок 4.19 - Пункт **Движение** из **Панели инструментов**

В соответствии с заданными условиями нагружения пресс-шайба будет перемещаться вниз (-Y) с постоянной скоростью 1 мм/с.

### Задание числа шагов расчета

Задание шага решения задачи может быть ограничено по времени и по перемещению главного инструмента. Для определения величины шага по перемещению необходимо произвести замер наименьшего размера сетки конечных элементов заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , расположенных на **Панели управления**, и данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  на **Панели управления** и в появившемся окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг**. Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 4.20).

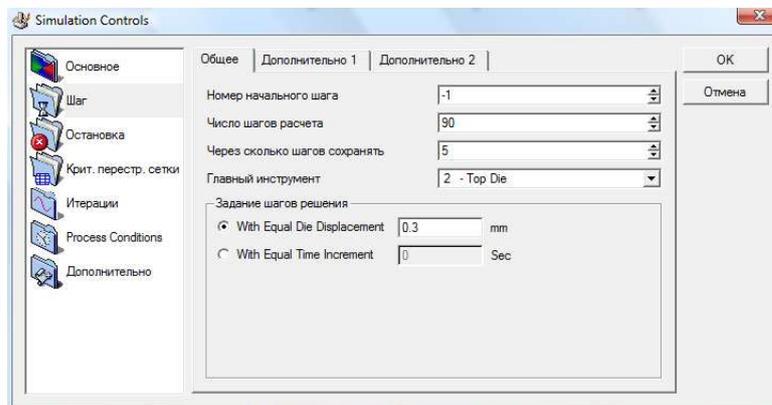


Рисунок 4.20 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Для того, что бы задать число шагов расчета необходимо перемещение главного инструмента разделить на размер шага и полученное значение, округленное до целого в большую сторону, внести в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 4.15).

При прессовании перемещение главного инструмента определяется величиной пресс-остатка. Примем число шагов расчета равным 90, что соответствует высоте пресс-остатка 13 мм при величине шага 0,3 мм.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation**  (генерация базы данных), расположенную на **Панели управления**. В появившемся окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Проверить**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки заданных данных появится сообщение «База данных может быть сгенерирована» (рисунок 4.21, а). Нажмите ЛКМ кнопку **Заккрыть** для выхода из окна **Генерация базы данных**.

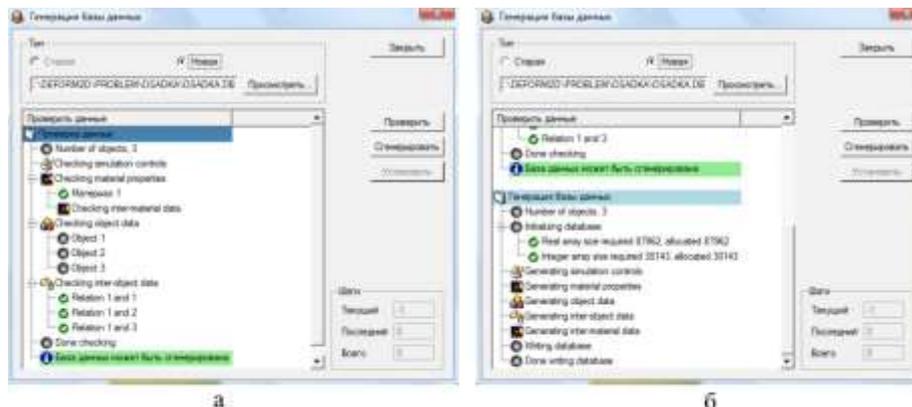


Рисунок 4.21. Окно **Генерация базы данных**

после проверки исходных данных (а) и создания базы данных (б)

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**. Выйдите из препроцессора, нажав ЛКМ на кнопку **Выход** .

Обратите внимание на то, что работа осуществлялась только с файлом с расширением «*key*». Название файла будет соответствовать тому названию, которое Вы давали задаче при ее создании. В нашем случае файл назван «[PRESSOVANIE.KEY](#)».

Откройте в препроцессоре решаемую ранее задачу. Для этого нужно в правой верхней части экрана в пункте **Pre Processor** нажать на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор» (при локализации программного комплекса допущена ошибка в переводе). Произойдет запуск препроцессора.

Нажмите кнопку **Data base generation** . В появившемся окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**, в поле создания базы данных появится сообщение «Запись базы данных завершена», свидетельствующее о том, что база данных была успешно создана (рисунок 4.21, б).

Выйдете из препроцессора, нажав ЛКМ на кнопку **Выход** , и убедитесь в том, что рядом с файлом с расширением «*key*» появился файл с расширением «*db*».

## Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** нажмите кнопку **Старт** или кнопку  на **Панели управления**. В появившемся окне с сообщением «*The simulation has been submitted*» нажмите ЛКМ на кнопку **ОК**.

Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных (файл с расширением «*db*») скрыт зелёной полосой с красной надписью **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается. Прежде чем перейти к следующему пункту работы, дождитесь, пока расчет закончится, т.е. исчезнет зелёная полоска и надпись **Running**.

В случае больших деформаций происходит сильное искажение сетки конечных элементов, что приводит к снижению точности моделирования. Поэтому при определенной степени искаженности, *DEFORM-2D* автоматически производит перестроение конечно-элементной сетки, о чем сообщает смена надписи **Running** на **Remeshing**.

## Анализ результатов моделирования

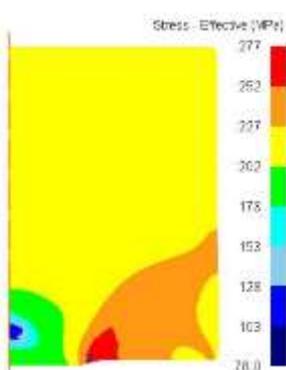
Для вывода информации полученной в ходе моделирования используется постпроцессор. Что бы открыть решаемую задачу в постпроцессоре нажмите ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

После загрузки задачи в постпроцессоре с помощью кнопок, представленных в приложении Г и Д, проведите анализ полученных результатов моделирования.

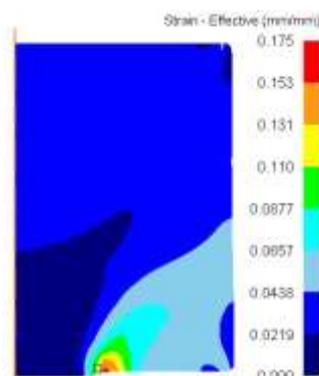
Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния по стадиям процесса прессования (рисунок 4.22). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку **Параметры**  на **Панели управления**, затем в окне **Параметры** в дереве переменных выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*») (рисунок 4.23). В разделе **Экран** установите флажок напротив надписи «*Solid*» (сплошной), а в разделе **Scaling** установите флажок напротив надписи

«Local». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

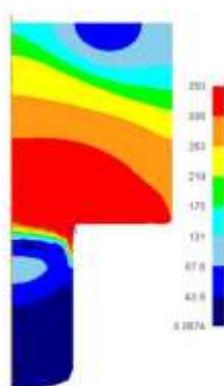
Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** , расположенных на **Панели управления**.



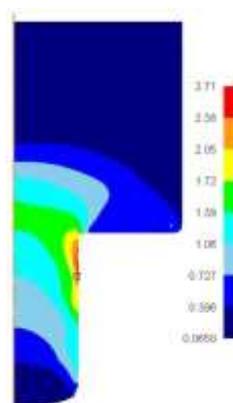
а



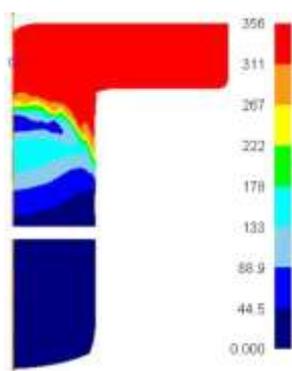
б



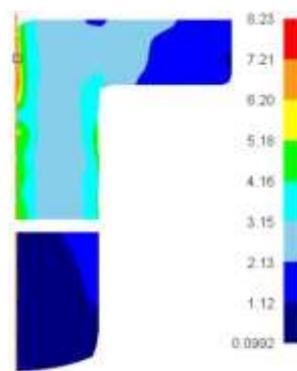
в



г



д



е

по стадиям прессования: а, б – распрессовка;

в, г – установившийся процесс; д, е – образование пресс-утяжины

Рисунок 4.22 - Распределение интенсивности напряжений (а, в, д) и деформаций (б, г, е)

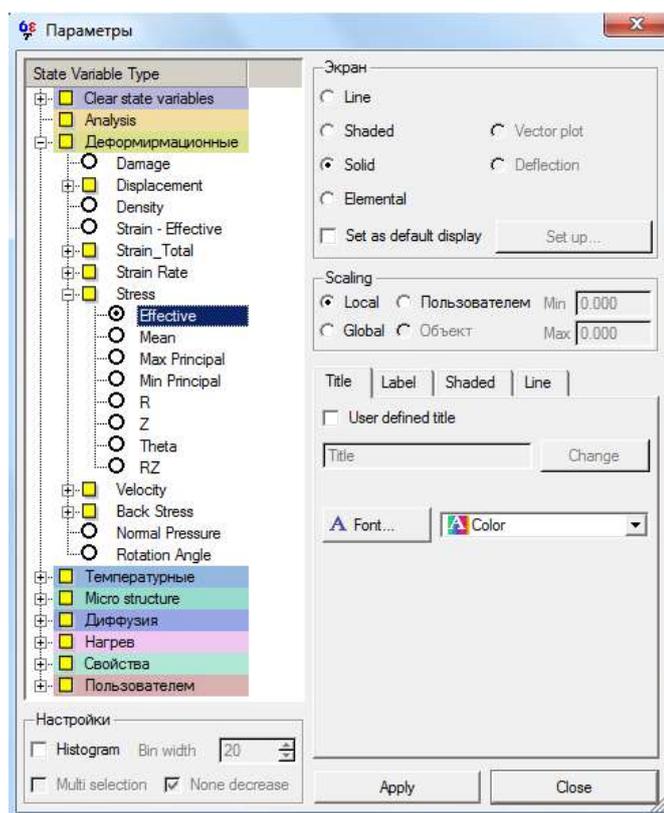


Рисунок 4.23 - Окно **Параметры**

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 4.25) и векторному полю скоростей (рисунок 4.24). Для отображения векторного поля скоростей (рисунок 4.24) нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Velocity*» (скорость) и подтип «*TotalVel*» (суммарная скорость) (рисунок 4.23). В разделе **Экран** установите флажок напротив надписи «*Vector plot*» (векторное поле). Нажмите **Apply**, а затем **Close** для закрытия окна.

Для построения координатной сетки (рисунок 4.25) нажмите кнопку **Flow Net**  (динамическая сетка) на **Панели управления** и в появившемся окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* (прямоугольная) и снова нажмите **Next**. В новом окне укажите параметры сетки – введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 5 и 8. Нажмите ЛКМ кнопку **Next**, а затем **Finish**.

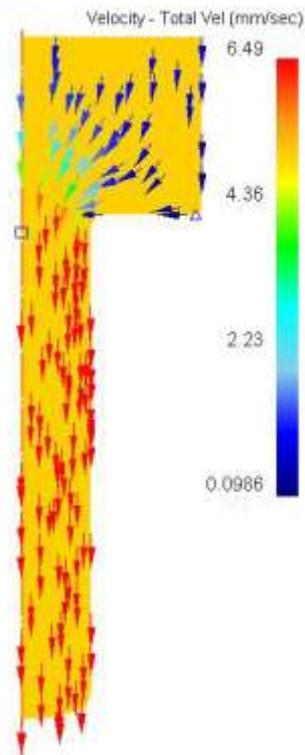


Рисунок 4.24 - Векторное поле скоростей

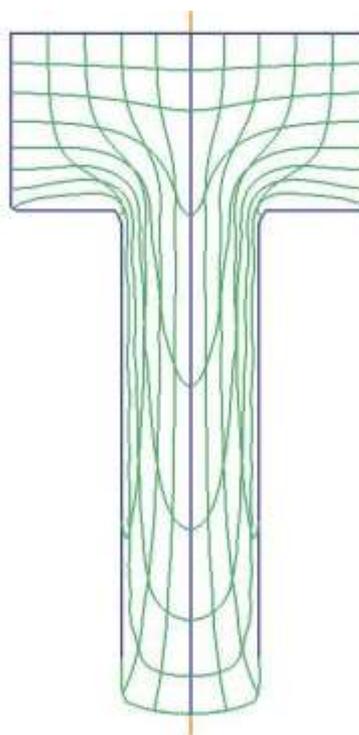


Рисунок 4.25 - Координатная сетка

Для того чтобы отобразить обе части симметричной заготовки (рисунок 4.25), нажмите кнопку **Зеркальная симметрия**  на **Панели управления**. Затем щелчком ЛКМ укажите ось симметрии (штрихпунктирная линия) в окне **Display**. Для закрытия окна **Symmetry Definition** нажмите **Заккрыть**.

Опишите характер изменения усилия прессования по стадиям процесса (рисунок 4.26). Для построения графика усилия нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В появившемся окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 4.27) в разделе **Plot objects** (отображаемые объекты) выберите только верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение пресс-шайбы, поэтому в разделе **X-axis** (ось X) установите флажок напротив надписи «Перемещ». Для отображения более «гладкой» кривой установите в разделе **Smooth** (сглаживание) флажок напротив надписи «*First order*». Нажмите **ОК**.

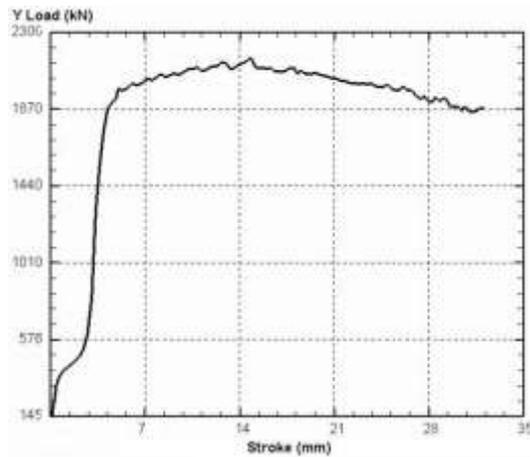


Рисунок 4.26 - График усилия прессования в зависимости от перемещения пресс-шайбы

Полученный график можно скрыть, для этого в **Дереве объектов** наведите на элемент «*Graph - Load prediction*» курсор, нажмите ПКМ и в появившемся контекстном меню выберите «*Hide graph*» (скрыть график). Впоследствии, график можно снова вывести на показ (*Show graph*), удалить (*Remove*) или изменить свойства (*Properties*). Действуя аналогичным образом, можно скрывать, отображать и редактировать все элементы **Дерева объектов**. При этом перед названием скрытых элементов появляется знак «*[.]*», а перед отображаемыми – «*[v]*».

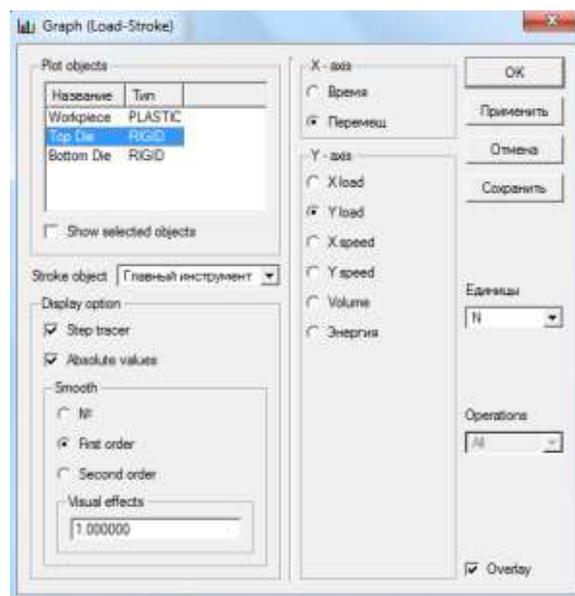


Рисунок 4.27 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

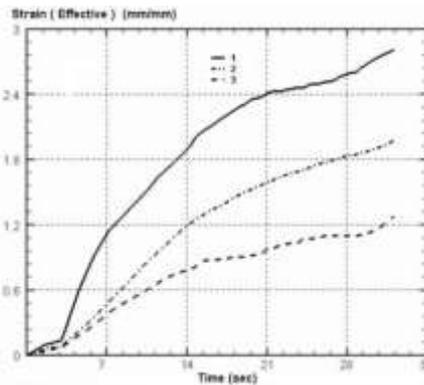
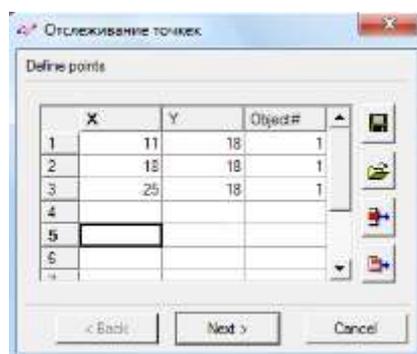


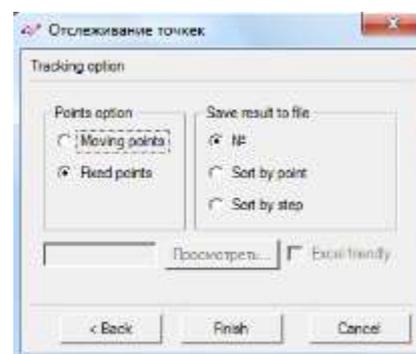
Рисунок 4.28 - Характер изменения  $\varepsilon_i$  по ОПД в зависимости от времени процесса

Проведите анализ изменения интенсивности деформаций в ОПД в процессе прессования. Перед построением графика изменения интенсивности деформаций (рисунок 4.28) необходимо перейти на первый шаг расчета (кнопка **First step** ) и отобразить распределение деформаций в заготовке, используя кнопку **Параметры**  (тип переменной «*Strain\_Total*» и подтип «*von Mises*»).

Затем нажмите на кнопку **Отслеживание точек** , в появившемся окне введите координаты точек, по которым будет отслеживаться изменение выбранного параметра (рисунок 4.29, а), и нажмите **Next**. В следующем окне в разделе **Points option** (параметры точек) установите флажок напротив надписи «*Fixed points*» (неподвижные точки) (рисунок 4.29, б), в этом случае указанные точки не будут перемещаться вместе с узлами конечно-элементной сетки заготовки. Нажмите **Finish**.



а



б

Рисунок 4.29 - Окна **Отслеживание точек**

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса прессования;
  - схемы главных напряжений и деформаций при прессовании;
  - схема прямого прессования.
4. Результаты моделирования прессования:
  - компьютерная модель прессования;
  - искажение координатной сетки и векторное поле скоростей при прессовании;
  - график усилия прессования в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций по стадиям прессования;
  - график изменения интенсивности деформаций по ОПД.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение процесса прессования и его сущности.
2. Назовите области применения прессования.
3. Перечислите этапы процесса прессования.
4. Покажите очаг пластической деформации.
5. Покажите, в каких областях образуются зоны застоя.
6. Опишите причину образования пресс-утяжины.
7. Для чего используют координатные сетки.
8. Опишите схемы главных нормальных напряжений и деформаций в

прессуемой заготовке.

9. Какой закон трения используется в расчете процесса?
10. Для моделирования каких процессов ОМД используется программ *DEFORM-2D*?
11. Перечислите способы построения геометрии заготовок и деформирующего инструмента в *DEFORM-2D*.
12. За что отвечает окно **Simulation controls** (настройки задачи)?
13. Как расположить объекты по отношению друг к другу?
14. Как задают условия трения на контактных поверхностях заготовка-инструмент?
15. Как подсчитать число шагов по перемещению главного инструмента?
16. Зачем нужно создавать базу данных?
17. Какой инструмент называют главным?

## 4.2 Выбор метода прессования профилей

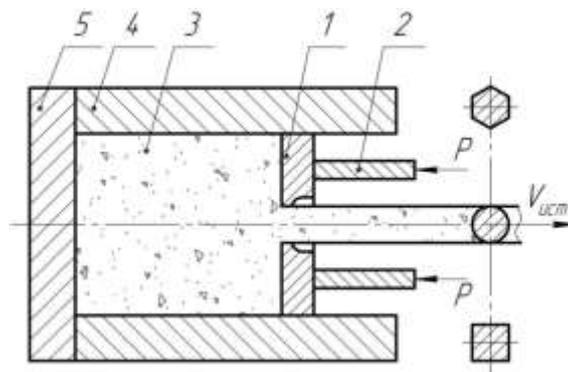
Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе холодного прессования круглого профиля из алюминиевого сплава АД31 с прямым и обратным истечением и закрепление практических навыков работы в среде твердотельного моделирования *DEFORM-2D*.

### Краткие теоретические сведения

Прессование в мировой практике чаще всего выполняют двумя методами: прямым и обратным.

При **прямом методе** выпрессовываемый металл, пресс-штемпель и пресс-шайба движутся в одном направлении. Т.е. заготовка перемещается относительно неподвижного контейнера пресса, что приводит к появлению сил трения  $T$  на контактной поверхности контейнера, которые затрудняют движение заготовки. Прессование называется с прямым истечением, потому что направление усилия прессования совпадает с направлением течения металла [22].

Прессование профилей с **обратным истечением** предложено в 1924 г. американским изобретателем Р. Джендорсоном. При этом методе прессования снижается потребная мощность оборудования на 25-40% за счет устранения трения металла о стенки контейнера. Нагретый металл, вытекая через отверстие в матрице, не скользит по стенкам контейнера 4 (трение происходит только у поверхности матрицы и в канале), т.к. металл заготовки движется к матрице, а наоборот: матрица 1, прикрепленная к концу полого пресс-штемпеля 2, надвигается на заготовку 3 (рисунок 4.30). Для создания замкнутого объема контейнер запирается упорной шайбой 5 (заглушкой).



1 – матрица, 2 – пресс-штемпель, 3 – заготовка,  
4 – пресс-шайба, 5 – заглушка

Рисунок 4.30 - Схема прессования с обратным истечением с подвижной матрицей

Разновидностью этого способа является процесс, когда контейнер вместе с заготовкой движется на неподвижный полый пресс-штемпель с матрицей. В этом способе направление течения металла противоположно направлению приложения силы прессования и поэтому это также прессование с обратным истечением [28].

На рисунке 4.31 схематично показано искажение координатной сетки на заготовке, прессуемой обратным и прямым методами. Видно, что течение металла при обратном прессовании по сравнению с прямым более равномерное. Из-за отсутствия сил трения по контейнеру поперечные линии начинают изгибаться только вблизи матрицы. Пластическое течение металла локализовано около матрицы, а большая часть металла заготовки находится в упругом состоянии. Наружные слои заготовки не скапливаются в упругой зоне около матрицы, а участвуют в течении металла и переходят из заготовки в пресс-изделие. При этом если в наружных слоях заготовки имеются какие-либо дефекты или загрязнения, то они перейдут в пресс-изделие. Поэтому при обратном прессовании требования к качеству поверхности заготовки должны быть более высокими, чем при прямом. Заключительная стадия процесса вследствие отсутствия контактного трения почти не имеет места [23].

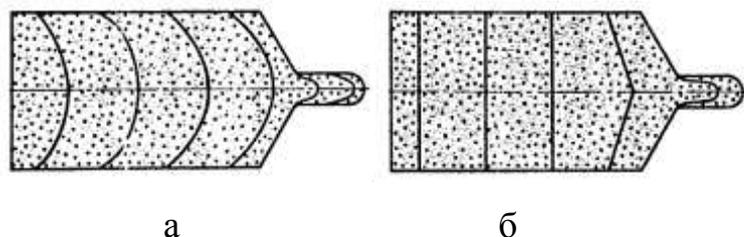
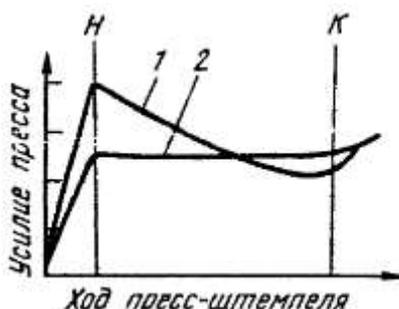


Рисунок 4.31 - Схема искажения поперечных линий координатной сетки при прямом (а) и обратном (б) прессовании

Влияние условий, под воздействием которых образуется центральная пресс-утяжина, значительно ослаблено. Поэтому длина пресс-остатка при обратном прессовании по сравнению с прямым методом меньше и составляет 8-15% диаметра заготовки.

На рисунке 4.32 для сравнения показаны индикаторные диаграммы прямого 1 и обратного 2 прессования одного и того же профиля. Прямое прессование профиля требует большего усилия, чем обратное, при этом усилие существенно изменяется по ходу процесса, что увеличивает неравномерность деформации.

Кроме прямого и обратного прессования на производстве используют и другие методы: прессование со сваркой, прессование с активными силами трения, с боковым истечением, с «рубашкой» и т.д.

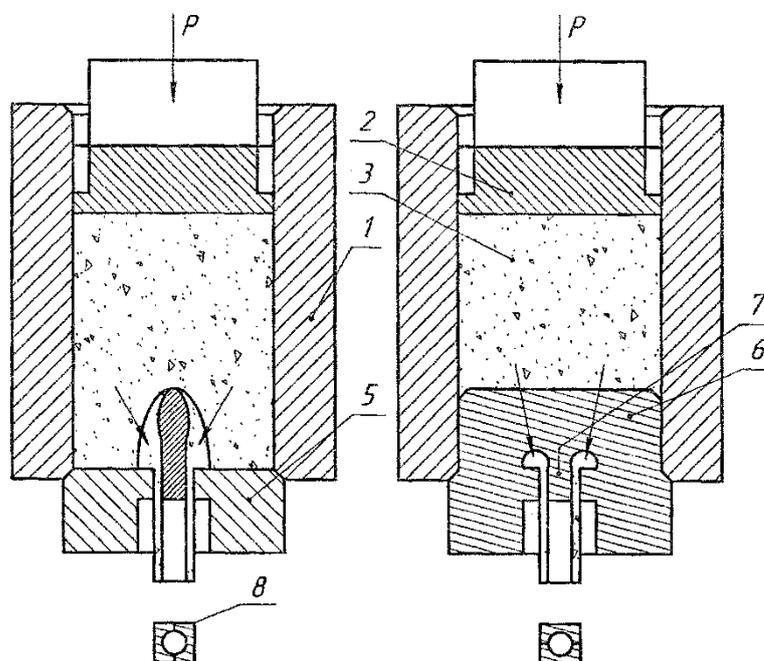


Н – начало истечения, К – конец истечения металла заготовки

Рисунок 4.32 - Типовые индикаторные диаграммы для прямого (1) и обратного (2) метода прессования

Впервые *прессование со сваркой* было предложено в России еще в 1898 г.

Однако промышленное применение этот способ получил после II мировой войны для прессования полых профилей сложной конфигурации из алюминиевых сплавов. Особенность способа состоит в том, что короткая игла 7 («язычок») крепится к корпусу самой матрицы 5 (рисунок 4.33).



1 – контейнер, 2 – пресс-шайба, 3 – заготовка, 4 – матрица, 5 – корпус матрицы, 6 – гребень, 7 – короткая игла, 8 – полое пресс-изделие

Рисунок 4.33 - Схема прессования со сваркой

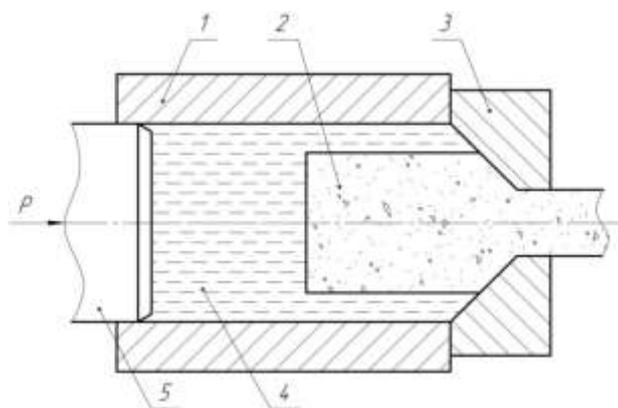
Нагретый металл цилиндрической заготовки 3 при движении в контейнере 1 под действием пресс-шайбы 2 рассекается гребнем 6 матрицы 5 на два потока. Эти потоки горячего металла, обтекают гребень 6 и иглу 7, встречаются друг с другом и свариваются под большим давлением. Затем металл окончательно формируется в зазоре между матрицей 5 и иглой 7 и выходит в виде полого профиля и с двумя сварными швами [54].

Матрица при прессовании профилей рассматриваемым способом объединяет собой непосредственно матрицу, формирующую наружный контур и оправку, которая образует полость пресс-изделия. Поэтому такая матрица называется матрицей с монтированной оправкой или "язычковой". Конструкция язычковой матрицы позволяет получать полые профили самых различных форм не только с одной, но и несколькими полостями, а также профили коробчатого

и петельного типов [24].

**Гидропрессование** – один из быстро развивающихся методов. Этим методом под действием высокого давления хорошо обрабатываются самые неподатливые металлы, например, чугун.

В полость контейнера 1 помещают заготовку 2 и подают жидкость 4, например минеральное или касторовое масло (рисунок 4.34). При достижении в замкнутом объеме контейнера высокого гидростатического давления жидкости металл выдавливается в матрицу с помощью пресс-штемпеля [30].



1 – контейнер, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – жидкая среда, 5 – пресс-штемпель

Рисунок 4.34 - Схема гидропрессования

Заготовка изолирована от инструмента слоем жидкости, поэтому трение между ними минимальное. Для уплотнения между заготовкой и матрицей, передний торец заготовки обтачивают по форме конуса матрицы.

По сравнению с прямым и обратным способами прессования при гидропрессовании: уменьшается необходимое усилие; увеличивается равномерность деформации, как по поперечному сечению, так и по длине изделия; улучшается качество профиля; достигается возможность деформации в холодном состоянии малопластичных металлов за один проход с большими (до 90%) степенями деформации [28].

**Прессование с активными силами трения** было предложено российским ученым, проф. Я.М. Охрименко. В этом способе контейнер перемещается с большей скоростью, чем заготовка (рисунок 4.35), поэтому на

поверхности заготовки создаются силы трения  $T$ , совпадающие по направлению с усилием прессования  $P$  и увлекающие за собой поверхностные слои заготовки. Такие силы трения называют активными, т.е. осуществляющими силовое воздействие. Таким образом, трение способствует выравниванию деформации по объему заготовки, повышая качество получаемых профилей.

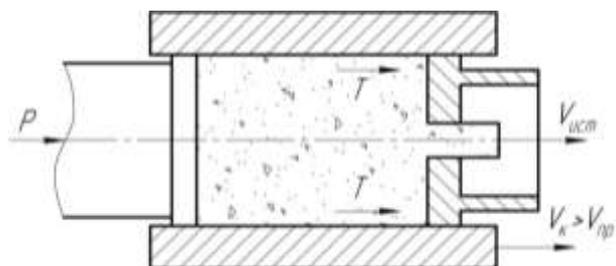
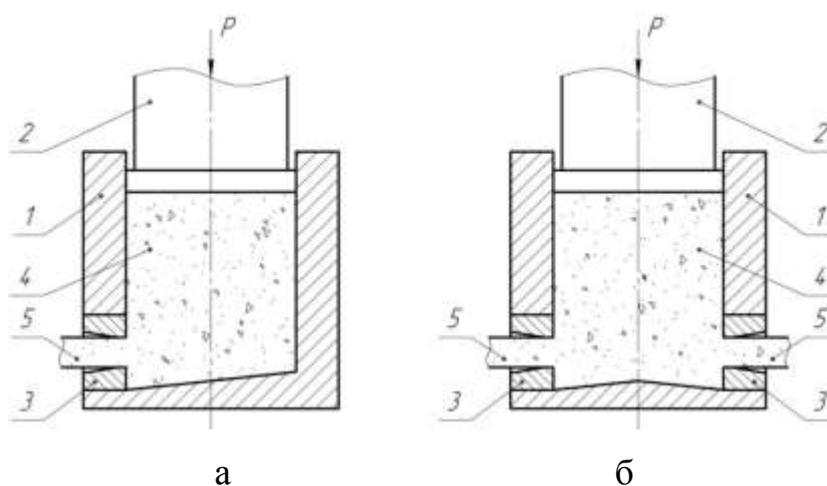


Рисунок 4.35 - Схема прессования с активными силами трения



1 – контейнер, 2 – пресс-штемпель, 3 – матрица, 4 – заготовка, 5 – профиль

Рисунок 4.36 - Схема бокового прессования с одноканальным (а) и двухканальным (б) истечением

При *прессовании с боковым истечением* матрицы расположены под прямым углом к оси пресс-штемпеля (рисунок 4.36). Усилие прессы действует на заготовку в направлении ее продольной оси, а выпрессованный металл выходит из матрицы под углом  $90^\circ$  к направлению действия усилия. Боковое прессование может быть одноканальным (рисунок 4.36, а) и двухканальным с расположением матриц с двух сторон контейнера (рисунок 4.36, б).

Боковое прессование применяют при наложении алюминиевых и свинцовых оболочек на электрический кабель, а так же при прессовании на вертикальных прессах для получения максимальной длины профиля, наноструктурирования металла [25].

При *прессовании с «рубашкой»* пресс-шайба имеет диаметр несколько меньший, чем диаметр контейнера (рисунок 4.37), поэтому поверхностные слои металла срезаются пресс-шайбой в виде цельного стакана и вместе с пресс-остатком остаются в контейнере. В результате поверхностные дефекты заготовки и окислы, образовавшиеся при нагреве, остаются в рубашке и не попадают в пресс-изделие. После прессования рубашку из контейнера удаляют. Недостатком метода является увеличенное количество металла, идущее в отход [29].

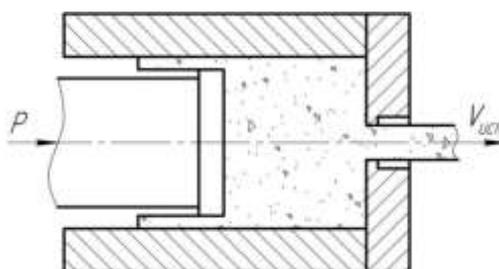


Рисунок 4.37 - Схема прессования с «рубашкой»

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *OBRAT\_PRESS*. Нажмите кнопку **Finish**.

После запуска препроцессора убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (вызовите окно **Simulation controls** нажатием на кнопку **Simulation controls** ).

## Построение геометрии инструмента и заготовки

Выполним компьютерное моделирование прессования круглого профиля с обратным истечением металла и сравним результаты расчета с данными, полученными в предыдущей лабораторной работе по исследованию прямого метода прессования.

Добавьте в **Дерево объектов** верхний инструмент *Top Die* (подвижная матрица) и нижний инструмент *Bottom Die* (замкнутый контейнер), нажимая кнопку **Добавить объект** .

Сделайте активным нижний инструмент *Bottom Die* (укажите ЛКМ *Bottom Die* в **Дерево объектов**). Перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия**

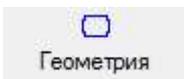
. В появившееся **Поле ввода геометрии** (таблицу) последовательно введите значения, представленные в таблице 4.4. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить** .

Таблица 4.4 - Координаты точек для построения замкнутого контейнера

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	45	0	0
3	45	84	0
4	26	84	0
5	26	19	1
6	0	19	0

Таблица 4.5 - Координаты точек для построения подвижной матрицы

№	X	Y	R
1	26	0	0
2	26	15	0
3	12	15	0
4	12	3	0
5	10	3	0
6	10	0	1
7	26	0	0

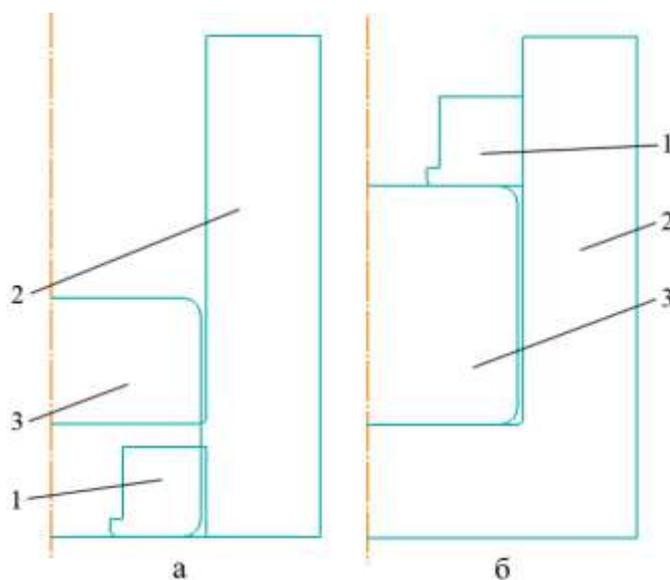
Проверьте полученную геометрию на наличие ошибок, для этого нажмите кнопку **Check** , а затем кнопку **Check&Correct Geometry**. В случае верного построения должно появиться сообщение «*Geometry is legal*».

Действуя аналогичным образом, постройте геометрию верхнего инструмента *Top Die* и заготовки *Workpiece*. Координаты точек для построения приведены в таблицах 4.5 и 4.6 соответственно.

Геометрия заготовки, подвижной матрицы и контейнера до позиционирования изображена на рисунке 4.38, а.

Таблица 4.6 - Координаты точек для построения заготовки

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	25	0	3
3	25	40	3
4	0	40	0



1 – матрица; 2 – контейнер; 3 – заготовка

Рисунок 4.38 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а) и позиционирования (б)

## Позиционирование объектов

Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 4.39), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения объектов относительно друг друга (рисунок 4.38, б) воспользуйтесь методом **Интерференция**.

Сначала расположим заготовку и контейнер по отношению друг к другу. В строке **Позиционируемый объект** выберите *Workpiece*, а в строке **Относительно** – *Bottom Die* (рисунок 4.39). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «-Y». Для позиционирования нажмите ЛКМ кнопку **Применить**.

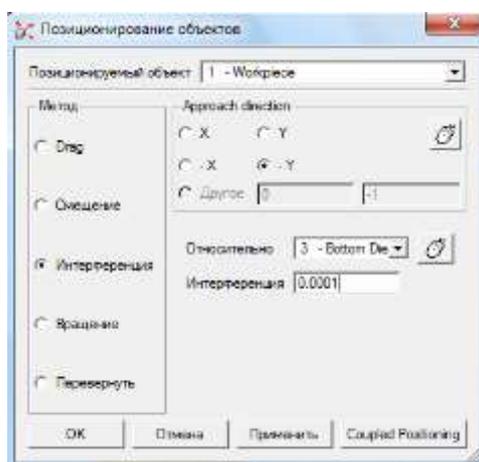
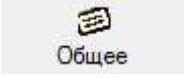


Рисунок 4.39 - Окно **Позиционирование объектов**

По аналогии осуществите позиционирование матрицы *Top Die* относительно заготовки *Workpiece*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунок 4.38, б.

## Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** , задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на

кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DINAlMgMn, COLD[70-250F(20-120C)]* (АД31) и нажмите кнопку **Загрузить**.

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object** , и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 4.40).

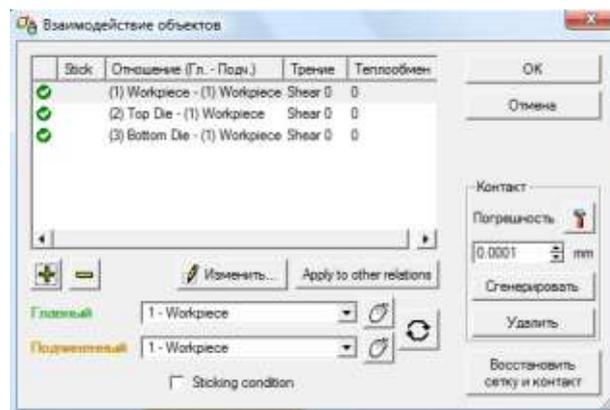


Рисунок 4.40 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «*Constant Tau*» (закон трения по Зибелю), укажите коэффициент трения равный 0,12 и нажмите кнопку **Закреть** (рисунок 4.41).

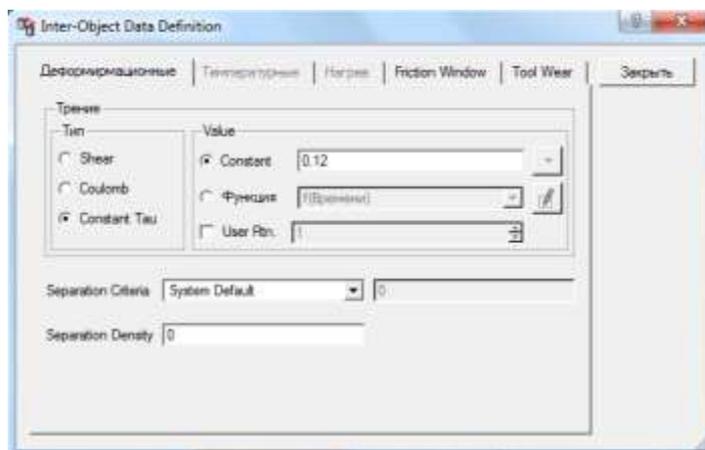


Рисунок 4.41 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к остальным.

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта (рисунок 4.42). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

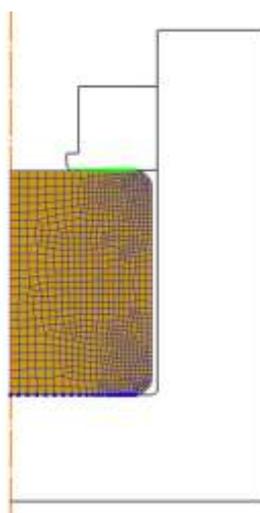


Рисунок 4.42 - Контактные поверхности между заготовкой, матрицей и контейнером

## Задание движения верхнего инструмента

Укажите ЛКМ *Top Die* (матрица) в **Дереве объектов** для приложения движения. Затем нажмите кнопку **Движение**  и, убедившись, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в строку **Constant value**, расположенную в самом низу, значение 1 мм/с (рисунок 4.43).

В соответствии с заданными условиями нагружения матрица будет перемещаться вниз (-Y) с постоянной скоростью 1 мм/с.

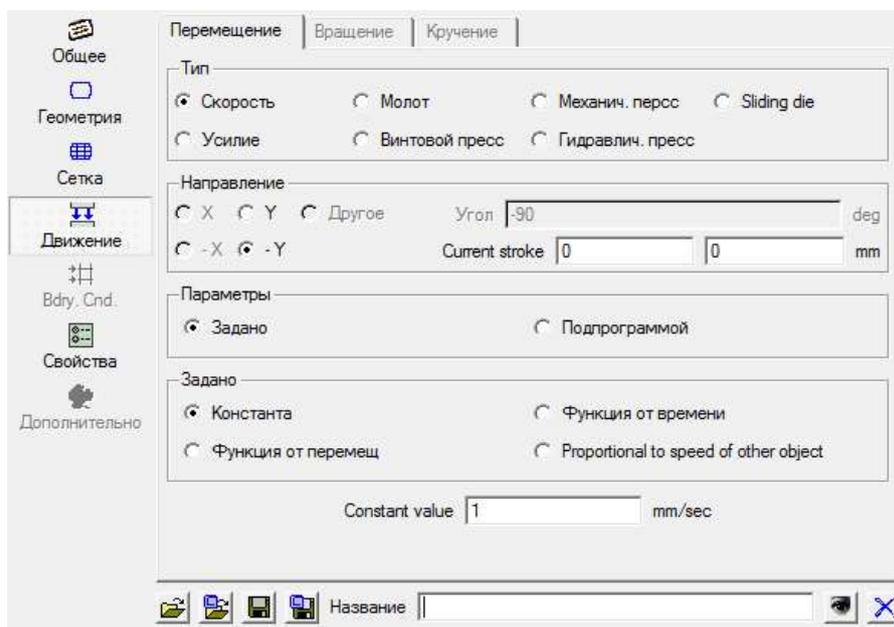


Рисунок 4.43 - Пункт **Движение** из **Панели инструментов**

## Задание числа шагов расчета

Для определения величины шага необходимо произвести замер ребра любого конечного элемента заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , а затем данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 4.44).

Для того, что бы задать количество шагов необходимо перемещение главного инструмента (матрицы) разделить на размер шага и полученное значение, округленное до целого в большую сторону, внести в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 4.44).

Примем число шагов расчета равным 90, что соответствует перемещению матрицы на 27 мм при величине шага 0,3 мм.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *TopDie*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

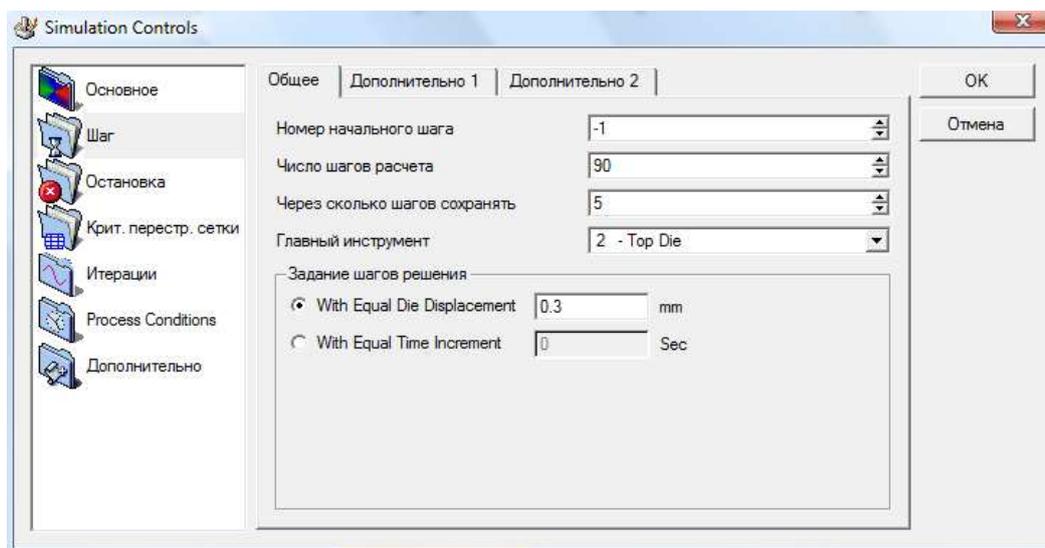


Рисунок 4.44 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 4.45). Для закрытия окна нажмите кнопку **Заккрыть**.

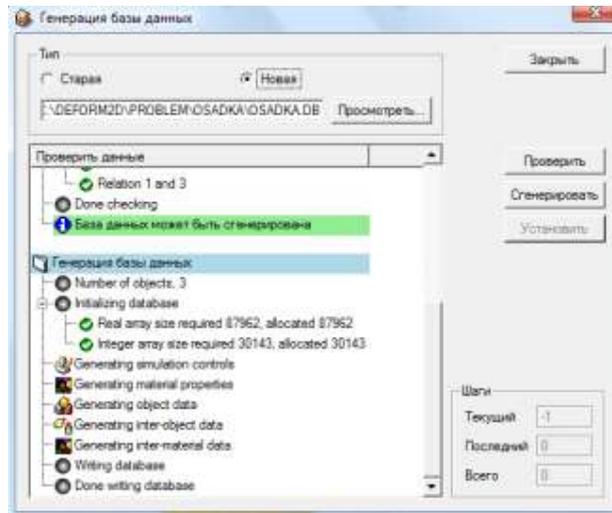


Рисунок 4.45 - Окно Генерация базы данных

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку .

Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается, или полосой **Remeshing**, что говорит о перестроении конечно-элементной сетки.

### Анализ результатов моделирования

Анализ результатов моделирования заключается в сравнении напряженно-деформированного состояния, скоростных и силовых параметров процесса прессования с прямым и обратным истечением металла, при этом данные для прямого метода берутся из предыдущей лабораторной работы.

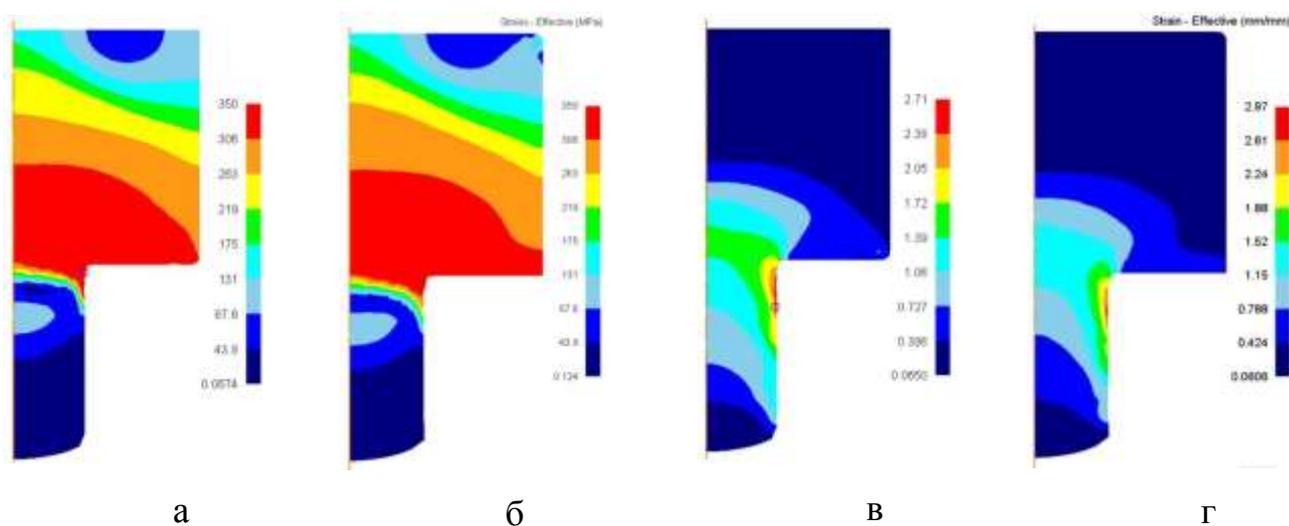
Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** .

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от метода прессования (рисунок 4.46). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*») (рисунок 4.47). В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 4.49) и векторному полю скоростей (рисунок 4.48). Для отображения скоростей (рисунок 4.48) нажмите кнопку **Параметры** , выберите тип переменной «*Velocity*» и подтип «*Total Vel*» (рисунок 4.47). В разделе **Экран** установите «*Vector plot*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

Для построения координатной сетки (рисунок 4.49) нажмите кнопку **Flow Net**  и в окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* и снова нажмите **Next**. В новом окне введите в поле **Numberofgrids** количество разбиений по оси X и Y – 5 и 8. Нажмите кнопку **Next**, а затем **Finish**.



а, в – прямой метод; б, г – обратный метод прессования

Рисунок 4.46 - Распределение интенсивности напряжений (а, б) и деформаций (в, г)

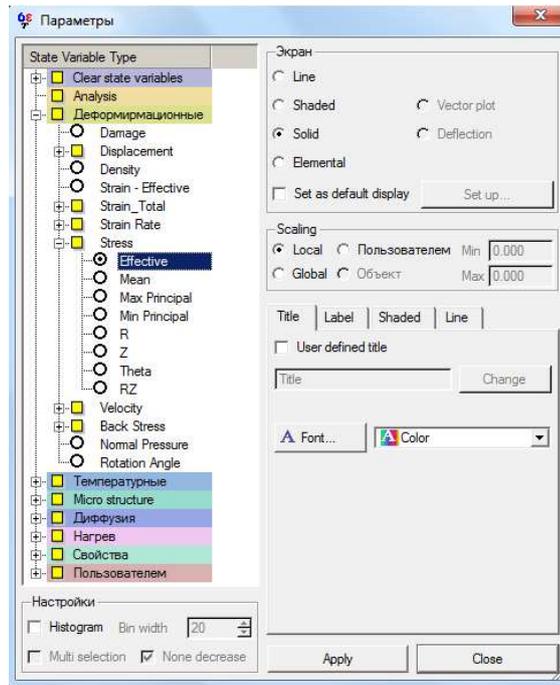


Рисунок 4.47 - Окно **Параметры**

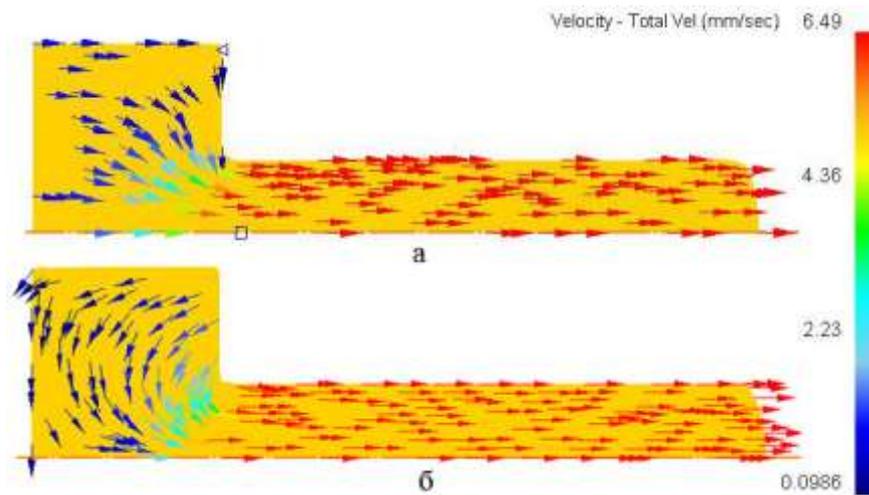


Рисунок 4.48 - Векторное поле скоростей при прямом (а) и обратном (б) прессовании

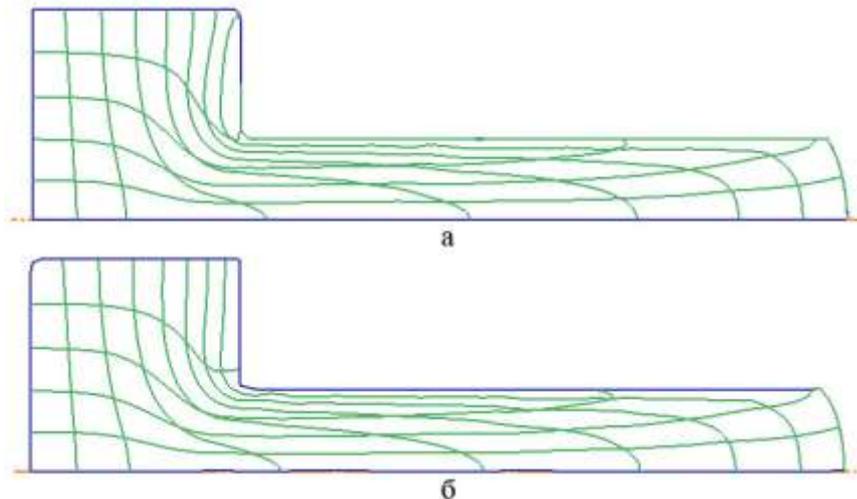
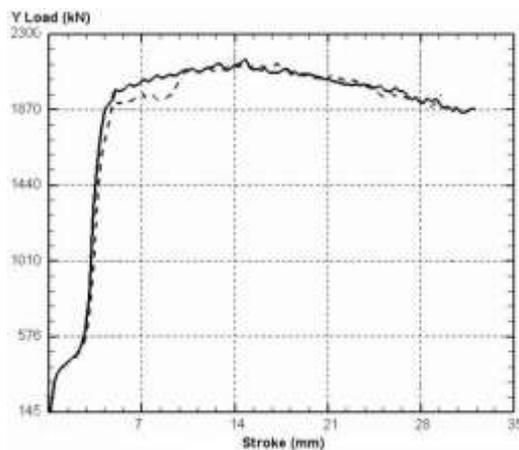


Рисунок 4.49 - Координатная сетка при прямом (а) и обратном (б) прессовании



----- – прямой метод; - - - – обратный метод прессования

Рисунок 4.50 - Изменение усилия в зависимости от перемещения матрицы (пресс-шайбы)

Опишите характер изменения усилия прессования по стадиям процесса (рисунок 4.50). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 4.51) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение матрицы, поэтому в разделе **X-axis** установите «Перемещ». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

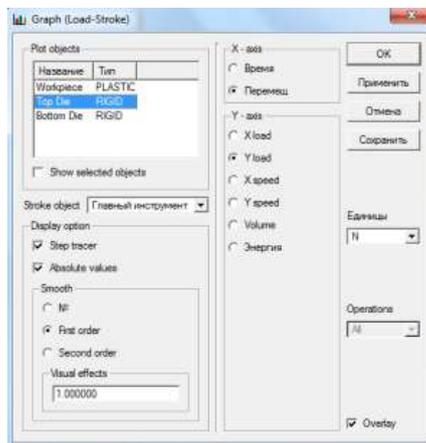


Рисунок 4.51 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса прессования;
  - схема обратного метода прессования;
  - индикаторная диаграмма для прямого и обратного прессования;
  - специальные методы прессования.
4. Результаты моделирования прямого и обратного методов прессования:
  - компьютерная модель обратного прессования;
  - искажение координатной сетки и векторное поле скоростей при прессовании;
  - график усилия прессования в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций при прессовании.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Сравнение прессования с прямым и обратным истечением металла.
7. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключается сущность обратного прессования?
2. Назовите основные отличия прямого и обратного методов прессования.
3. Чем отличаются индикаторные диаграммы для прямого и обратного методов прессования?
4. Почему при обратном методе прессования величина пресс-остатка значительно меньше, чем при прямом?
5. В каком из методов прессования, прямом или обратном, течение металла заготовки в контейнере более равномерное?
6. Какие пресс-изделия можно получить прессованием со сваркой?
7. Перечислите особенности гидропрессования металлов?
8. В чем идея способа прессования с активными силами трения?
9. Когда возникает необходимость прессования с «рубашкой», с боковым истечением металла заготовки?
10. Как в программе DEFORM-2D построить векторное поле скоростей течения металла?
11. Как провести проверку правильности построения геометрии инструмента или заготовки?
12. Как задать материал заготовки?
13. Как осуществить запуск расчета в программе DEFORM-2D?
14. В какой последовательности производится нанесение на деформированную заготовку координатной сетки?
15. С помощью каких действий можно зеркально отобразить изображение искаженной сетки?

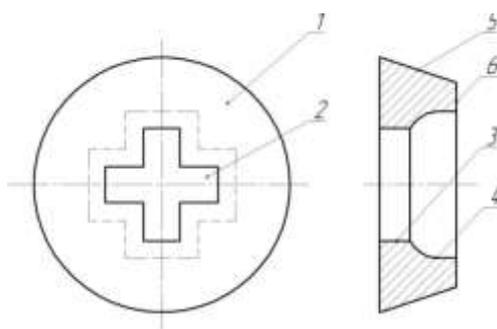
### 4.3 Проектирование конструкций матриц

Цель работы: изучение влияния конструкции матриц на процесс прессования; компьютерное моделирование прямого прессования круглого профиля из алюминиевого сплава АД31 через коническую матрицу; закрепление практических навыков работы в среде твердотельного моделирования *DEFORM-2D*.

#### Краткие теоретические сведения

Матрица является наиболее важным технологическим инструментом, в котором совершается формирование внешней формы, точности размеров и качества поверхности пресс-изделия (профиля). Матрица представляет собой металлический диск с прорезанным в нем каналом по форме пресс-изделия, ее устанавливают в передней части контейнера и она замыкает его полость с заложенной заготовкой [31].

Основные элементы конструкции матрицы: обжимная часть (зеркало) 1, рабочий канал 2 с калибрующим пояском 3, выходная часть 4, посадочная 5 и опорная 6 поверхности (рисунок 4.52). Выходная часть 4 матрицы устраняет возможность задиранья деформируемого профиля кромкой канала 2.

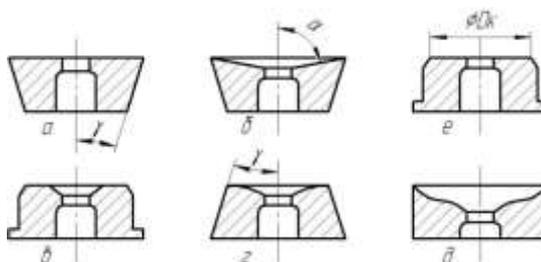


1 – зеркало; 2 – рабочий канал; 3 – калибрующий пояс;  
4 – выходная часть; 5, 6 – посадочная и опорная поверхности

Рисунок 4.52 - Основные элементы конструкции матрицы

По форме обжимной (заходной) части матрицы разделяют на плоские (рисунок 4.53, а), конические (рисунок 4.53, б), плоскоконические (рисунок

4.53, г) и сигмоидальные (рисунок 4.53, д).



плоские (а), конические (б), плоскоконические (в), радиальные (г),  
сигмовидные (д)

Рисунок 4.53 - Конструкции матриц по форме обжимной части и посадочной поверхности

При прессовании профилей из алюминиевых сплавов чаще всего используют плоские матрицы (рисунок 4.53, а). В плоской матрице поверхность, контактирующая с передним торцом заготовки, называют зеркалом. В ходе прессования на плоских матрицах образуется значительная «мертвая» зона, которая препятствует проникновению различных дефектов в профиль и обеспечивает получение высококачественной поверхности профиля. Одна и та же плоская матрица позволяет проводить прессование из контейнеров различного диаметра. Плоские матрицы просты в изготовлении и обеспечивают легкое отделение пресс-остатка от матрицы. При одинаковых габаритах через плоские матрицы можно прессовать профили большего сечения и в большое число каналов [32].

Конические матрицы имеют заходную часть в виде конусной воронки, выполненной под углом  $\alpha$  к оси прессования (рисунок 4.53, б). Как показывает практика, они обеспечивают более равномерное течение металла на выходе из очага пластической деформации, что снижает усилие прессования. При прессовании через конические матрицы объем «мертвой» зоны значительно уменьшается и она не задерживает продвижение через матрицу в пресс-изделие различных загрязнений с поверхности заготовки. Конические матрицы сложнее в изготовлении, чем плоские. Чаще всего их используют для прессования труб

и профилей из труднодеформируемых металлов и сплавов.

Угол наклона образующей канала конической матрицы  $\alpha$  оказывает влияние на работу пластической деформации и усилие прессования. Работа пластической деформации при прессовании определяется на индикаторной диаграмме (усилие – ход пресс-шайбы) площадью, заключённой между кривой  $P$  и осью абсцисс на основной стадии процесса (рисунок 4.54) [33].

В общем виде полная работа  $A$  при прямом прессовании профилей может быть представлена в виде суммы работ:

$$A = A_{\epsilon} + A_{тр.к.} + A_{тр.м.} + A_{тр.п.}$$

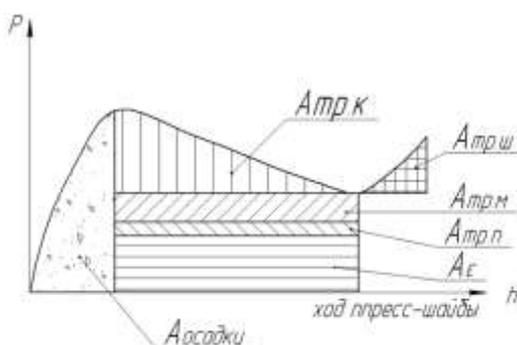


Рисунок 4.54. Структура энергозатрат при прямом прессовании

где  $A_{\epsilon}$  – работа пластической деформации;  $A_{тр.к.}$ ,  $A_{тр.м.}$ ,  $A_{тр.п.}$  – работа сил трения по поверхности контейнера, матрицы и пояска матрицы соответственно.

Исходя из рассмотренной структуры энергозатрат полное усилие прессования  $P$  на основной стадии можно записать в виде суммы составляющих:

$$P = R_m + T_{кр} + T_m + T_n,$$

где  $R_m$  – усилие необходимое для осуществления пластической деформации без учёта сил трения;  $T_{кр}$ ,  $T_m$ ,  $T_n$  – усилия необходимые для преодоления сил контактного трения по поверхности контейнера, матрицы и пояска матрицы соответственно (рисунок 4.55) [34].

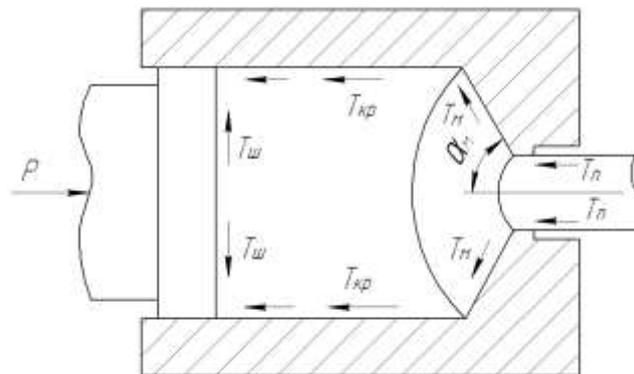


Рисунок 4.55 - Схема активных и реактивных сил

На основной стадии прессования составляющая  $T_{кр}$  убывает из-за уменьшения длины заготовки. На заключительной стадии появляется составляющая  $T_{ш}$  – усилие, необходимое для преодоления сил трения по поверхности пресс-шайбы, что приводит к росту усилия  $P$  (рисунок 4.55).

С увеличением угла конуса матрицы  $\alpha$  растут дополнительные сдвиги, а с ними составляющая  $R_m$  (рисунок 4.56). Одновременно уменьшается контактная поверхность боковой границы очага пластической деформации, а с ней и составляющая  $T_m$ , поэтому при изменении угла  $\alpha$ , образуется зона минимальных значений  $R_m + T_m$ .

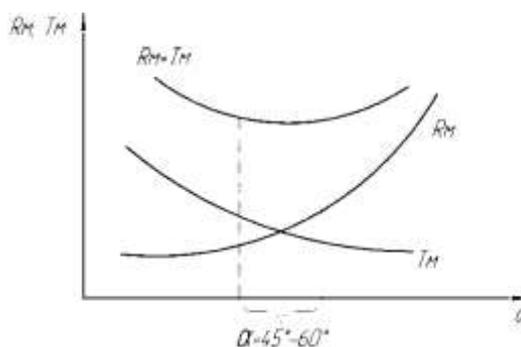


Рисунок 4.56 - Влияние угла конуса матрицы  $\alpha$  на составляющие усилия прессования  $R_m$  и  $T_m$

Плоско-конические матрицы содержат элементы плоских и конических матриц (рисунок 4.53, в). Они используются для прессования труднодеформируемых металлов и сплавов.

Вогнуто-выпуклый контур обжимной зоны сигмовидной матрицы

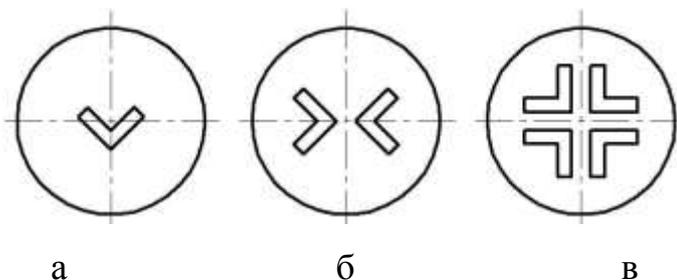
повторяет границу «мертвой» зоны (рисунок 4.53, д). Такие матрицы применяются для прессования профилей со смазкой.

Радиальные матрицы с выпуклой или вогнутой образующей в практике прессования используются для улучшения качества изделий (рисунок 4.53, г).

По форме посадочной поверхности в матрицедержателе матрицы разделяют на матрицы с прямым конусом (рисунок 4.53, а), обратным конусом (рисунок 4.53, в) и цилиндрические с буртом (рисунок 4.53, г). Наибольшее распространение получили матрицы с обратным конусом. Посадка матрицы в матрицедержатель с обратным конусом  $\gamma = 3-10^\circ$  обеспечивает плотное соединение матрицы с подкладкой и увеличивает опорную поверхность матрицы. Облегчается сборка и разборка инструмента в матричном узле.

Матрицы с обратным конусом используют для прессования профилей компактных поперечных сечений, с прямым конусом – профилей сложных поперечных сечений, с буртом – профилей несложных поперечных сечений. Для сопряжения контейнера с матрицей в ряде случаев на посадочной поверхности матрицы выполняют конус (рисунок 4.53, е) [35].

По числу каналов матрицы разделяют на одно- (рисунок 4.57, а) и многоканальные (рисунок 4.57, б-в). Одноканальные матрицы чаще всего применяют для прессования профилей сложной конфигурации и крупных сечений, многоканальные матрицы – для прессования профилей более простых форм и небольших сечений. Использование многоканального прессования часто позволяет интенсифицировать процесс прессования и снизить неравномерность истечения.



а – одноканальные, б – двухканальные, в – четырехканальные

Рисунок 4.57 - Конструкции матриц с различным числом каналов

По технологии изготовления матрицы разделяют на монолитные, сборные и разъемные (рисунок 4.58). Сборные матрицы для увеличения стойкости инструмента изготавливают из разных материалов (рисунок 4.58, а). Вставку 1 делают из высоколегированных металлокерамических материалов, обладающих повышенной жаропрочностью и износостойкостью. Вставки устанавливают в обойму 2 горячей посадкой. Такие матрицы иногда называют бандажированными. Их используют для прессования профилей из труднодеформируемых сплавов при высоких температурах 1600-1700°С.

Разъемные матрицы состоят из нескольких частей (рисунок 4.58, б). Их используют для прессования ступенчатых профилей с законцовками, также они позволяют облегчить удаление отпрессованного профиля с пресс-остатком вне прессы [36].

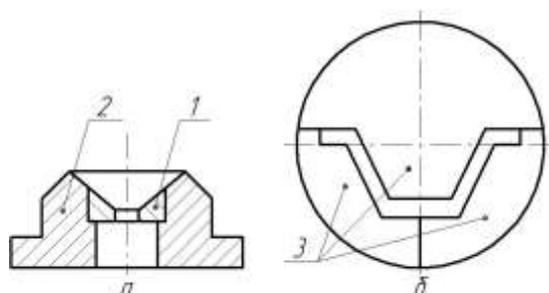
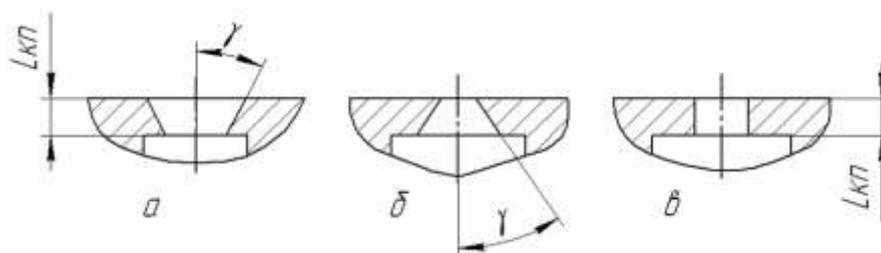


Рисунок 4.58 - Конструкции сборных (а) и разъемных (б) матриц

По контуру канала матрицы выполняют калибрующие (рабочие) пояски следующих видов: сходящиеся, расходящиеся и параллельные оси прессования (рисунок 4.59). Основная функция поясков – управлять течением прессуемого металла на входе из канала матрицы.



а – сходящиеся, б – расходящиеся, в – параллельные оси прессования

Рисунок 4.59 - Конструкции поясков канала матрицы

В расходящемся канале (рисунок 4.59, б) длина пояска равна нулю, поэтому профиль имеет минимальную площадь контакта с пояском. Сопротивление истечению и разогрев поверхности профиля меньше, чем в сходящемся канале (рисунок 4.59, а). Основным недостатком расходящегося канала – опасность возникновения на поверхности профиля дефектов в виде налипов и царапин. Частицы прессуемого металла и окислов скапливаются в клиновом зазоре и царапают поверхность профиля, либо привариваются к ней. Другой недостаток таких каналов – быстрый износ острой кромки, что приводит к изменению заданных размеров поперечного сечения прессуемого профиля [37].

В сходящемся в направлении истечения канале (рисунок 4.59, а) прессуемый металл соприкасается с пояском по всей длине, что вызывает торможение металла за счет увеличения сопротивления истечению. Это приводит к росту температуры поверхности вследствие трения, поэтому приходится уменьшать скорость истечения металла во избежание образования поверхностных трещин. Качество поверхности профиля выше в сходящемся канале, чем в расходящемся.

Каналы с параллельными цилиндрическими поясками (рисунок 4.59, в) применяются наиболее часто, так как просты в изготовлении. Путем изменения длины пояска можно регулировать скорость истечения отдельных элементов профиля.

К технологическим элементам конструкции матрицы относятся:

1. Формы и размеры сечения канала матрицы, которые должны учитывать: упругие, деформационные и температурные изменения его в процессе прессования; упругую деформационную и термическую усадку прессуемого профиля и внеконтактную пластическую деформацию металла, связанную с неравномерностью истечения отдельных элементов профиля.

2. Форма и длина калибрующих поясков канала матрицы, позволяющих менять сопротивление истечению отдельных элементов профиля.

3. Размещение профиля на зеркале матрицы относительно оси прессования, влияющее на условия прессования и равномерность истечения металла. При равномерном истечении металла профиль получается прямым, без изгибов и скручивания.

4. Расстояние между каналами многоканальных матриц и их расположение относительно оси прессования, оказывающее влияние на стабильность геометрических размеров и степень неравномерности скорости истечения.

5. Толщина матрицы, оказывающая большое влияние на деформацию изгиба ее отдельных элементов, что существенно изменяет размеры прессуемых изделий и снижает стойкость при производстве профилей с полузамкнутыми полостями (особенно у матриц консольного типа).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *MATR\_PRESS*. Нажмите кнопку **Finish**.

После запуска препроцессора убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (вызовите окно **Simulation controls** нажатием на кнопку **Simulation controls** ).

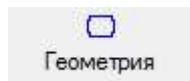
### Построение геометрии инструмента и заготовки

Выполним компьютерное моделирование прямого прессования круглого профиля через коническую матрицу ( $\alpha = 60^\circ$ ) и сравним результаты расчета с данными, полученными в предыдущей лабораторной работе по исследованию прессования через плоскую матрицу.

Добавьте в **Дерево объектов** верхний инструмент *Top Die* (пресс-шайба) и нижний инструмент *Bottom Die* (контейнер, совмещенный с матрицей), нажимая

кнопку **Добавить объект** .

Сделайте активным нижний инструмент *Bottom Die* (укажите ЛКМ *Bottom Die* в Дереве объектов). Перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия**



. В появившееся **Поле ввода геометрии** (таблицу) последовательно введите значения, представленные в таблице 4.7. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить**  **Применить**.

Таблица 4.7 - Координаты точек для построения контейнера, совмещенного с матрицей

№	X	Y	R
1	12	0	0
2	50	0	0
3	50	80	0
4	26	80	1
5	26	24	1
6	10	15	1
7	10	12	0
8	12	12	0
9	12	0	0

Проверьте полученную геометрию на наличие ошибок, для этого нажмите кнопку **Check**  **Check**, а затем кнопку **Check&Correct Geometry**. В случае верного построения должно появиться сообщение «*Geometry is legal*».

Действуя аналогичным образом, постройте геометрию верхнего инструмента *Top Die* и заготовки *Workpiece*. Координаты точек для построения приведены в таблицах 4.8 и 4.9 соответственно.

Таблица 4.8 - Координаты точек для построения пресс-шайбы

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	26	0	0
3	26	20	0
4	0	20	0

Таблица 4.9 - Координаты точек для построения заготовки

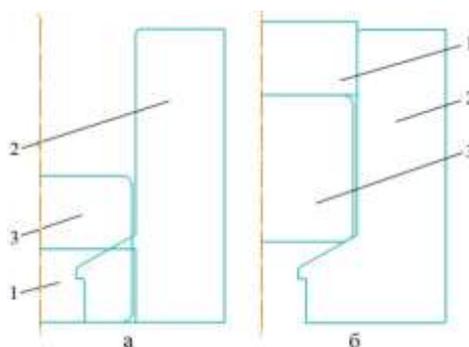
№	X	Y	R
1	0	0	0
2	25	0	3
3	25	40	3
4	0	40	0

Конечная геометрия заготовки, пресс-шайбы и контейнера, совмещенного с матрицей, изображена на рисунке 4.60, а.

### Позиционирование объектов

Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 4.61), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения объектов относительно друг друга (рисунок 4.60, б) воспользуйтесь методом **Интерференция**.

Сначала расположим заготовку и контейнер по отношению друг к другу. В строке **Позиционируемый объект** выберите *Workpiece*, а в строке **Относительно** – *Bottom Die* (рисунок 4.61). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «-Y». Для позиционирования нажмите кнопку **Применить**.



1 – пресс-шайба; 2 – контейнер, совмещенный с матрицей; 3 – заготовка

Рисунок 4.60 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а) и позиционирования (б)

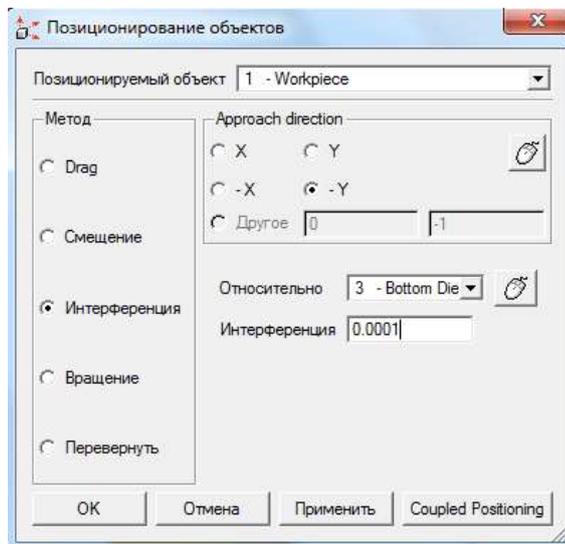


Рисунок 4.61 - Окно **Позиционирование объектов**

По аналогии осуществите позиционирование пресс-шайбы *Top Die* относительно заготовки *Workpiece*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунок 4.60, б.

### Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** , задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DINAlMgMn, COLD[70-250F(20-120C)]* (АД31) и нажмите кнопку **Загрузить**.

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 4.62).

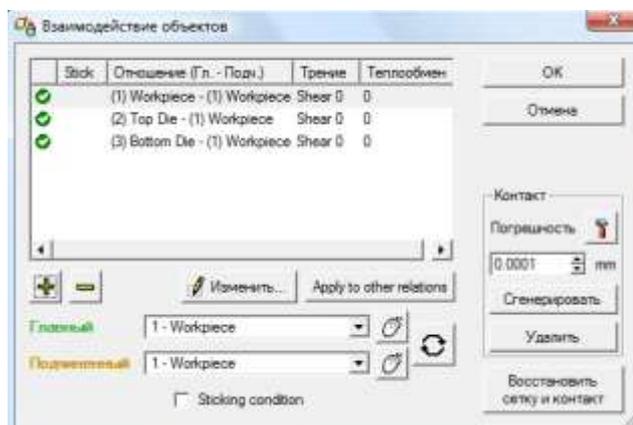


Рисунок 4.62 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «Constant Tau» (закон трения по Зибелю), укажите коэффициент трения равный 0,12 и нажмите кнопку **Закреть** (рисунок 4.63).

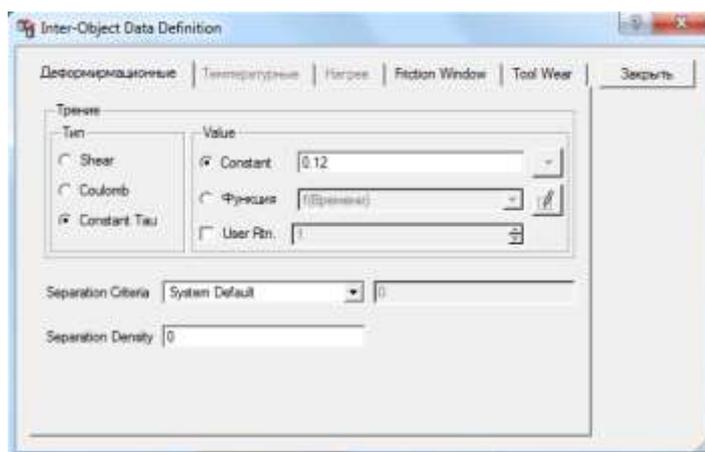


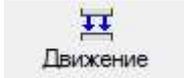
Рисунок 4.63 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к

остальным.

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта (рисунок 4.64). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

### Задание движения верхнего инструмента

Укажите ЛКМ *Top Die* (пресс-шайба) в **Дереве объектов** для приложения движения. Затем нажмите кнопку **Движение**  и, убедившись, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в строку **Constant value**, расположенную в самом низу, значение 1 мм/с (рисунок 4.65).

В соответствии с заданными условиями нагружения пресс-шайба будет перемещаться вниз (-Y) с постоянной скоростью 1 мм/с.

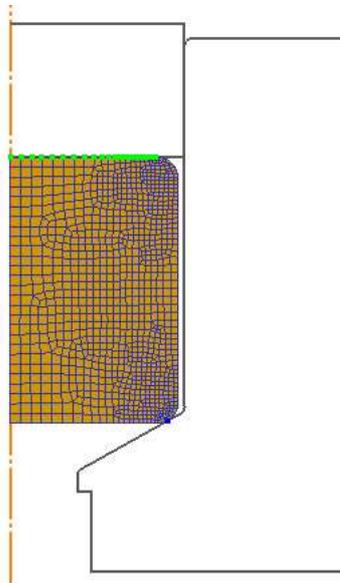


Рисунок 4.64 - Контактные поверхности между заготовкой, матрицей и контейнером

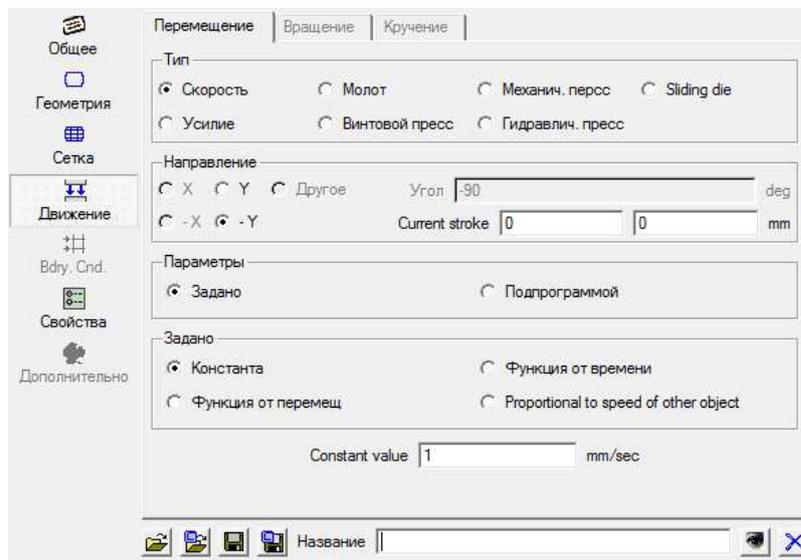


Рисунок 4.65 - Пункт **Движение** из **Панели инструментов**

### Задание числа шагов расчета

Для определения величины шага необходимо произвести замер ребра любого конечного элемента заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , а затем данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 4.66).

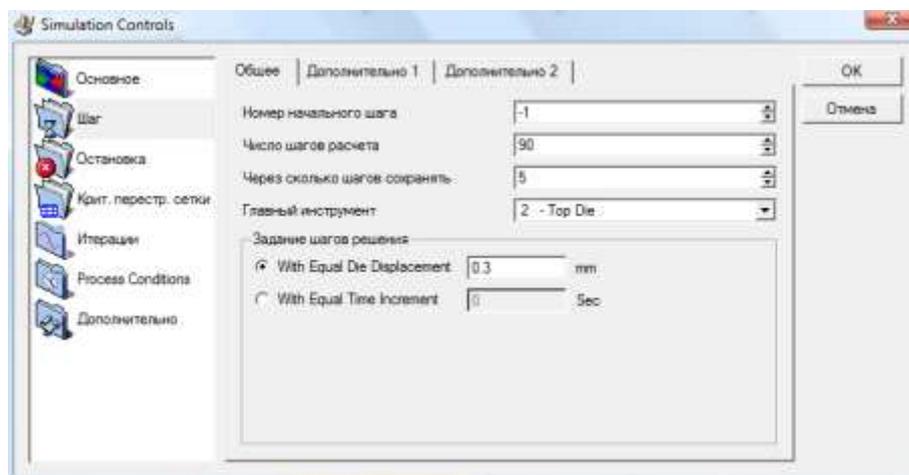


Рисунок 4.66 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Для того, что бы задать количество шагов необходимо перемещение главного инструмента (пресс-шайбы) разделить на размер шага и полученное значение, округленное до целого в большую сторону, внести в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 4.66).

Примем число шагов расчета равным 90, что соответствует перемещению пресс-шайбы на 27 мм и высоте пресс-остатка 13 мм при величине шага 0,3 мм.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 16). Для закрытия окна нажмите кнопку **Заккрыть**.

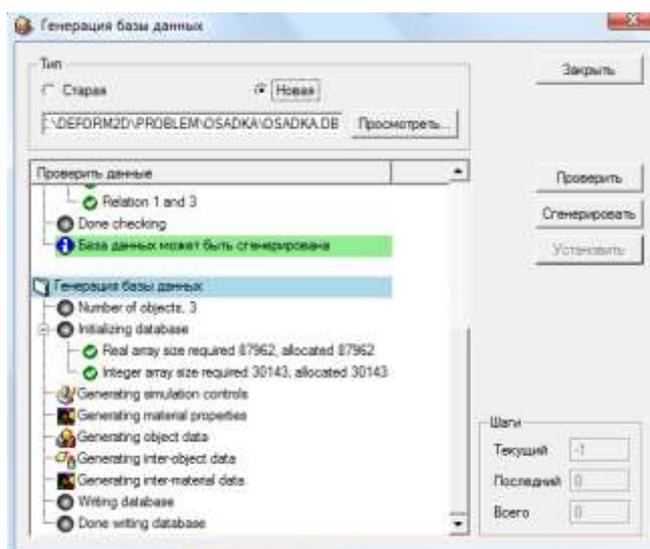


Рисунок 4.67 - Окно **Генерация базы данных**

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

## Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку .

Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается, или полосой **Remeshing**, что говорит о перестроении конечно-элементной сетки.

## Анализ результатов моделирования

Анализ результатов моделирования заключается в сравнении напряженно-деформированного состояния, скоростных и силовых параметров процесса прессования через плоскую и коническую матрицу, при этом данные для прессования через плоскую матрицу берутся из предыдущей лабораторной работы.

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** .

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от типа матрицы (рисунок 4.69). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*») (рисунок 4.68). В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 4.71) и векторному полю скоростей (рисунок 4.70).

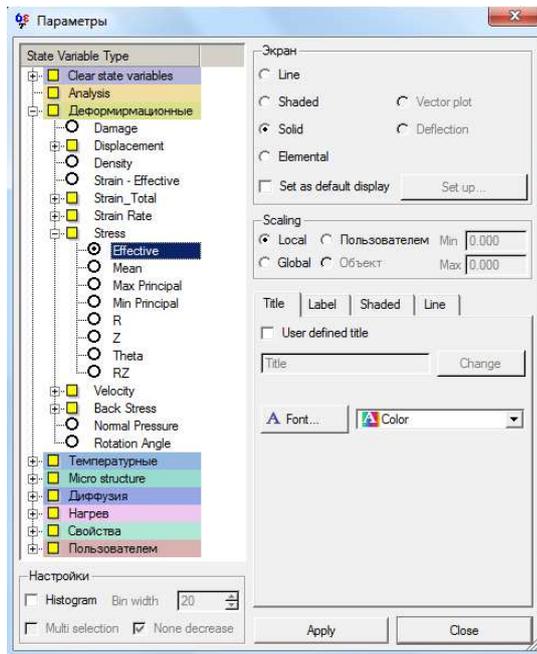
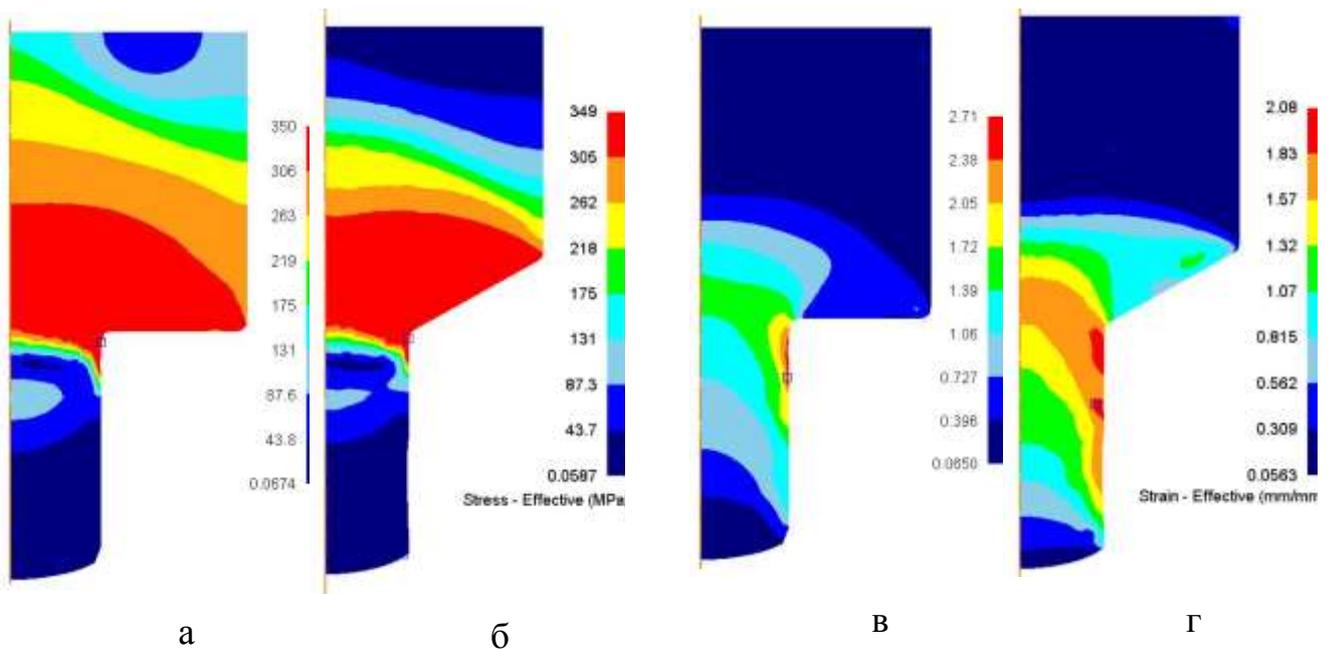


Рисунок 4.68 Окно Параметры



а, в – плоская; б, г – коническая матрица

Рисунок 4.69 - Распределение интенсивности напряжений (а, б) и деформаций (в, г)

Для отображения скоростей (рисунок 4.70) нажмите кнопку **Параметры** , выберите тип переменной «*Velocity*» и подтип «*Total Vel*» (рисунок 4.69). В разделе **Экран** установите «*Vector plot*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

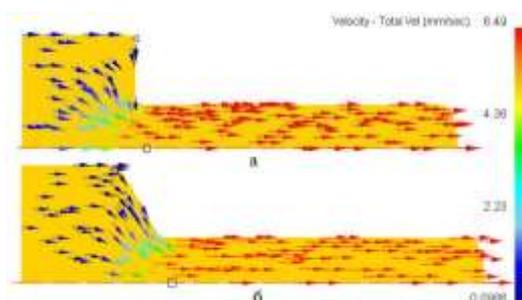


Рисунок 4.70 - Поле скоростей при прессовании через плоскую (а) и коническую (б) матрицу

Для построения координатной сетки (рисунок 20) нажмите кнопку **Flow Net**  и в окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* и снова нажмите **Next**. В новом окне введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 5 и 8. Нажмите кнопку **Next**, а затем **Finish**.

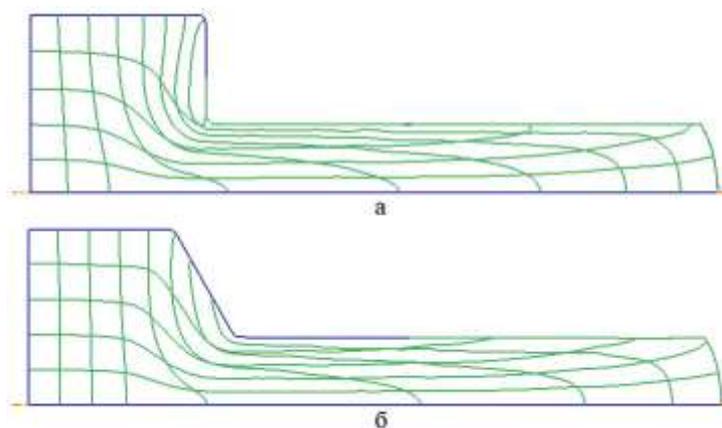
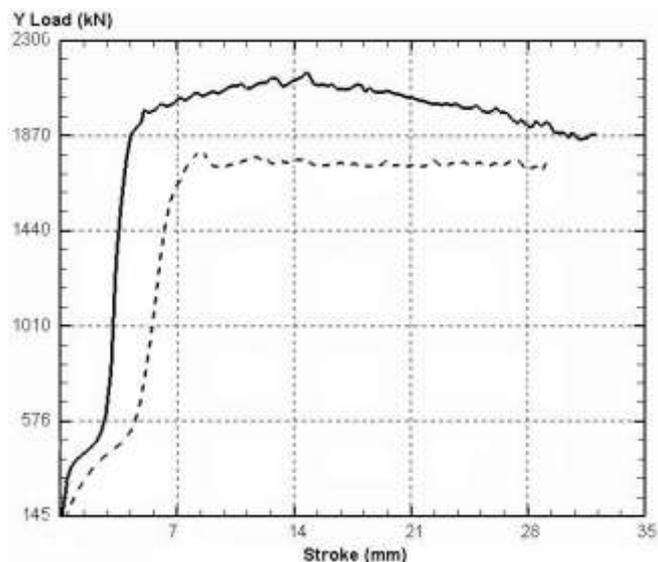


Рисунок 4.71 - Координатная сетка при прессовании через плоскую (а) и коническую (б) матрицу



----- — плоская; - - - — коническая матрица

Рисунок 4.72 - Изменение усилия прессования в зависимости от перемещения пресс-шайбы

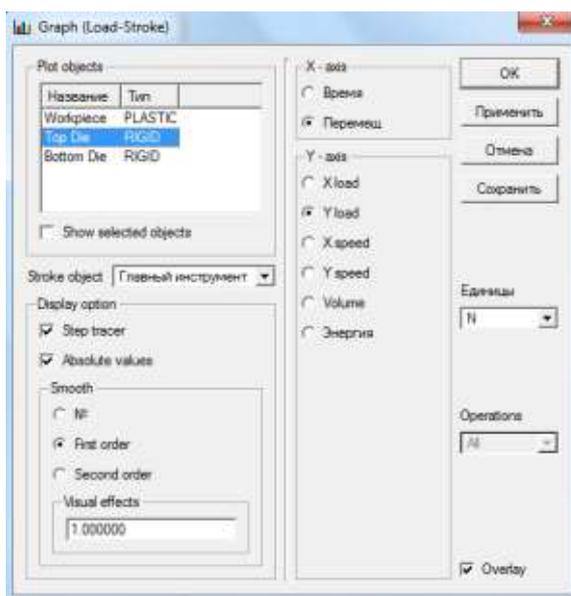


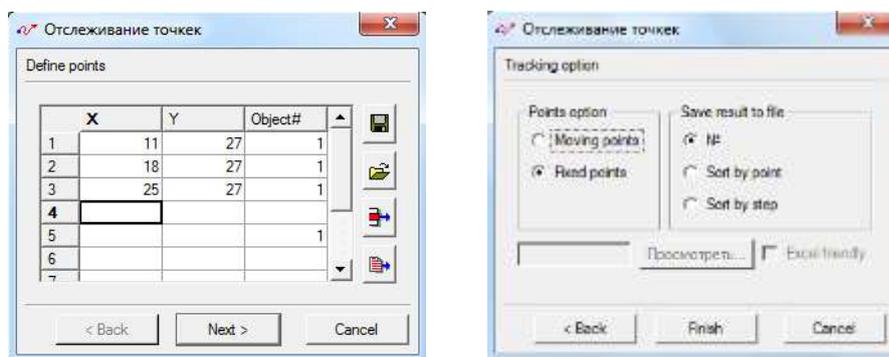
Рисунок 4.73 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

Опишите характер изменения усилия прессования по стадиям процесса (рисунок 4.72). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 4.73) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение матрицы, поэтому в разделе **X-axis** установите «Перемещ». Для

отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

Проведите анализ изменения интенсивности деформаций в ОПД в процессе прессования (рисунок 4.75). Перейдите на первый шаг расчета (кнопка **First step** ) и отобразите распределение деформаций, используя кнопку **Параметры**  (тип переменной «*Strain\_Total*» и подтип «*von Mises*»).

Затем нажмите на кнопку **Отслеживание точек**  и введите координаты точек, по которым будет отслеживаться изменение выбранного параметра (рисунок 4.74, а). Нажмите **Next**. Далее в разделе **Points option** установите «*Fixed points*» (рисунок 4.74, б) для фиксации точек. Нажмите **Finish**.



а

б

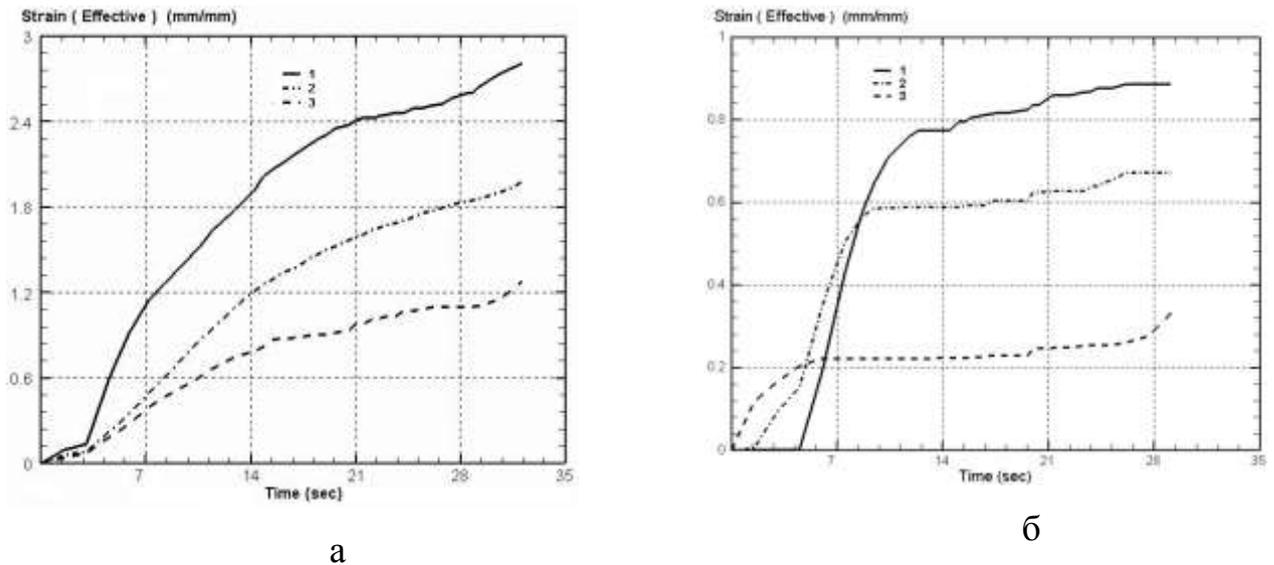
Рисунок 4.74 - Окна **Отслеживание точек**

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса прессования;
  - схема прессования через коническую матрицу;

- влияние угла конуса матрицы на составляющие усилия прессования;



а – плоская; б – коническая матрица

Рисунок 4.75 - Характер изменения  $\varepsilon_i$  по ОПД в зависимости от времени процесса

- классификация матриц.
4. Результаты моделирования прессования через плоскую и коническую матрицу:
    - Компьютерная модель прессования через коническую матрицу;
    - искажение координатной сетки и векторное поле скоростей при прессовании;
    - график усилия прессования в зависимости от перемещения;
    - распределение интенсивности напряжений и деформаций при прессовании;
    - график изменения интенсивности деформаций по ОПД.
  5. Анализ полученных результатов моделирования.
  6. Сравнение прессования через плоскую и коническую матрицу.
  7. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляет конструкция матрицы?
2. Перечислите основные элементы конструкции матрицы?
3. Как классифицируются матрицы по форме обжимной части?
4. В каких случаях применяют плоские матрицы?
5. В чем существенное отличие прессования через плоскую и коническую матрицы?
6. Приведите примеры матриц с различным числом каналов?
7. Опишите причины появления зоны оптимальных углов конических матриц?
8. Из каких составляющих складывается полная работа пластической деформации при прямом прессовании?
9. Перечислите виды калибрующих поясков?
10. Что относят к технологическим элементам конструкции матриц?
11. В чем заключается качественное отличие искажения координатных сеток при прессовании через плоскую и коническую матрицу?
12. Как задать материал объекта?
13. Как посмотреть значение интенсивности деформаций в определенной точке?
14. Перечислите инструменты графического построения, доступные в постпроцессоре?

#### **4.4 Обоснование температурных режимов прессования**

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе горячего прессования круглого профиля из алюминиевого сплава АД31 с прямым истечением и привитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-2D.

##### **Краткие теоретические сведения**

Температура нагрева заготовки  $T_z$  и скорость истечения  $V_{ист}$  – важные технологические параметры, определяющие качество пресс-изделия. Оба эти параметра тесно связаны между собой: так увеличение скорости истечения повышает температуру заготовки, поэтому  $T_z$  и  $V_{ист}$  объединяют в одно понятие – температурно-скоростной режим прессования [38].

При выборе температурно-скоростного режима стремятся:

максимально снизить сопротивление деформации прессуемого материала для уменьшения усилия прессования и нагрузок на инструмент, что, в свою очередь, позволяет вести процесс прессования с высокими коэффициентами вытяжки;

обеспечить высокую пластичность металла, позволяющую вести прессование с высокими скоростями истечения;

поддерживать температуру заготовки не выше критической, превышение которой вызывает потерю эластичности и, как следствие, разрушение пресс-изделий;

обеспечить получение профилей с требуемой структурой, минимальной разнотернистостью и заданным уровнем механических свойств.

При прессовании профилей 90-95% энергии, приложенной к заготовке, переходит в тепловую энергию, которая вызывает местный разогрев металла в отдельных объемах заготовки. В результате температура заготовки существенно возрастает (рисунок 4.76), при этом наибольший разогрев

наблюдается в очаге пластической деформации около матрицы. Одновременно с приходом тепла происходит его рассеяние через инструмент, нагретый до меньших температур, чем заготовка [39]. Содержание тепла  $Q$  в прессуемой заготовке определяется следующим выражением:

$$Q = Q_0 + Q_\varepsilon + Q_{тр} - Q_{пр} - Q_{рас},$$

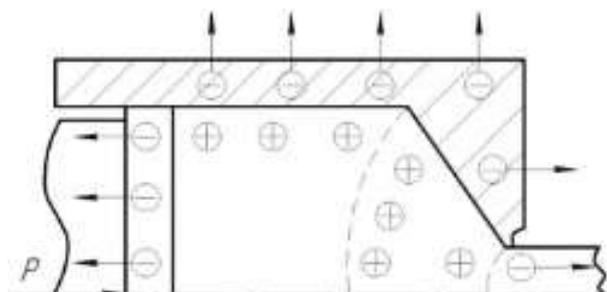
где  $Q_0$  – тепло в заготовке перед загрузкой в контейнер;

$Q_\varepsilon$  – тепло работы пластической деформации;

$Q_{тр}$  – тепло за счет преобразования работы, затрачиваемой на преодоление сил трения;

$Q_{пр}$  – тепло, уносимое профилем;

$Q_{рас}$  – тепло, рассеиваемое в окружающую среду.



“+” – образование тепла; “-” – расходование тепла

Рисунок 4.76 - Схема возникновения и расходования тепла в процессе горячего прессования

Разогрев металла  $\Delta T_\varepsilon$  в очаге пластической деформации от перехода работы пластической деформации  $A_\varepsilon$  в тепло  $Q_\varepsilon$  можно найти из закона сохранения энергии:

$$Q_\varepsilon = A_\varepsilon,$$

$$Q_\varepsilon = c\rho V\Delta T_\varepsilon \text{ и } A_\varepsilon = \eta_{\text{вых}}qV\ln\lambda,$$

$$q = P_{пр}/F_k,$$

где  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – удельный вес (плотность), кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta T_\varepsilon$  – величина разогрева, °С;  $V$  – объем заготовки, м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{вых}}$  – коэффициент выхода тепла ( $\eta = 0,9-0,95$ );  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;  $q$  – давление в контейнере, Па;

$P_{пр}$  – усилие прессования, Н;  $F_k$  – площадь контейнера,  $m^2$ .

Окончательно получим следующее выражение:

$$\Delta T_{\varepsilon} = \eta_{вых} \frac{q \ln \lambda}{c\rho} .$$

По характеру изменения температуры в очаге пластической деформации процесс прессования может протекать следующим образом:

Приход тепла больше расхода и, как следствие, температура заготовки к концу прессования превышает начальную ( $Q > Q_0$ ). Такие условия возникают при прессовании с высокими скоростями истечения, например, при холодном прессовании.

Приход тепла меньше, чем рассеивается в окружающую среду, и процесс идет с уменьшением температуры ( $Q < Q_0$ ). Этот случай имеет место при прессовании с небольшими скоростями истечения, например, при прессовании высокопрочных алюминиевых сплавов.

Приход тепла равен его расходу ( $Q = Q_0$ ), и прессование идет с постоянной температурой на выходе из канала матрицы (изотермическое прессование) [53].

Температура заготовки в процессе прессования может возрасти от притока тепла, в результате работы при высокой скорости истечения. Поэтому для создания условий прессования при одинаковой температуре заготовки, процесс ведут так, чтобы повышение тепла от процесса работы деформации компенсировалось соответствующим снижением скорости истечения. Такое прессование называется изотермическим [40].

Температурный интервал прессования представляет разность минимальной и максимальной температур заготовки, при которых обеспечивается необходимый комплекс технико-экономических показателей процесса и характеристик качества изделий.

Температурный интервал прессования зависит от физической природы и состава сплавов; состояния заготовки; способа прессования; температурного режима; степени и скорости деформации; допустимых давлений на инструмент;

требований к качеству поверхности изделий, к их макро- и микроструктуре, механическим и физико-химическим свойствам; формы поперечного сечения изделий и их размеров; требований к производительности прессов и др.

Даже из этого неполного перечня факторов, влияющих на выбор температурного интервала, видно, что ряд из них характеризуют противоположные тенденции в выборе температуры прессования [52].

Температурный интервал прессования выбирают так, чтобы при верхних предельных температурах не происходило перегрева или пережога металла, а при нижних – усилие прессования оказалось меньше предельного (паспортного) усилия пресса и обеспечивало требуемое качество структуры прессового изделия.

Температуру нагрева заготовки  $T_{нагр}$ , приводящей к оптимальным условиям прессования, выбирают, уменьшая температуру прессования  $T_{пр}$  на величину, равную разогреву от тепла деформации  $\Delta T_{\epsilon}$ , с учетом охлаждения заготовки при переносе от печи до контейнера  $\Delta T_{тр}$ :

$$T_{нагр} = T_{пр} + \Delta T_{тр} - \Delta T_{\epsilon},$$

$$\Delta T_{тр} = V_{охл} \tau_{тр},$$

где  $V_{охл}$  – скорость охлаждения, °С/мин;  $\tau_{тр}$  – время транспортировки, мин [41].

В настоящее время выбор температурного интервала производится в основном экспериментально по диаграммам состояния и пластичности (рисунок 4.77). Максимальная температура прессования  $T_{макс}$  должна соответствовать максимальному значению относительного сужения  $\psi$  и относительного удлинения  $\delta$  при минимальном (или близком к нему) значении предела текучести  $\sigma_T$  (рисунок 2, а). Причем значение этой температуры не должно превышать  $0,9T_S$ , где  $T_S$  – температура линии солидуса для данного сплава; нижняя граница интервала должна обеспечивать состояние прессуемого металла в однофазной области –  $0,7T_S$  (рисунок 4.77, б) [42].

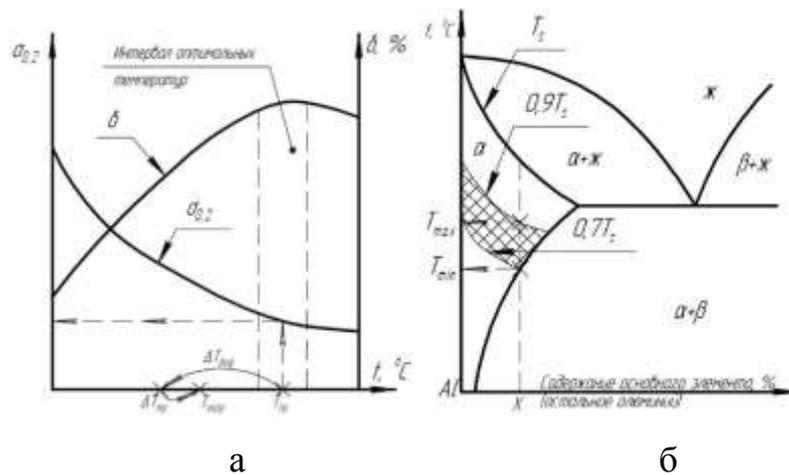


Рисунок 4.77 - Выбор температуры прессования по диаграммам пластичности (а) и состояния (б)

Критериями, определяющими допустимую скорость истечения металла, служат: начало появления поверхностных трещин; образование рисок, налипов и других поверхностных дефектов; устойчивость геометрических размеров поперечного сечения изделия; начало появления гофров, волнистости и других дефектов. На скорость истечения, кроме того, влияют состав и температура металла в пластической зоне; исходное состояние заготовки; неравномерность деформации; форма и размеры поперечного сечения изделия и соотношение размеров отдельных элементов профиля; конструкция инструмента; способ прессования; условия контактного трения. Чем больше сопротивление деформации прессуемого металла, тем меньше скорость истечения. При прочих равных условиях быстрее прессуются профили простых поперечных сечений, медленнее – сложных поперечных сечений.

Повышению скоростей истечения при прессовании способствуют:

1. снижение температурного интервала нагрева заготовок перед прессованием;
2. проведение гомогенизации литых заготовок;
3. использование технологических смазок и покрытий инструмента, снижающих контактное трение;

4. применение конструкций матриц, обеспечивающих выравнивание скоростей истечения отдельных элементов профилей;
5. местное охлаждение канала матрицы, снижающее температуру выходящего изделия;
6. обратный метод прессования;
7. градиентный нагрев заготовок.

Иногда перед прессованием заготовку нагревают неравномерно по длине. Более нагрет торец заготовки, располагающийся около матрицы, менее нагретый торец около пресс-шайбы. В процессе прессования температура заготовки выравнивается от тепла работы деформации. Такое прессование называется прессование с градиентным нагревом заготовок.

По температурным условиям рассматривают следующие разновидности процессов прессования:

- с полным упрочнением (холодное прессование);
- с неполным упрочнением (теплое прессование);
- с неполным разупрочнением (полугорячее прессование);
- с полным разупрочнением (горячая деформация).

**Холодное прессование** – это прессование при дорекристаллизационной температуре, не превышающей  $0,3T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления металла (в градусах Кельвина). Этот метод осуществляют на прессовых установках с применением высоких энергий для производства профилей из мягких сплавов. Холодное прессование повышает механические свойства профилей: так пределы прочности и текучести, твердость увеличивается в 2-3 раза, что позволяет применять для деталей машин менее прочные и, как следствие, более дешевые металлы. Метод обеспечивает высокое качество поверхности (шероховатость 0,32-2,5 мкм) и точность (9-11 квалитеты). В этом процессе при больших скоростях используется тепло деформации, с помощью которого разогревается металл и уменьшается сопротивление деформации [43].

Теплое, полугорячее и горячее прессование реализуется при температурах  $0,3T_{пл} < T_{пр} \leq 0,5T_{пл}$ ,  $0,5T_{пл} < T_{пр} < 0,7T_{пл}$  и  $T_{пр} \geq 0,7T_{пл}$ ,

соответственно. Нагрев заготовки позволяет увеличить пластичность металла и уменьшить сопротивление деформированию. В связи с этим на практике горячее прессование наиболее распространено.

При *горячем прессовании* в деформируемом металле происходит полная динамическая рекристаллизация и формируется полностью рекристаллизованная структура. *Полугорячая деформация* осуществляется в нагретом состоянии, но при более низкой температуре, когда динамическая рекристаллизация в металле проходит не полностью. *Теплая деформация* имеет место при небольшом нагреве и характеризуется прохождением возврата [43].

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *GOR\_PRESS*. Нажмите кнопку **Finish**.

После запуска препроцессора, нажмите кнопку **Simulation controls** . Убедитесь в том, что в окне **Simulation controls** в качестве системы измерения установлена система «СИ», выбран режим расчета «Деформирование» и «Теплопередача», а тип геометрии – «Осесимметричная» (рисунок 4.78). Нажмите кнопку **ОК**.

### Построение геометрии инструмента и заготовки

Выполним компьютерное моделирование горячего прессования круглого профиля через плоскую матрицу и сравним результаты расчета с данными, полученными в предыдущей лабораторной работе по исследованию холодного прессования через плоскую матрицу.

Добавьте в **Дерево объектов** верхний инструмент *Top Die* (пресс-шайба) и нижний инструмент *Bottom Die* (контейнер, совмещенный с матрицей), нажимая

кнопку **Добавить объект** .

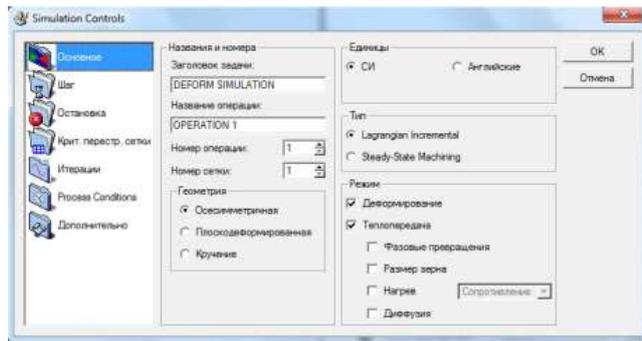
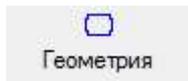


Рисунок 4.78 Окно **Simulation controls**

Сделайте активным нижний инструмент *Bottom Die* (укажите ЛКМ *Bottom Die* в **Дереве объектов**). Перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия**



. В появившееся **Поле ввода геометрии** (таблицу) последовательно введите значения, представленные в таблице 4.10. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить**  **Применить**.

Проверьте полученную геометрию на наличие ошибок, для этого нажмите кнопку **Check**  **Check**, а затем кнопку **Check&Correct Geometry**. В случае верного построения должно появиться сообщение «*Geometry is legal*».

Таблица 4.10 - Координаты точек для построения контейнера, совмещенного с матрицей

№	X	Y	R
1	12	0	0
2	50	0	0
3	50	80	0
4	26	80	1
5	26	15	1
6	10	15	1
7	10	12	0
8	12	12	0
9	12	0	0

Действуя аналогичным образом, постройте геометрию верхнего инструмента *Top Die* и заготовки *Workpiece*. Координаты точек для построения приведены в таблицах 4.11 и 4.12 соответственно.

Таблица 4.11 - Координаты точек для построения пресс-шайбы

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	26	0	0
3	26	20	0
4	0	20	0

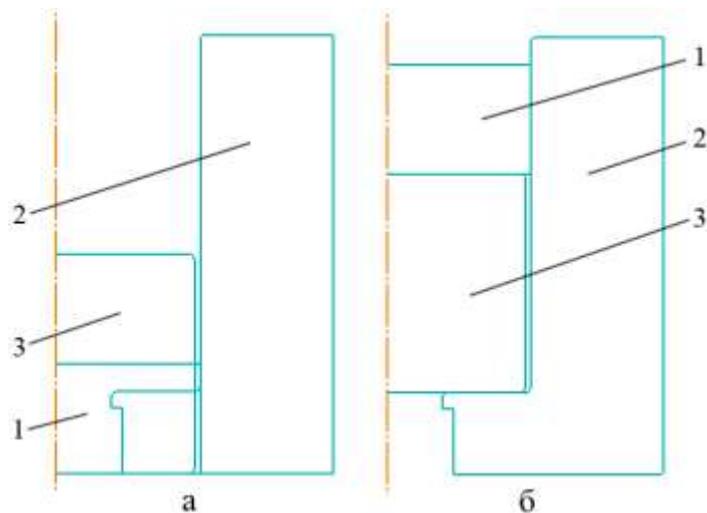
Таблица 4.12 - Координаты точек для построения заготовки

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	25	0	3
3	25	40	3
4	0	40	0

Конечная геометрия заготовки, пресс-шайбы и контейнера, совмещенного с матрицей, изображена на рисунок 4.79, а.

### Позиционирование объектов

Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 4.80), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения объектов относительно друг друга (рисунок 4.79, б) воспользуйтесь методом **Интерференция**.



1 – пресс-шайба; 2 – контейнер, совмещенный с матрицей; 3 – заготовка  
 Рисунок 4.79 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а)  
 и позиционирования (б)

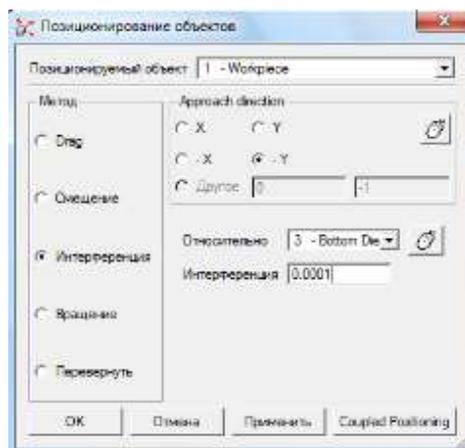


Рисунок 4.80 - Окно **Позиционирование объектов**

Сначала расположим заготовку и контейнер по отношению друг к другу. В строке **Позиционируемый объект** выберите *Workpiece*, а в строке **Относительно** – *Bottom Die* (рисунок 4.80). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «-Y». Для позиционирования нажмите кнопку **Применить**.

По аналогии осуществите позиционирование пресс-шайбы *Top Die* относительно заготовки *Workpiece*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунке 4.78, б.

## Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный». Установите температуру заготовки, для этого там же нажмите кнопку **Задать температуру** и в появившемся окне **Object Temperature** (температура объекта) введите 400°C (рисунок 4.81). Нажмите **ОК**.

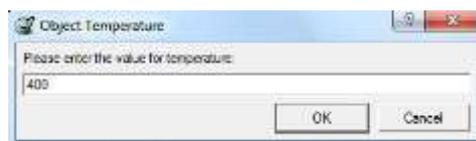


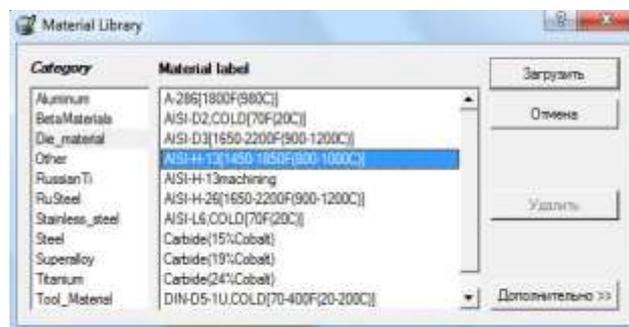
Рисунок 4.81 - Окно **Object Temperature**

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка**  на **Панели инструментов**, задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DIN-ALMgMn[500-900F(240-480C)]* (АД31) и нажмите кнопку **Загрузить** (рисунок 4.82, а).



а



б

Рисунок 4.82 - Окно **MaterialLibrary**

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Создание модели инструмента

Выделите в **Дереве объектов** контейнер *Bottom Die* и убедитесь в том, что в пункте **Общее** стоит тип объекта «Жесткий». Установите температуру контейнера, для этого там же нажмите кнопку **Задать температуру** и в появившемся окне введите 350°C. Нажмите **ОК**.

Чтобы разбить модель контейнера на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** на **Панели инструментов**, задайте количество конечных элементов 1500 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала контейнера, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите группу материалов «*Die\_material*» (инструментальные материалы) и марку стали «*AISI-H-13[450-1850F(800-1000C)]*», после этого нажмите кнопку **Загрузить** (рисунок 7, б).

Выделите в **Дереве объектов** пресс-шайбу *Top Die* и аналогичным образом установите температуру объекта (350°C), сгенерируйте конечно-элементную сетку (500 элементов) и задайте материал (*AISI-H-13[450-1850F(800-1000C)]*).

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 4.83).

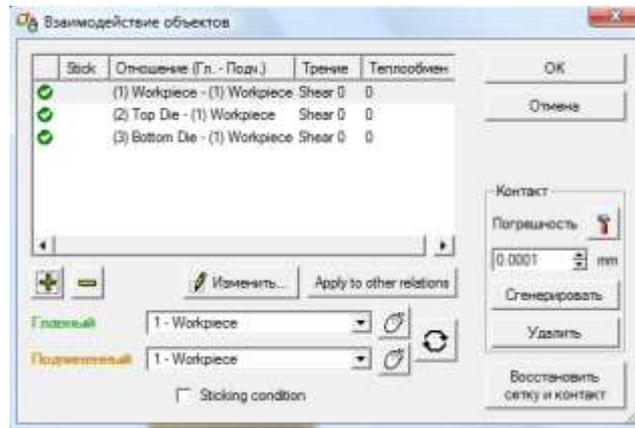
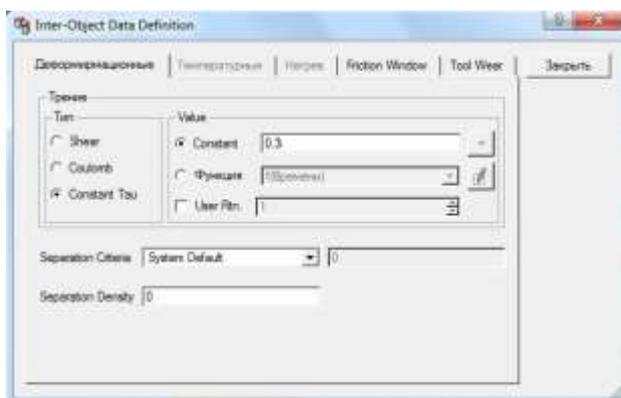


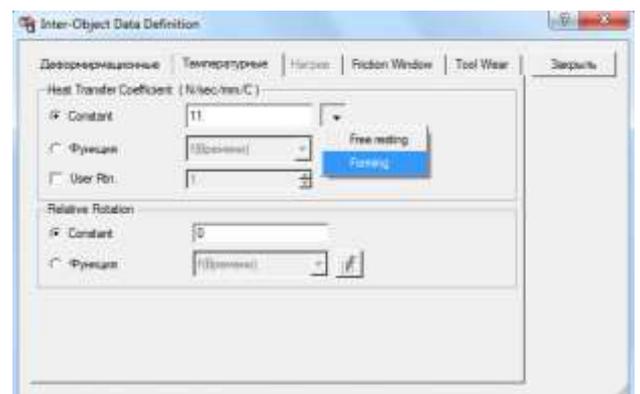
Рисунок 4.83 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «Constant Tau» (закон трения по Зибелю), укажите коэффициент трения равный 0,3 (рисунок 4.84, а).

Затем перейдите на вкладку **Температурные** и в блоке **Heat Transfer Coefficient** (коэффициент теплопередачи) выберите Forming (формоизменение), нажав на кнопку  (рисунок 4.84, б). Автоматически установится значение равное 11. Нажмите кнопку **Заккрыть**.



а



б

## Рисунок 4.84 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Т.к. коэффициенты трения и теплопередачи между заготовкой и обоими инструментами одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к остальным.

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта (рисунок 4.85). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

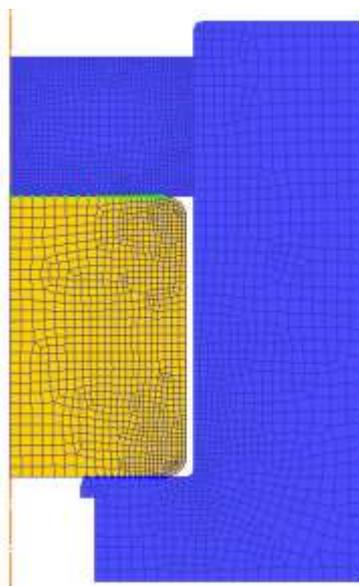


Рисунок 4.85 - Контактные поверхности между заготовкой, пресс-шайбой и контейнером

### **Задание движения верхнего инструмента**

Укажите ЛКМ *Top Die* (пресс-шайба) в **Дереве объектов** для приложения движения. Затем нажмите кнопку **Движение**  и, убедившись, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в строку **Constant value**, расположенную в самом низу, значение 1 мм/с (рисунок 4.86).

В соответствии с заданными условиями нагружения пресс-шайба будет

перемещаться вниз (-Y) с постоянной скоростью 1 мм/с.

### Задание числа шагов расчета

Для определения величины шага необходимо произвести замер ребра любого конечного элемента заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , а затем данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 4.87).

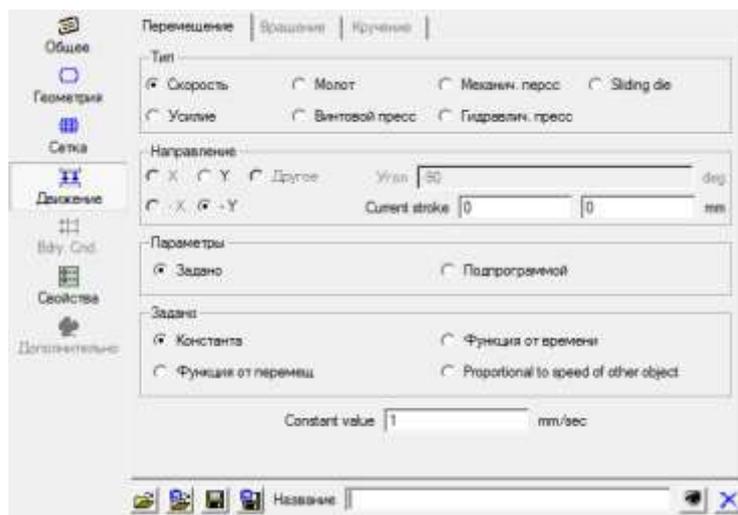


Рисунок 4.86 - Пункт **Движение** из **Панели инструментов**

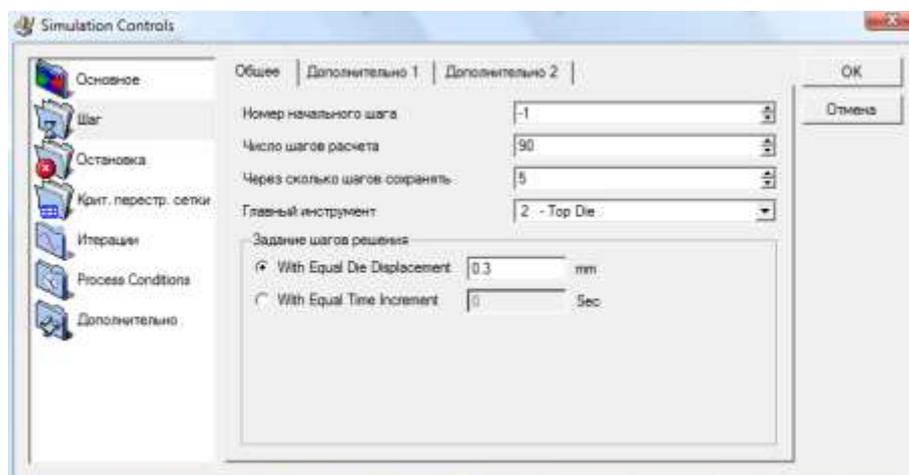


Рисунок 4.87 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Для того, что бы задать количество шагов необходимо перемещение главного инструмента (пресс-шайбы) разделить на размер шага и полученное значение, округленное до целого в большую сторону, внести в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 4.90).

Примем число шагов расчета равным 90, что соответствует перемещению пресс-шайбы на 27 мм и высоте пресс-остатка 13 мм при величине шага 0,3 мм.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 4.88). Для закрытия окна нажмите кнопку **Закрыть**.

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

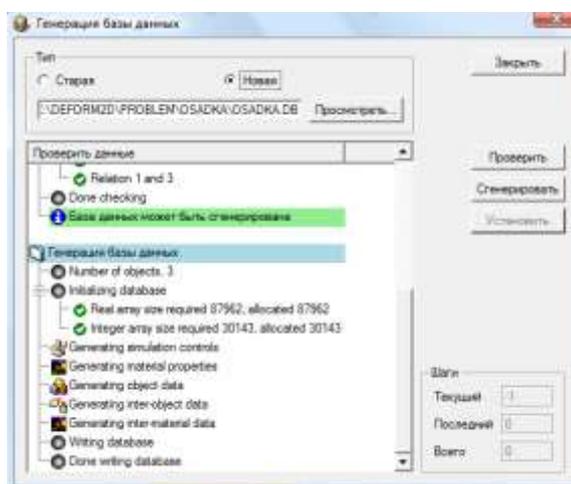


Рисунок 4.88 - Окно **Генерация базы данных**

## Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку . Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается, или полосой **Remeshing**, что говорит о перестроении конечно-элементной сетки.

## Анализ результатов моделирования

Анализ результатов моделирования заключается в сравнении напряженно-деформированного состояния, силовых и температурных параметров процесса холодного и горячего прессования через плоскую матрицу, при этом данные для холодного прессования берутся из предыдущей лабораторной работы.

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** .

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от способа прессования (рисунок 4.90). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*») (рисунок 4.89). В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

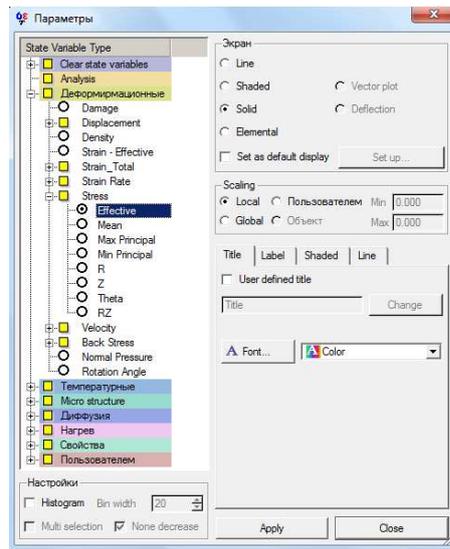
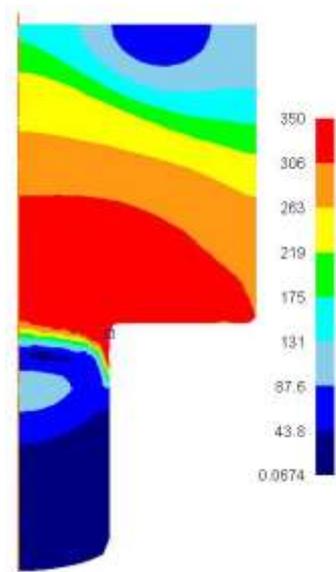
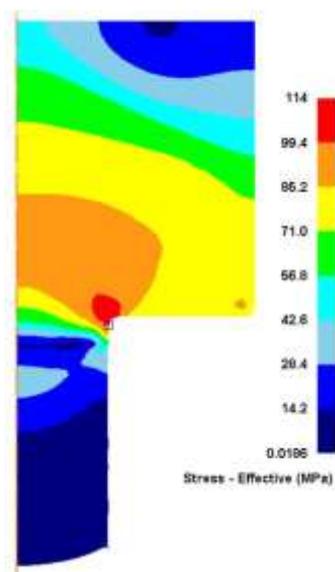


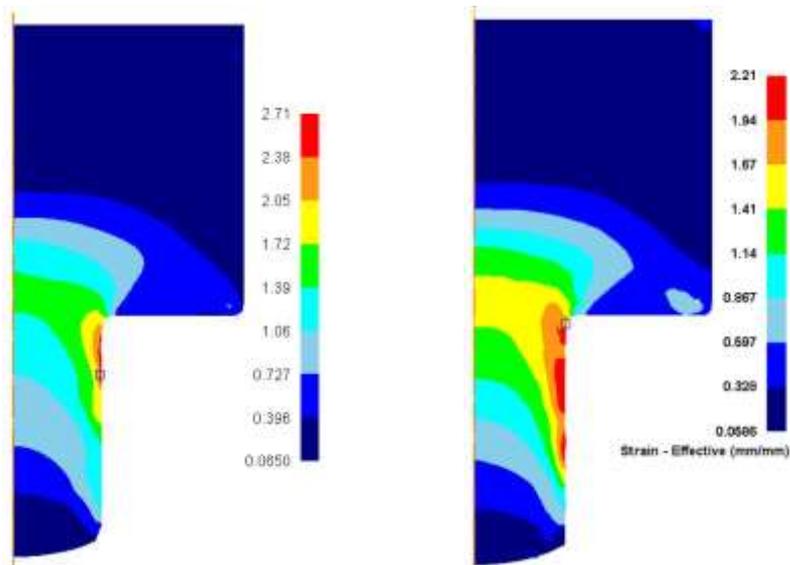
Рисунок 4.89 - Окно Параметры



а



б



в

г

а, в – холодное; б, г – горячее прессование

Рисунок 4.90 - Распределение интенсивности напряжений (а, б) и деформаций (в, г)

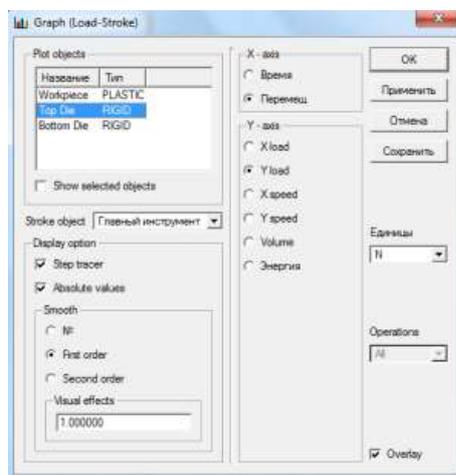
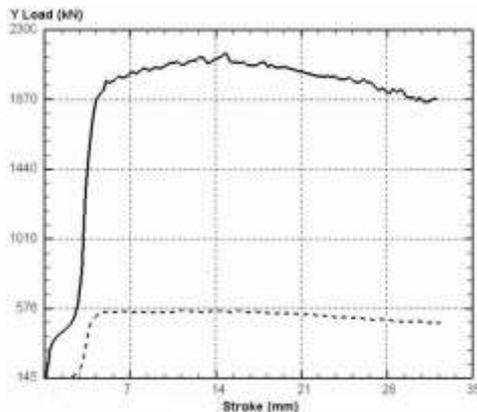


Рисунок 4.91 - Окно **Graph (Load-Stroke)**



----- – холодное; - - - - горячее прессование

Рисунок 4.92 - Изменение усилия прессования в зависимости от перемещения пресс-шайбы

Опишите характер изменения усилия прессования по стадиям процесса (рисунок 4.92). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 4.91) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение матрицы, поэтому в разделе **X-axis** установите «Перемещ». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

Дайте анализ изменения температуры заготовки, контейнера и пресс-шайбы при горячем прессовании (рисунок 18). Для отображения распределения температуры нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «Температурные» и подтип «*Temperature*». В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

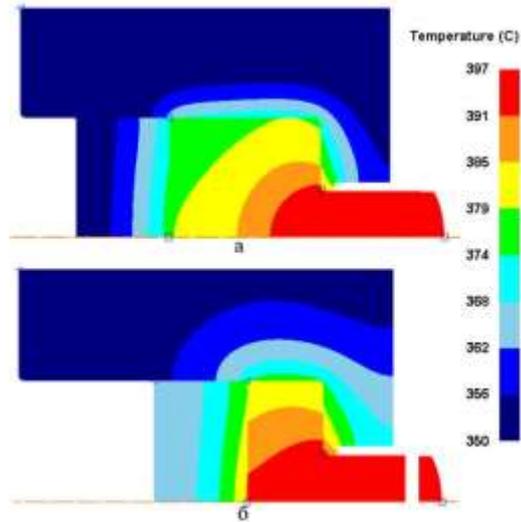
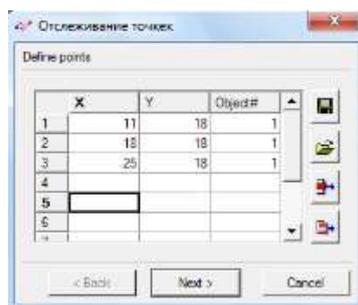


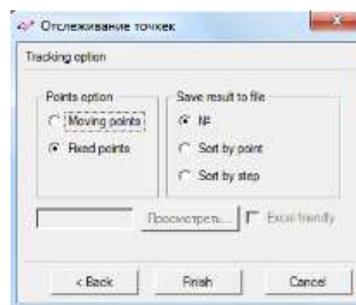
Рисунок 4.93 Распределение температуры при горячем прессовании

Определите тип горячего прессования по изменению температуры заготовки в ОПД (рисунок 4.95). Перейдите на первый шаг расчета (кнопка **First step** ) и отобразите распределение температуры, если оно не было уже установлено.

Затем нажмите на кнопку **Отслеживание точек**  и введите координаты точек, по которым будет отслеживаться изменение выбранного параметра (рисунок 4.94, а). Нажмите **Next**. Далее в разделе **Points option** установите «Fixed points» (рисунок 4.94, б) для фиксации точек. Нажмите **Finish**.



а



б

Рисунок 19. Окна **Отслеживание точек**

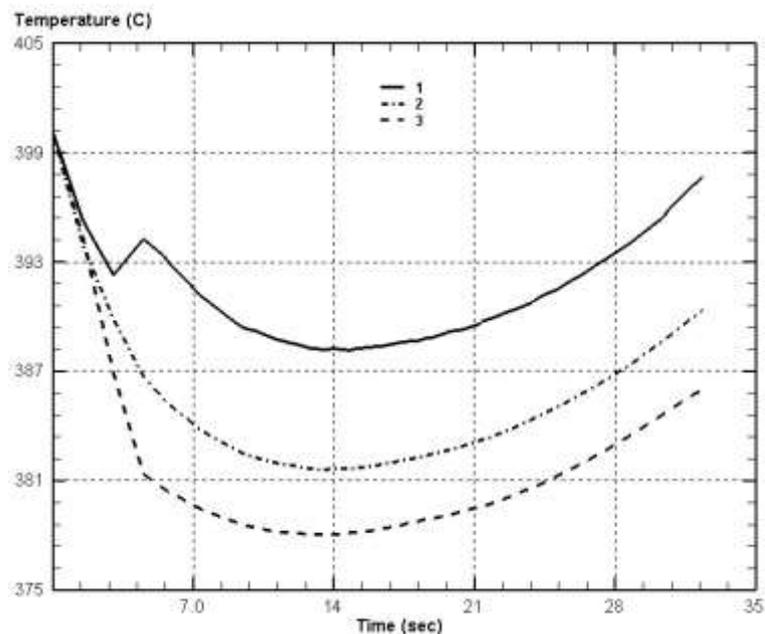


Рисунок 4.95 - Характер изменения температуры по ОПД в зависимости от времени процесса

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - способы прессования в зависимости от изменения температуры заготовки;
  - схема возникновения и расходования тепла при горячем прессовании;
  - уравнение теплового баланса при горячем прессовании.
4. Результаты моделирования холодного и горячего прессования:
  - компьютерная модель прессования через плоскую матрицу;
  - распределение тепла в заготовке и инструменте по стадиям прессования;
  - график усилия прессования в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций при прессовании;
  - график изменения температуры заготовки по ОПД.

5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Сравнение холодного и горячего прессования.
7. Выводы по проведенным исследованиям.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какое влияние на процесс прессования оказывает температура нагрева заготовки и инструмента?
2. Из каких соображений выбирают температурно-скоростной режим прессования?
3. Где наблюдается наибольший разогрев металла заготовки?
4. Как рассчитать разогрев металла в очаге пластической деформации?
5. Перечислите возможные случаи протекания процесса прессования в зависимости от изменения температуры в очаге пластической деформации?
6. Какое прессование называют изотермическим?
7. Что понимают под температурным интервалом прессования?
8. От каких факторов зависит выбор температурного интервала прессования?
9. Как назначают температурный интервал по диаграммам состояния и пластичности?
10. Как связаны между собой температура нагрева заготовки и скорости истечения?
11. Перечислите факторы, способствующие повышению скорости истечения?
12. Дайте классификацию методов прессования по температуре нагрева заготовки?
13. Перечислите достоинства и недостатки холодного прессования?
14. Почему горячее прессование наиболее распространено на производстве?
15. Что дает прессование с градиентным нагревом заготовки?

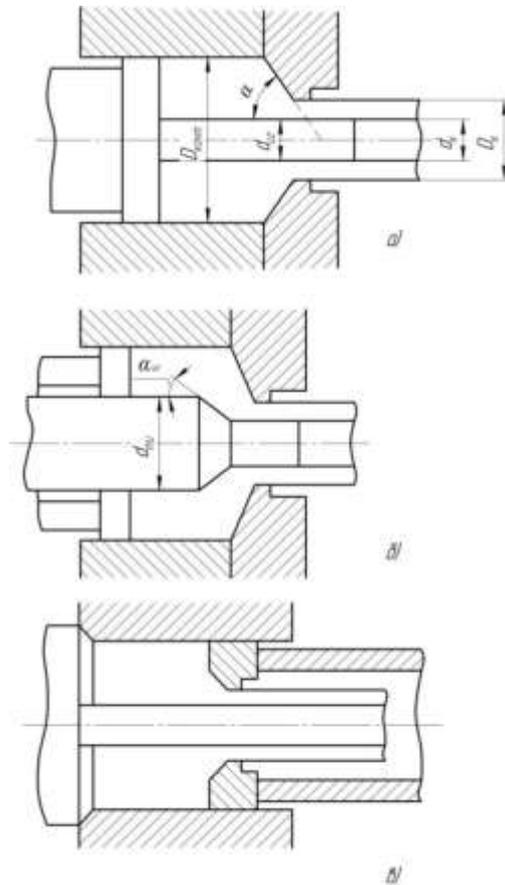
## 4.5 Прессование труб

Цель работы: исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе прессования труб с подвижной иглой из алюминиевого сплава АД31, развитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного продукта *DEFORM-3D*.

Сущность процесса прессования труб состоит в выдавливании труб заданных размеров из заготовки большего диаметра, помещенной в закрытый контейнер. Металл выдавливается через отверстие, образованное матрицей и иглой.

Прессованием получают трубы, которые или являются готовым полуфабрикатом (втулка), или служат заготовкой для дальнейшего пластического деформирования (прокатки, волочения). Проектирование технологии прессования после выбора метода прессования сводится к определению следующих основных показателей: размеров заготовки (слитка), температурного интервала, скорости прессования, коэффициента вытяжки, усиления прессования [44].

На рисунке 4.96 приведены наиболее распространенные схемы прессования труб: прессование с прямым и обратным истечением. Как правило, прессование труб ведется со смазкой иглы, причем применяется горячее прессование. Внутренний диаметр трубы формируется иглой. Она может быть неподвижной, конически-ступенчатой или подвижной цилиндрической. Чаще всего используется подвижная цилиндрическая игла, так как она обеспечивает необходимое качество внутренней поверхности трубы. Неподвижную иглу применяют, когда внутренний диаметр трубы невелик и прочность подвижной иглы недостаточна. При выборе метода прессования из всех возможных вариантов наиболее предпочтителен обратный метод горячего прессования на подвижной игле со смазкой. Этот метод обеспечивает максимальные производительность и выход годного. При этом структура и свойства пресс-изделия удовлетворяют требованиям ГОСТа [45].



а – прямой метод(игла подвижная), б – прямой метод(игла неподвижная),  
 в – обратный метод(игла неподвижная)  
 Рисунок 4.96 - Схема прессования труб

При прессовании труб, как правило, используют полые литые заготовки длиной  $L$  с наружным  $D$  и внутренним  $d$  диаметрами. Необходимо стремиться к выбору заготовки максимального объема. При этом следует учитывать следующие соотношения:

$$2,0 \leq L/D \leq 3,5 \text{ – при прямом методе,}$$

$$2,5 \leq L/D \leq 6,0 \text{ – при обратном методе.}$$

Рекомендуется выбирать диаметр заготовки с учетом достижения максимально возможной величины вытяжки и допустимого для данного типа прессы усилия прессования. Диаметр контейнера определяется по формуле

$$D_{\text{конт}} = \sqrt{(D_{\text{к}}^2) - d_{\text{к}}^2} \mu_{\text{опт}} + d_{\text{иг}}^2,$$

где  $D_k$  и  $d_k$  – наружный и внутренний диаметры трубы после прессования;  $d_{иг}$  – диаметр иглы, который выбирается равным  $d_k$ , если игла подвижная, или равным диаметру тела иглы  $d_{ти}$ , если неподвижная;  $\mu_{опт}$  – оптимальная вытяжка [51].

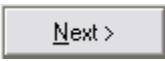
$$\mu_{опт} = \frac{D_{конт}^2 - d_{иг}^2}{D_k^2 - d_k^2}.$$

Характер течения металла при прессовании труб на игле по сравнению с характером при прессовании сплошных профилей отличаются большей неравномерностью, так как наличие трения металла об иглу выравнивает скорости истечения центральных и периферийных слоев. Равномерность истечения дает возможность использовать большие скорости прессования [46].

Как показывает практика, передняя торцевая часть заготовки, с которой начинается процесс прессования, выходит на наружную поверхность трубы. Задняя торцевая часть, наоборот, переходит на внутреннюю поверхность. Поэтому необходима тщательная подготовка всех поверхностей заготовки.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Запустите Deform-3D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой New problem , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей лабораторной работы (фамилия\_группа\_1) и затем нажмите .

### Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов.

Нам понадобятся следующие элементы: Заготовка, контейнер, игла, матрица, пресс-шайба. Поскольку заготовка создается в новой задаче по умолчанию необходимо будет создать лишь 4 новых объекта путем нажатия на

кнопку .

Переименуйте созданные объекты следующим образом:

- Top Die -> Needle (игла)
- Bottom die -> Press (пресс-шайба)
- Object 4 -> Matrix (матрица)
- Object 5 -> Container (контейнер)

Это упростит дальнейшую работу с элементами оснастки.

Приступим к созданию геометрии. Выберите иглу (Needle) в дереве объектов и перейдите к закладке геометрия . Мы создаем иглу длиной  $l = 50\text{mm}$  диаметром  $d = 12\text{mm}$ . Для создания всей оснастки мы будем пользоваться геометрическими примитивами. Нажмите кнопку геометрические примитивы в закладке геометрия. Из 3-х видов примитивов выберите 2-й (цилиндр) и задайте ему указанные параметры. После задания параметров нажмите кнопку Create (создать)

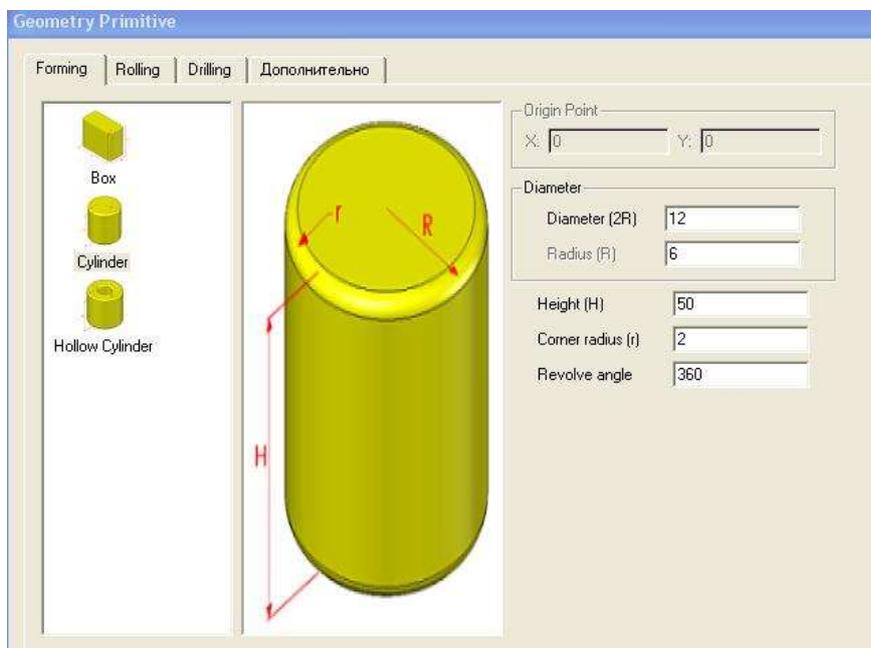


Рисунок 4.97 - Геометрические параметры иглы

Следующей создадим пресс-шайбу. Выберите объект Press в дереве объектов и вновь перейдите к закладке Геометрия/геометрические примитивы. Вновь выберите цилиндр и задайте ему параметры как указано на рисунок 4.98.

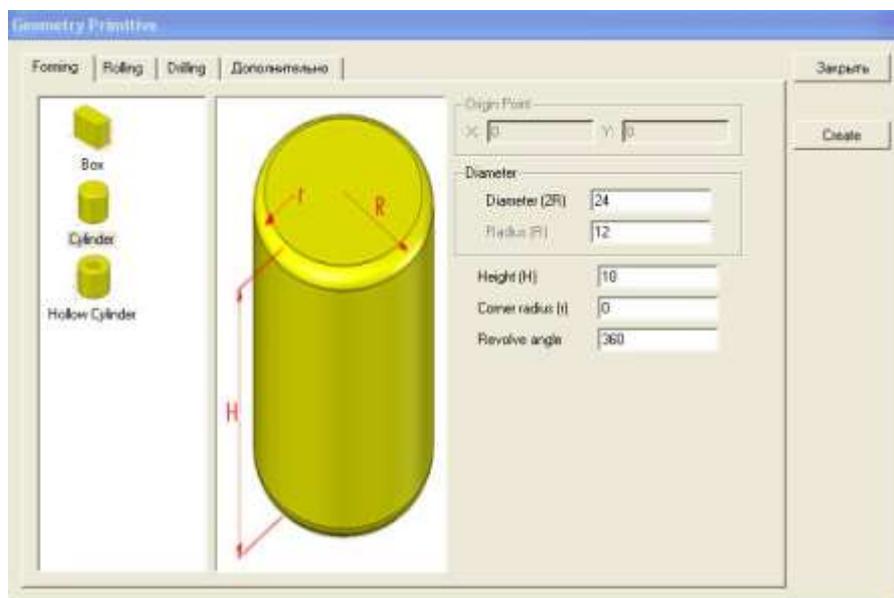


Рисунок 4.98 - Геометрические параметры пресс-шайбы

Перейдем к созданию матрицы. Выберите объект Matrix в дереве объектов, и перейдите к закладке Геометрия/геометрические примитивы. Выберите последний вариант примитива Hollow cylinder (цилиндр с отверстием). В данном случае необходимо указать величину скругления на внутренних стенках матрицы дабы снизить трение и вероятность разрыва заготовки во время прессования

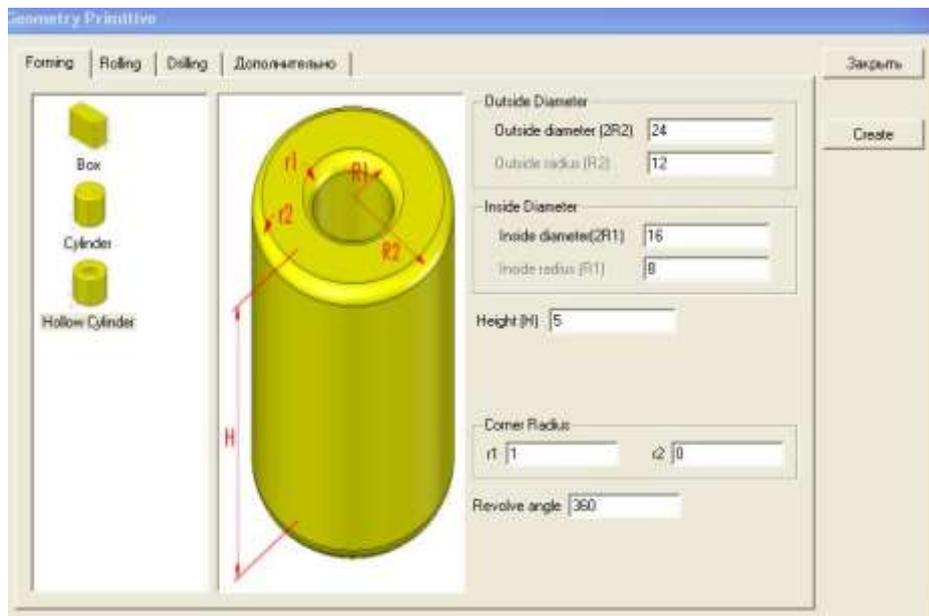


Рисунок 4.99 - Геометрические параметры матрицы

Последним элементом оснастки создаем контейнер. Выберите объект Container в дереве объектов, и перейдите к закладке Геометрия/геометрические примитивы. Выберите последний вариант примитива Hollow cylinder. Задайте параметры как указано на рисунок 4.100.

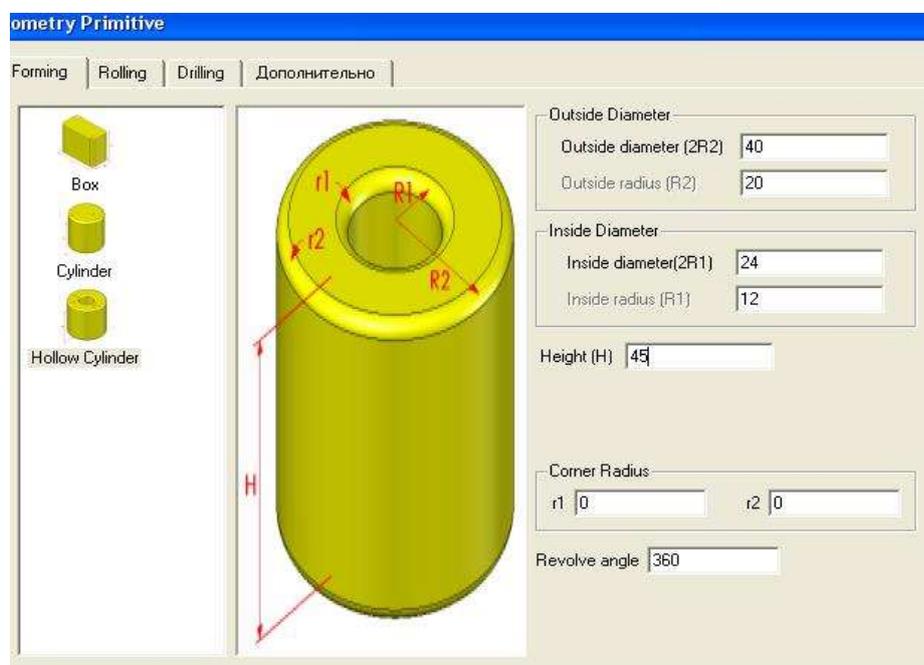


Рисунок 4.100 - Геометрические параметры контейнера

Созданная, но еще неспозиционированная оснастка будет выглядеть следующим образом.

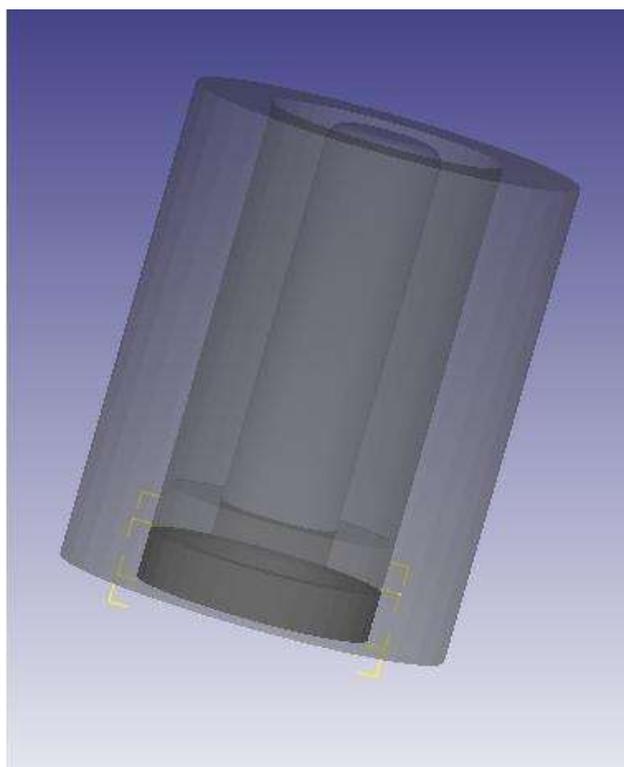
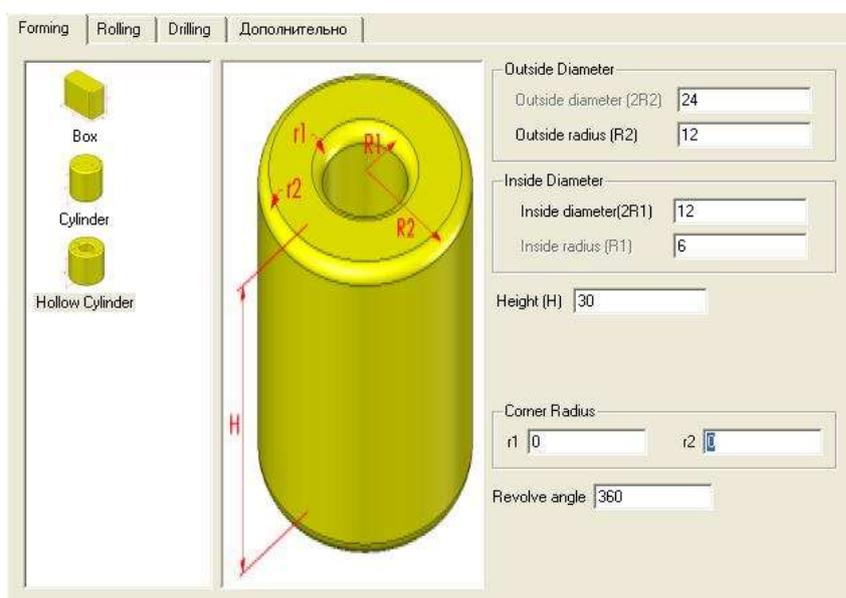


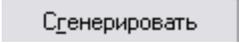
Рисунок 4.101 - Неспозиционированная оснастка

### Создание геометрии заготовки и сетки конечных элементов.

Выберите в дереве объектов вашу заготовку (Workpiece). Перейдите к пункту Геометрия/геометрические примитивы и создайте третий вид примитива, полый цилиндр со следующими параметрами



## Рисунок 4.102 - Геометрические параметры заготовки

После задания геометрии заготовки перейдите к закладке сетка . В закладке количество элементов установите значение 30000 элементов и нажмите .

### Задание материала заготовки

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку , откроется основное окно объекта, показанное на рисунок 4.103.

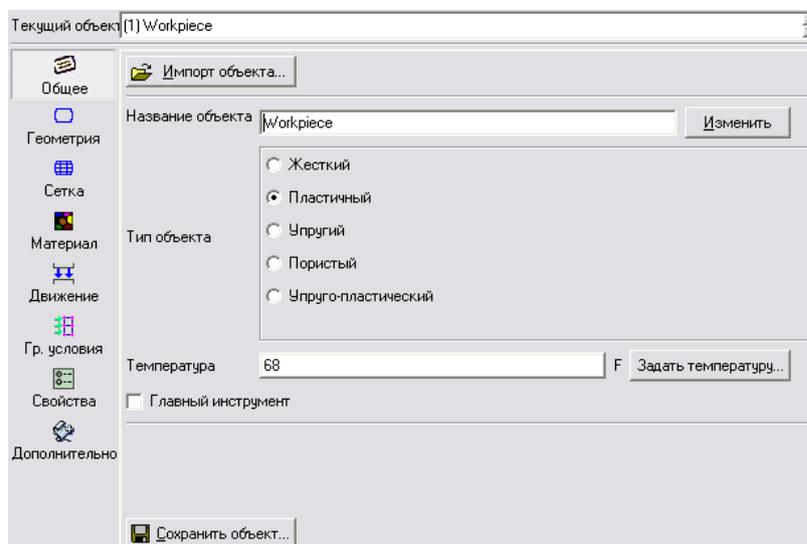


Рисунок 4.103 - Основное окно объекта

Убедитесь что для заготовки установлены свойства пластического объекта.

Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку , откроется окно «материал», показанное на рисунок 4.104.

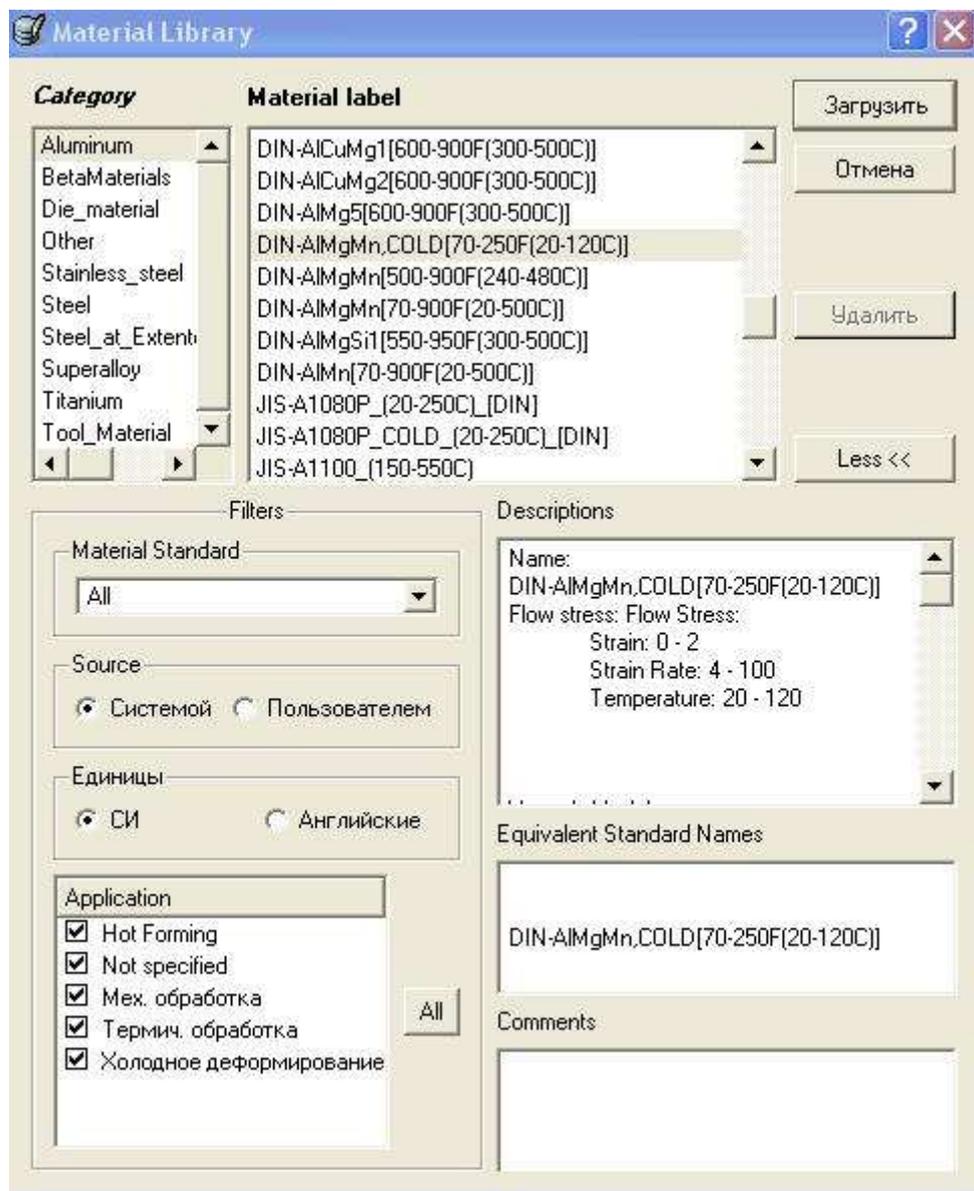


Рисунок 4.104 - Окно «Материал»

В том же Aluminum выберите DIN-AlMgMn,COLD[70-250F(20-120C)] (АД31) и задайте материал кнопкой загрузить.

### Позиционирование

Нажмите на кнопку позиционирование объектов в верхней панели закладок . Перейдите к закладке Интерференция. Первым шагом будет интерференция заготовки относительно пресс шайбы. Установите параметры смещения как указано на рисунок И нажмите применить

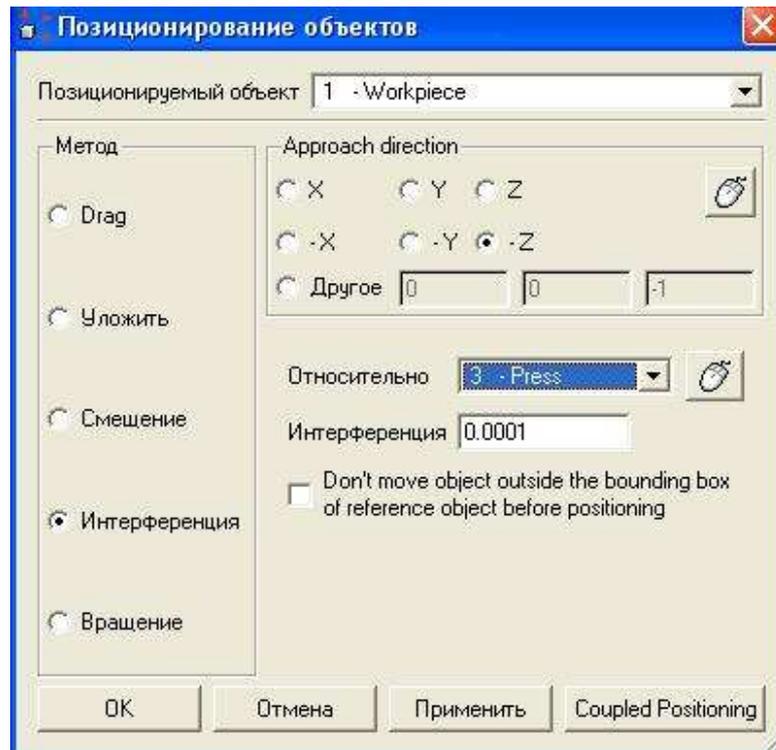


Рисунок 4.105 - Позиционирование заготовки

Следующим шагом разместим матрицу относительно заготовки. Установите параметры интерференции как указано на рисунок 4.106.

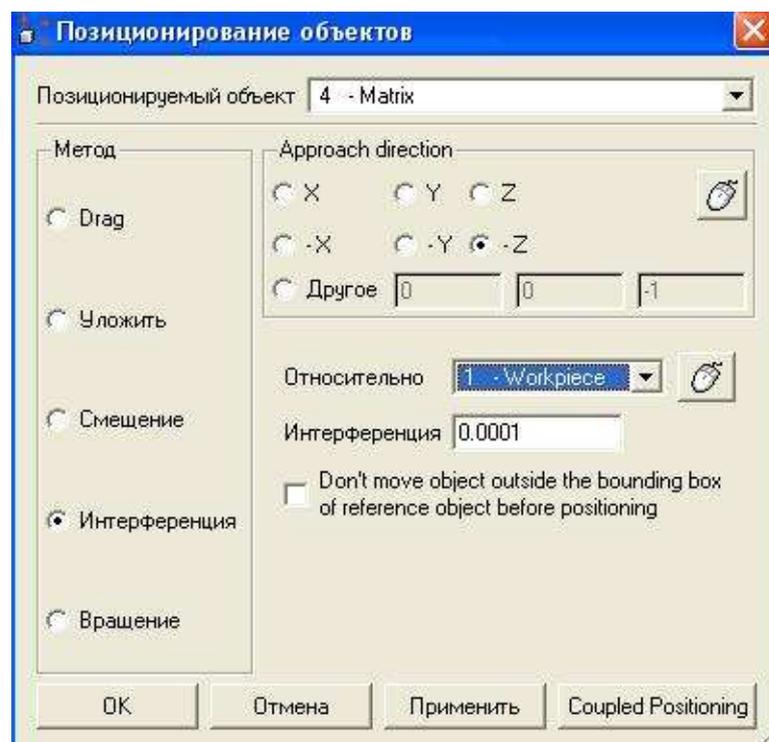


Рисунок 4.106 - Позиционирование матрицы

После этого нажмите ОК, чтобы изменения в позиционировании сохранились.

Теперь заготовка и оснастка спозиционированы. Выглядит это следующим образом.

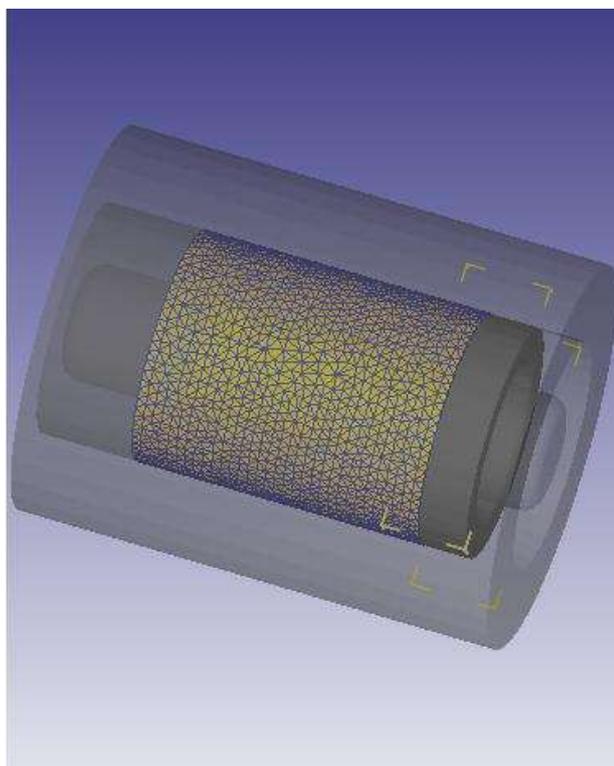


Рисунок 4.107 - Спозиционированная оснастка

### Задание движения

Выделите в дереве объектов матрицу иглу и перейдите во вкладку

движение  . Нам необходимо задать движение по оси, в данном случае ось Z. Скорость движения инструмента будет иметь значение 1мм в секунду. Затем таким же образом выберите в дереве объектов пресс-шайбу (press) и точно так же задайте ей параметры движения.

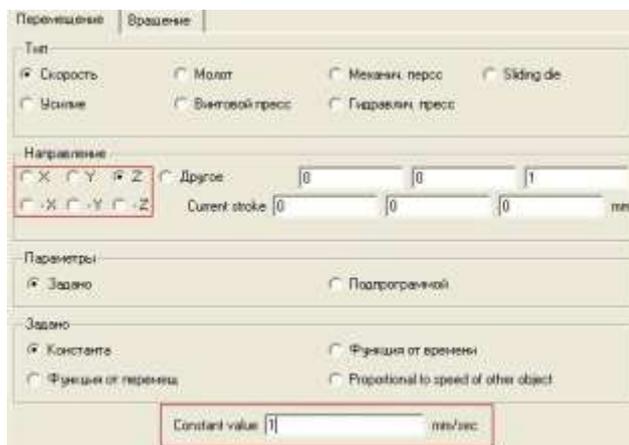
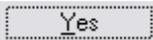


Рисунок 4.108 - Задание скорости движения пресс шайбы и иглы

### Назначение связи между объектами.

Для определения связи между объектами нажмите кнопку . Так как никакие отношения в настоящее время не определены, появится сообщение, спрашивающее, хотите ли вы, чтобы система добавила отношения по умолчанию за вас.

Нажмите кнопку .

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными четырьмя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется между четырьмя жёсткими инструментами. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как Подчинённый объект.

Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений. Так как в этом расчете не будет приниматься во внимание никакой передачи температуры, единственное свойство, которое должно быть определено – трение.

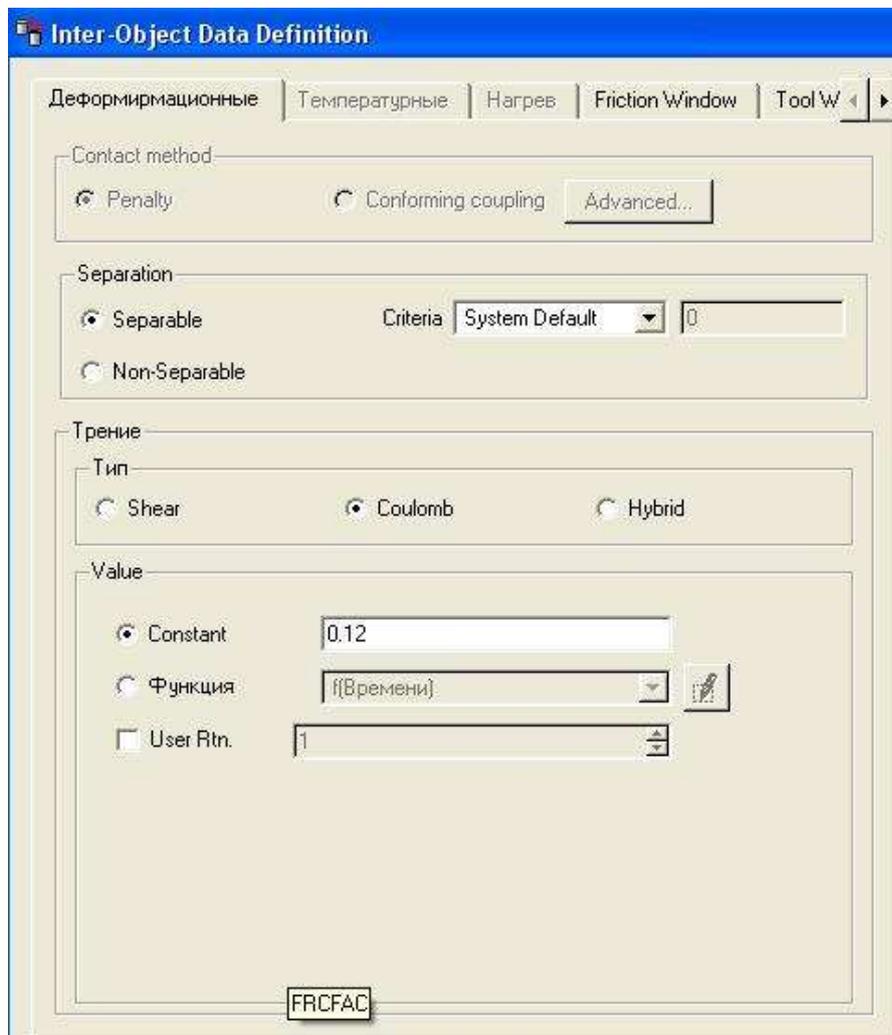
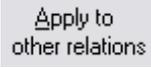


Рисунок 4.109 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Выберите коэффициент трения 0.12. Теперь задайте закон трения по Зибелю (Constant Tau).

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна INTER-OBJECT.

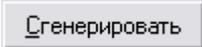
Теперь, когда отношения между верхним инструментом и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой и остальным инструментом.

Так как коэффициент трения между заготовкой и всеми инструментами одинаков, кнопкой  можно скопировать свойства первого отношения во все остальные. После этого, оба отношения будут иметь коэффициент трения 0,12.

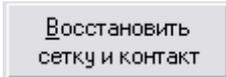
Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом (подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы находящиеся на линии контакта не попадут в контакт и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан в окне Экран, изображенный на рисунок15, как цветные точки на поверхностях заготовки.

**Примечание:** если задано слишком большое значение точности при создании контакта и сетка заготовки разрушена, кнопка  может отменить создание контакта.

Когда контакт создан, нажмите на кнопку . Следом закроется окно «взаимодействие объектов».

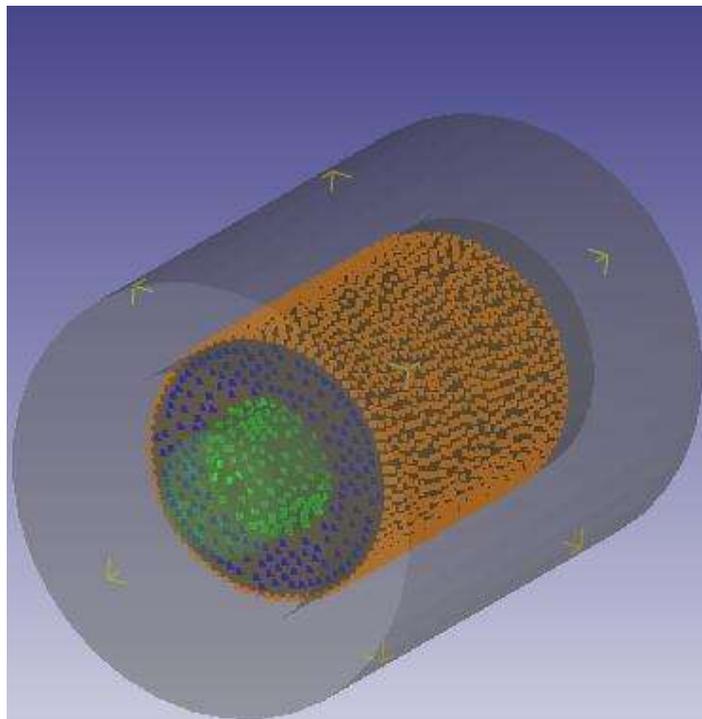


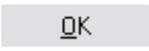
Рисунок 4.110 - Поверхность контакта по всему объему заготовки

### Установка шагов расчета

Нажмите кнопку Simulation controls  в верхней панели закладок.

Нажмите  Основное и убедитесь, что единицы измерения установлены в СИ.

Нажмите  Шаг для просмотра управления временными шагами. Убедитесь, что номер начального шага установлен как -1. Отрицательный знак говорит о том, что это шаг, записанный препроцессором (шаги решения записанные в базу данных в процессе расчета будут положительны). Установите число шагов расчета 100. Установите приращение шага при сохранении 5 («через сколько шагов сохранять»). Каждый пятый шаг решения будет записан в базу данных. Установите главный инструмент TopDie. Обычно главным инструментом является тот, который перемещается при расчете, и он используется для контроля шага и остановки.

Давайте установим размер шага как 0,3 мм/шаг, а число шагов 75. Нажмите кнопку  ОК когда закончите, чтобы закрыть окно управления расчётом.

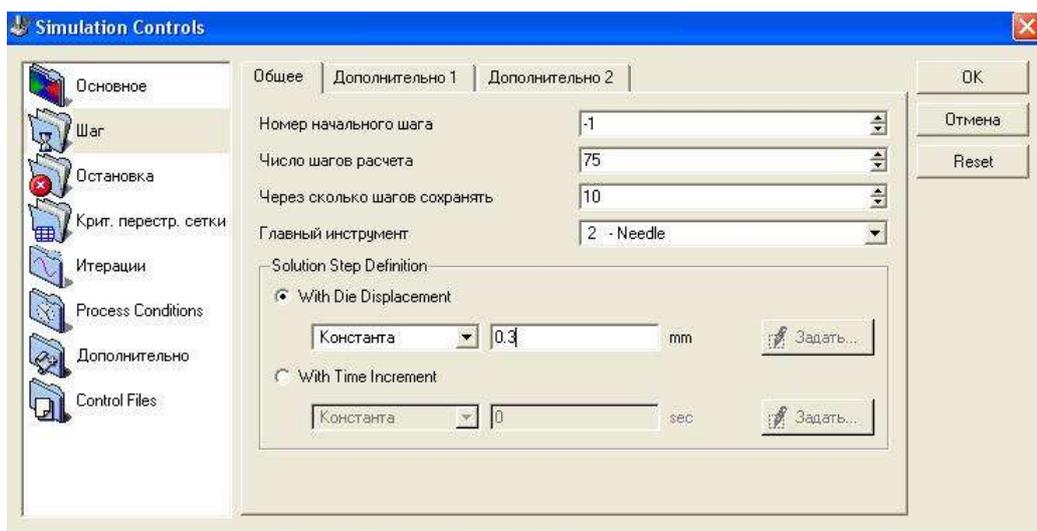


Рисунок 4.111 - Окно «Настройки задачи»

## Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных нажав кнопку , нажмите кнопку **Проверить**, когда появится сообщение  База данных может быть сгенерирована нажмите кнопку **Сгенерировать** и начнётся генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на рисунке 4.112.

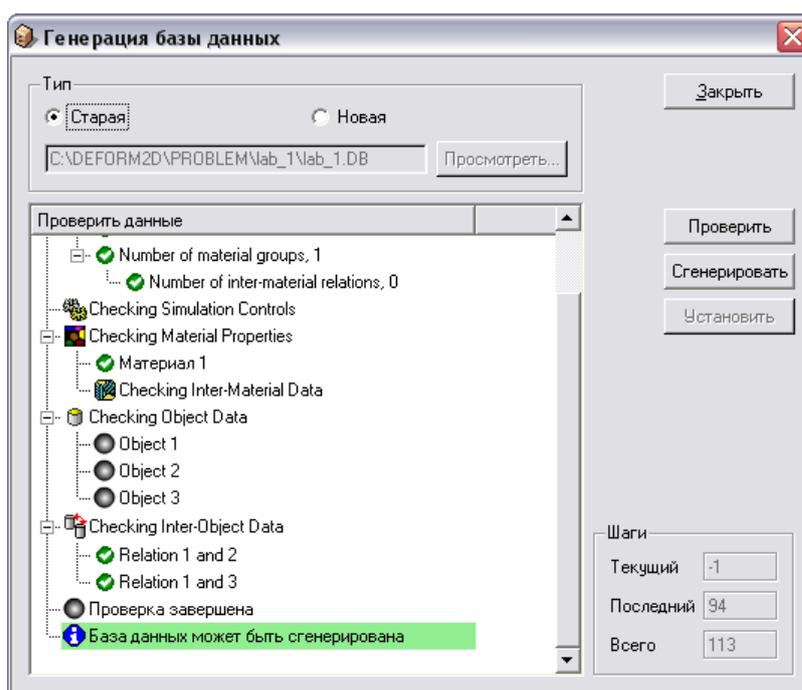


Рисунок 4.112 - Окно «Генерация базы данных»

При появлении сообщения  Запись базы данных завершена, можете закрыть Deform3D – Preprocessor.

### Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой [Старт](#) или .

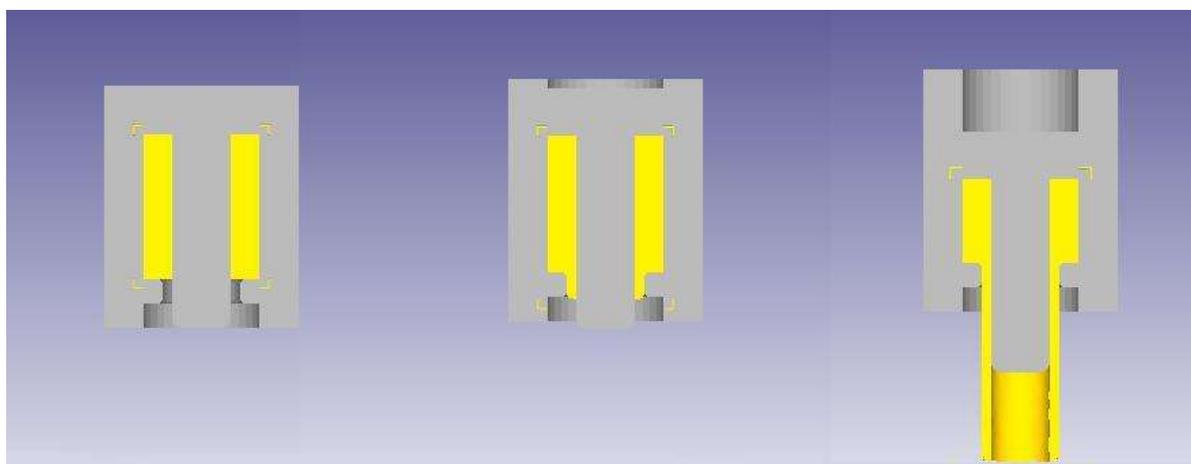
Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
*****Message*****  
Simulation is completed and stopped at the user specified time step .
```

После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой  в правом нижнем углу окна.

### Просмотр результатов

Посмотрите поэтапно процесс прессования. Определите моменты перехода между стадиями прессования. Стадии процесса прессования представлены на рисунке 4.113.



а)-сборка оснастки, б)-осадка, в)-установившийся процесс

Рисунок 4.113 - Стадии процесса прессования

Для того чтобы рассмотреть данный процесс в разрезе нажмите на кнопку разрез (Slice)  в верхней панели закладок. Откроется меню разреза. Затем нажмите ЛКМ примерно на центр иглы и вы получите разрез.

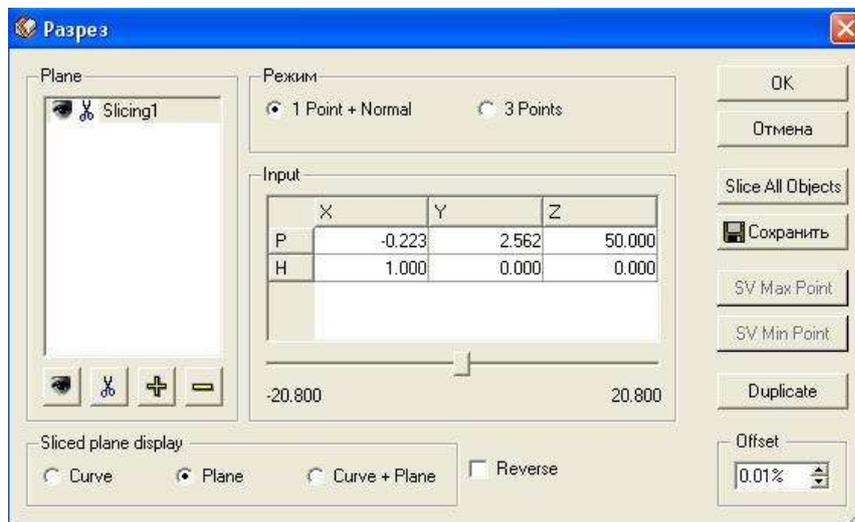


Рисунок 4.114 - Задание разреза

После этого нажмите кнопку ОК.

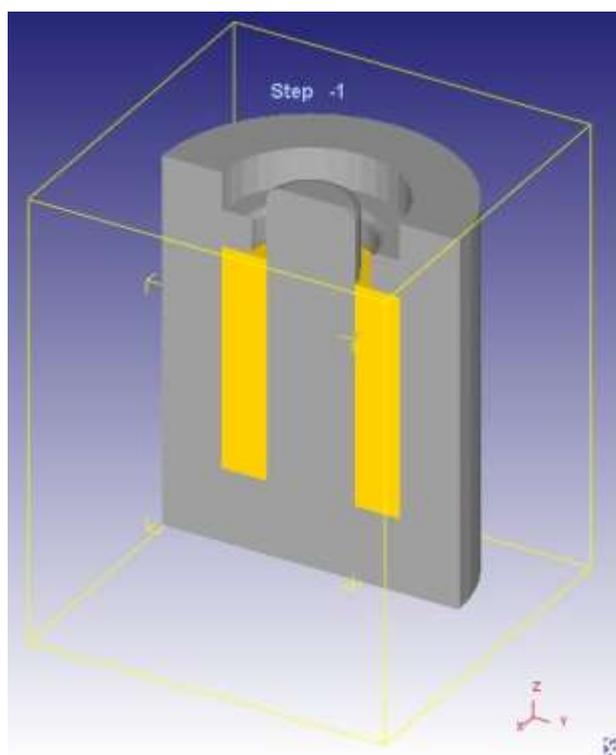


Рисунок 4.115 - Вид в разрезе

### Построение индикаторной диаграммы

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке. Выберите только пресс шайбу (Object4).

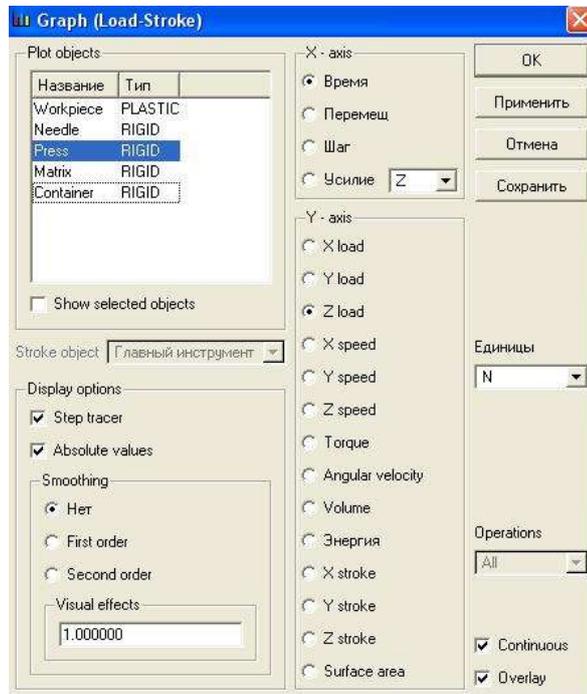


Рисунок 4.116 - Окно построения графиков «Graph(Load-Stroke)»

В основном окне появится индикаторная диаграмма, изображенная на рисунке.

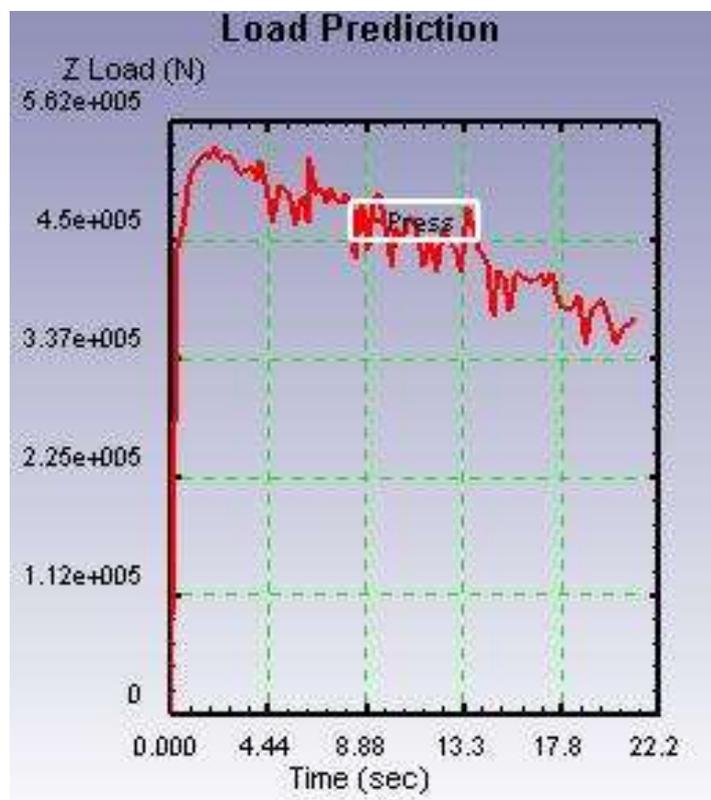


Рисунок 4.117 - Индикаторная диаграмма

Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide). Обратите внимание на график усилия перемещения, на его характер. Приблизительно на 5-7м шаге график достигает своего пика, а затем идет на спад. Связано это с тем что изначально нам необходимо преодолеть область упругих деформаций и начать пластическое течение в металле. После того как пластическое течение в металле заготовки началось, график начинает идти на спад. С каждым шагом значение усилия становится все меньше. Связано это с тем что объем металла контактирующего с оснасткой, а следовательно и сопротивление трения с каждым шагом уменьшается. Поэтому и уменьшается усилие прессования.

Сделайте видимой только заготовку. Выберите ее в дереве объектов и нажмите кнопку Режим одиночного объекта (Single object mode) . Затем в верхней панели инструментов нажмите на кнопку Параметры . Вам откроется большое меню. Выберите закладку Stress(напряжение), а в ней закладку Effective. После чего нажмите кнопку принять(Apply).

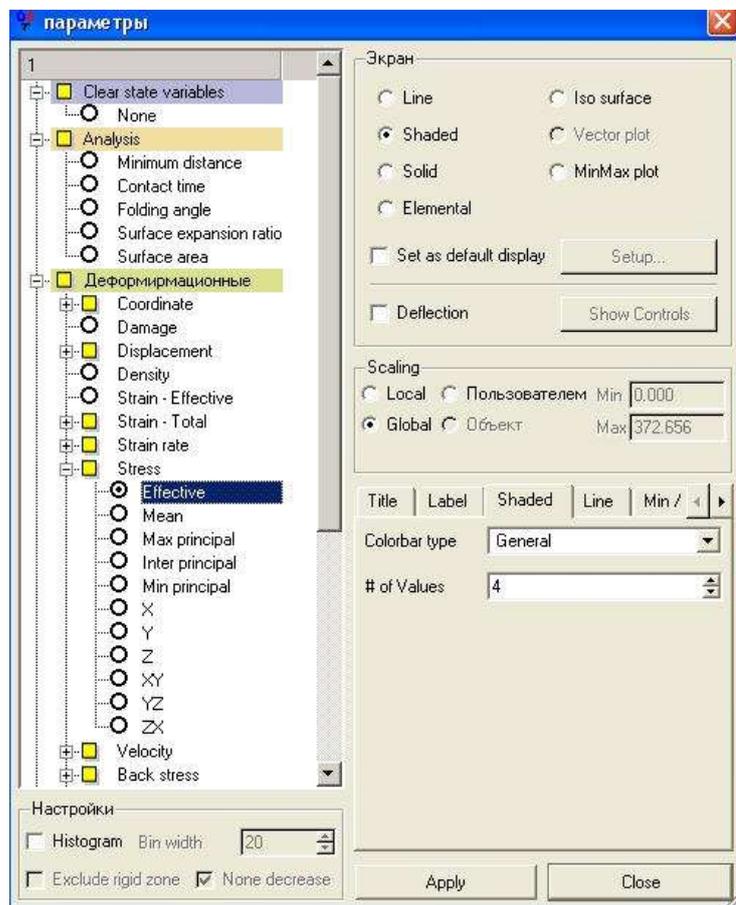


Рисунок 4.118 - Окно «Параметры процесса»

Вы увидите как распределяются внутренние напряжения в заготовке в каждом шаге процесса прессования.

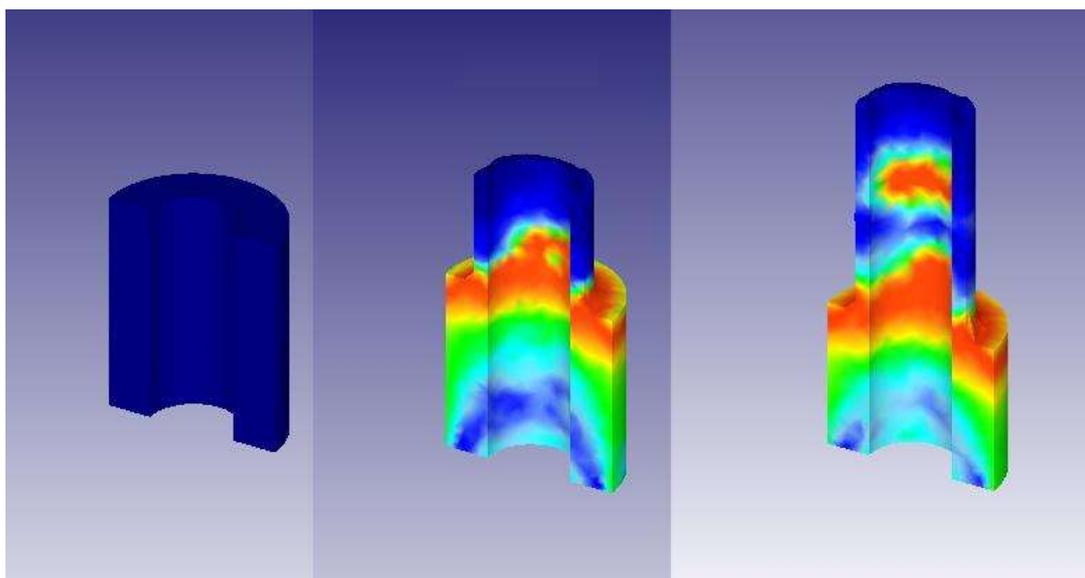


Рисунок 4.119 - Процесс прессования в разрезе с внутренними напряжениями

Если вы хотите вернуться к стандартному просмотру процесса, т.е. избавиться от отображения распределенных напряжений и разреза выберите заготовку в дереве объектов. В подразделе заготовки вы увидите 4 параметра: Mesh, Folding, State Var, Slice.

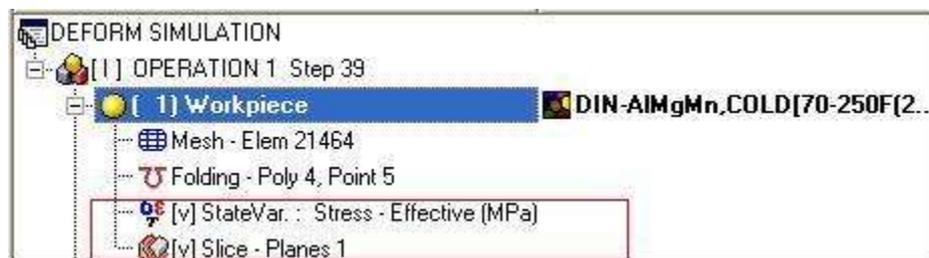


Рисунок 4.120 - Удаление разреза и отображения внут. напряжений

Кликните правой кнопкой мыши на параметр State Var и в открывшемся окне на кнопку скрыть (Hide state variable) . То же самое повторите с параметром Slice.

Чтобы увидеть как происходит течение металла в слитке в период прессования, постройте векторную диаграмму скоростей течения. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и в разделе Скорости (Velocity) поставьте галочку напротив Основных скоростей (Total Vel). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив векторного отображения (Vector Plot). Нажмите  и . Теперь вы можете увидеть как изменяется скорость движения отдельных областей заготовки за весь период прессования.

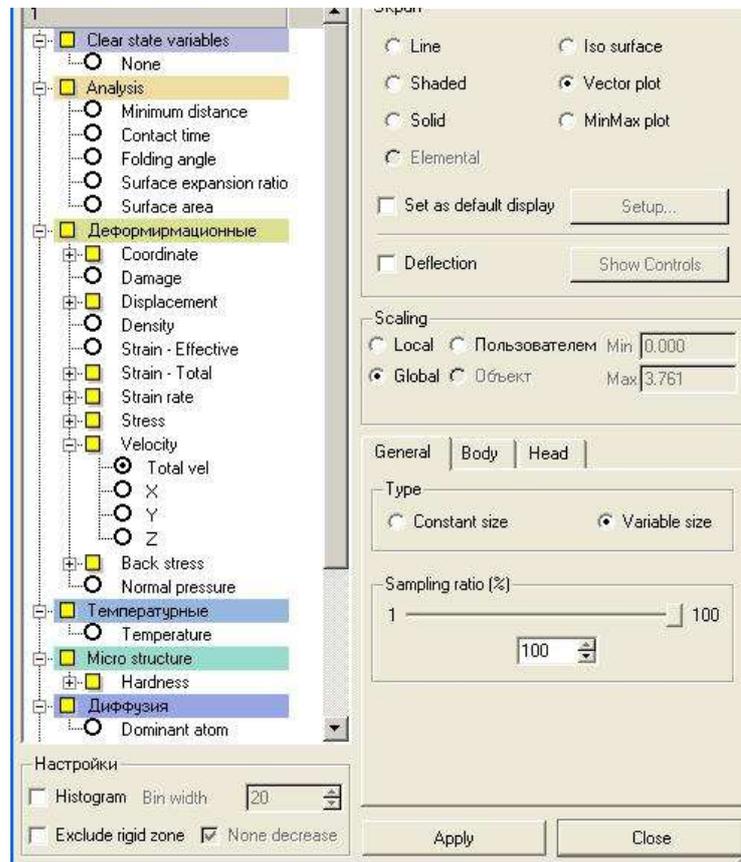


Рисунок 4.121 - Задание отображения вектора течения металла

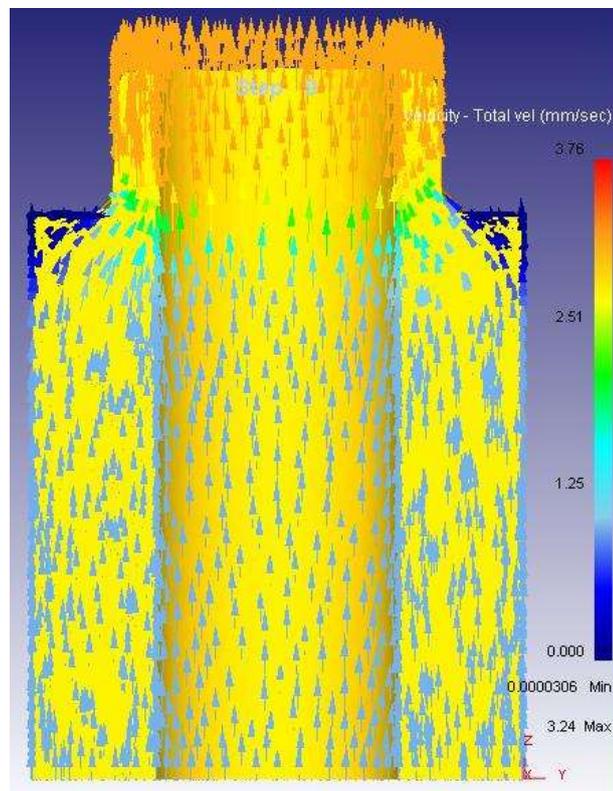


Рисунок 4.122 - Задание отображение вектора течения металла

## **Содержание отчёта**

1. Схема прямого прессования труб из полых заготовок.
2. Индикаторная диаграмма.
3. Распределение интенсивности деформаций.
4. Распределение интенсивностей напряжений.
5. Сетка течения.
6. Векторная диаграмма скоростей.

## **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение процесса прессования труб и его сущности.
2. Назовите области применения прессования труб.
3. Перечислите этапы процесса прессования труб.
4. Покажите очаг пластической деформации.
5. Покажите в каких областях образуются зоны застоя.
6. Какой закон трения используется в расчете процесса?
7. Как задать геометрию инструмента?
8. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?
9. Как показать вектор течения металла?

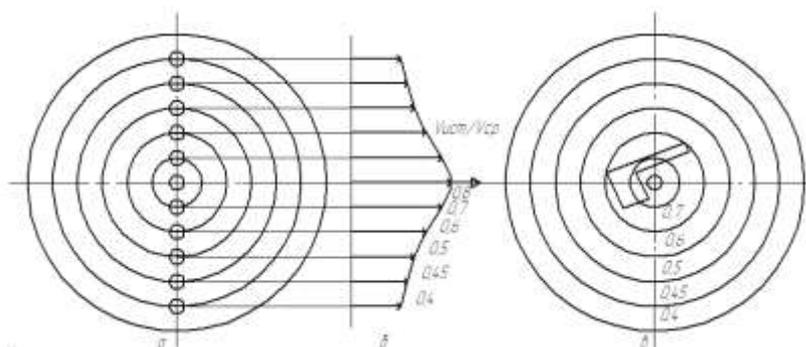
## 4.6 Прессование профиля сложного поперечного сечения

**Цель работы:** исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе прямого прессования профиля сложного поперечного сечения "двутавр"; привитие практических навыков работы в программах *DEFORM-3D* и *Компас-3D*.

### Краткие теоретические сведения

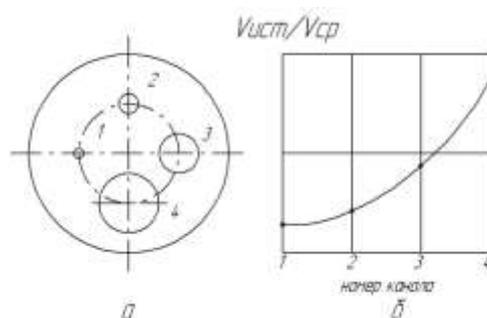
Большую часть профилей, получаемых прессованием, составляют профили некруглых поперечных сечений. Их прессуют из цилиндрической заготовки. Нарушение геометрического подобия между поперечными сечениями заготовки и прессуемого профиля, наличие реактивных сил трения между заготовкой и контейнером приводит к неравномерному истечению различных участков некруглого профиля [45].

Из рисунка 4.123 видно, что относительные скорости истечения в каналы равного диаметра, лежащие на разных расстояниях от центра матрицы различны. Каналы, расположенные около оси прессования, имеют большую скорость истечения, чем каналы, расположенные около контейнера. Основная причина такой неравномерности скоростей истечения – реактивные силы трения между заготовкой и контейнером, тормозящие движению периферийных слоев заготовки. Из рисунка 4.124 видно, что относительная скорость истечения из равноудаленных каналов от центра матрицы возрастает с увеличением площади сечения канала.



а – многоканальная матрица, б – поле скоростей,  
в – семейство линий равных скоростей

Рисунок 4.123 - Распределение относительных скоростей истечения при прессовании в многоканальную матрицу



а – многоканальная матрица, б – поле скоростей

Рисунок 4.124 - Распределение относительных скоростей истечения при прессовании в многоканальную матрицу

Для рационального положения канала для прессования несимметричного профиля на зеркале матрицы можно использовать линии равных скоростей (рисунок 4.123, в). В каждом кольце относительную истечению скорость считаем одинаковой. На полученную сетку накладываем поперечное сечение профиля в натуральную величину. Перемещая профиль по зеркалу матрицы, можно добиться такого положения, в котором разность скоростей истечения в крайних точках сечения достигнет минимальных значений. Это положение профиля и будет рациональным. В настоящее время эту задачу выполняют компьютеры [46].

За счет расположения канала на зеркале матрицы не всегда удается

добиться одинаковой скорости истечения во всех точках поперечного сечения профиля. Поэтому найдя рациональное положение канала, регулируют скорость истечения, изменяя длину калибрующего пояска и угол наклона его образующих.

Таким образом, калибрующий поясок выполняет не только функцию повышения точности геометрии наружного контура прессуемого профиля, но и выравнивания скоростей истечения отдельных элементов поперечного сечения профиля. При малой длине пояска облегчается истечение металла из канала матрицы, при большой длине – затрудняется [50].

Значительное увеличение длины пояска не всегда эффективно для выравнивания скоростей истечения, так как отпрессованный профиль в канале матрицы перестает соприкасаться с поверхностью калибрующего пояска. Это происходит в результате остывания готового профиля. На практике установлено, что длина калибрующего пояска более толщины прорези не всегда эффективна [47].

Дополнительное выравнивание скоростей истечения по поперечному сечению прессуемого профиля достигается путем применения сходящихся калибрующих поясков, рисунок 4.125.

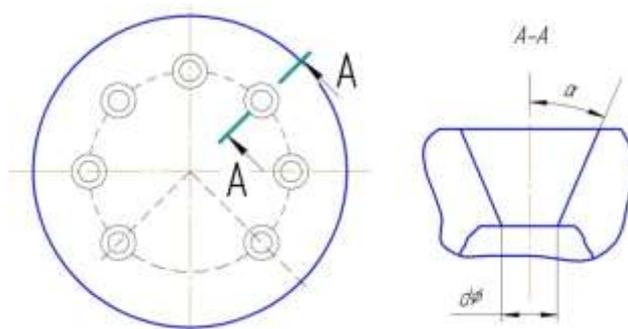


Рисунок 4.125 - Распределение относительных скоростей истечения круглых профилей (а) в многоканальную матрицу (б)

Рассмотрим результаты прессования круглых профилей одного диаметра  $d$  в многоканальную матрицу на рисунке 4.125. Все каналы равноудалены от оси прессования. Изменяется только угол наклона пояска  $\alpha$ . Из рисунок 4.125

видно, что сходящиеся пояски с  $\alpha$  до  $12^\circ$  оказывают торможение, уменьшается скорость, а при  $\alpha > 12^\circ$  наоборот, увеличивается скорость истечения. Это связано с увеличением объема металла, питающего профиль.

Одним их эффективных способов выравнивания скоростей истечения отдельных элементов профиля является применение форкамер, поперечное сечение которых подобно поперечному сечению прессуемого профиля (рисунок 4.127).

Если сечение профиля разбить на участки равной ширины, то более «массивные» участки и участки, расположенные около оси прессования имеют большую скорость истечения. Поэтому канал на зеркале матрицы необходимо расположить так, чтобы тонкие участки профиля размещались ближе к центру матрицы, а «массивные» участки дальше от центра матрицы [48].

Исходя из сложности конфигурации и площади поперечного сечения профиля задаются количеством каналов в матрице. Каналы стремятся располагать симметрично относительно осей. Если матрица одноканальная, то канал на зеркале матрицы располагают следующим образом:

1. При наличии двух осей симметрии профиля центр тяжести его совмещают с геометрическим центром матрицы.
2. При одной оси симметрии и толщине полок профиля, незначительно отличающихся друг от друга, центр тяжести также совмещают с геометрическим центром матрицы
3. Асимметричные профили и профили с одной осью симметрии, но со значительной разницей в симметрии полок, располагают таким образом, чтобы тонкие элементы были максимально приближены к центру матрицы [49].

Примеры расположения каналов на зеркале матрицы приведены на рисунок 4.126.

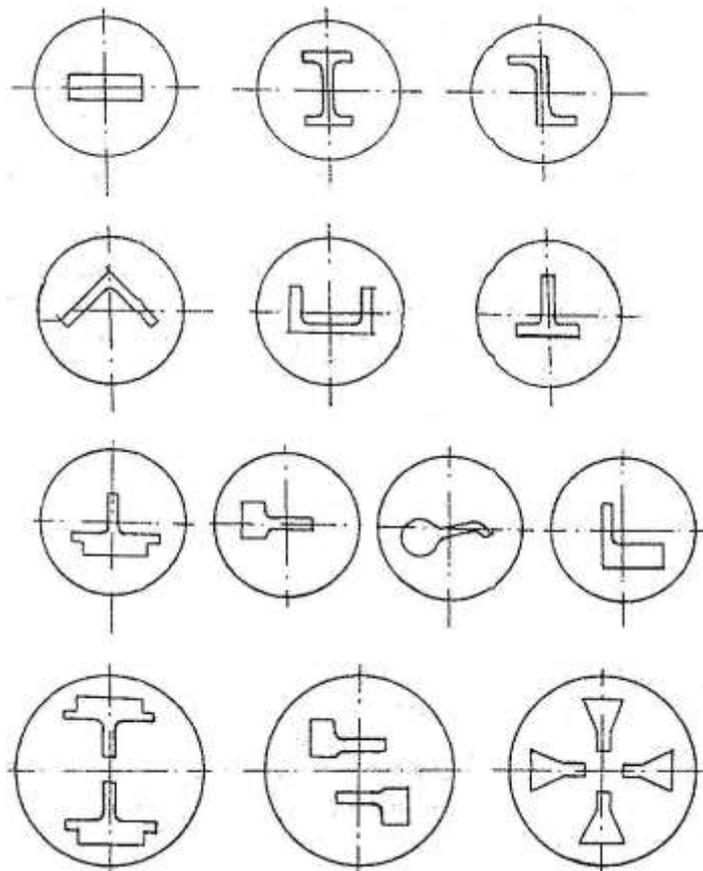
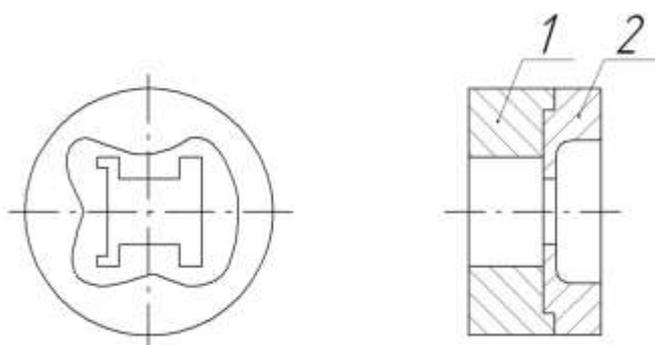


Рисунок 4.126 - Варианты рационального расположения каналов на зеркале матрицы

Выравнивание скоростей истечения может быть достигнуто прессованием в многоканальные матрицы. В этом случае расположение поперечных сечений прессуемых профилей становится близким к осесимметричному.



1 – форкамера, 2 – матрица

Рисунок 4.127 - Конструкция форкамерной матрицы

Изложенная методика позволяет спроектировать матрицу только в первом приближении для простых профилей. Для сложных профилей и многоканальных матриц расчет усложняется и часто окончательная обработка формы матрицы производится при прессовании опытных партий.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной лабораторной работе будем моделировать прессование профиля вида двутавр (рисунок 4.128) из алюминиевого сплава АД31. Так как профиль имеет две оси симметрии, то его центр тяжести совмещаем с геометрическим центром матрицы. Для выравнивания скоростей истечения используем конструкцию форкамерной матрицы.



Рисунок 4.128 - Прессуемый профиль

На первом этапе построения геометрии матрицы запустите Kompas-2D/3D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой . В открывшемся окне выберите Деталь  и нажмите кнопку ОК. В дереве модели откройте вкладку Начало координат и выберите плоскость ХУ, рисунок 4.129.

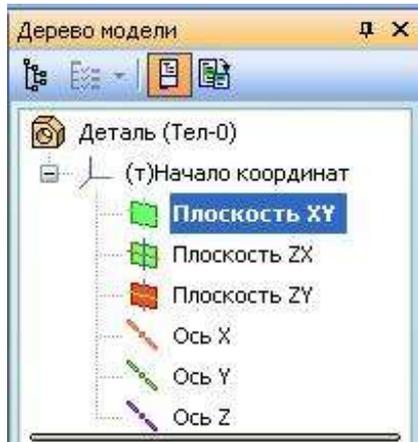


Рисунок 4.129 - Окно «Дерево модели»

После чего кликните ПКМ на надписи плоскость XY и в открывшемся

меню нажмите на кнопку Нормально к...



После этого нажмите кнопку Эскиз , которая откроет возможность к 2D созданию профиля будущей матрицы. Создайте окружность радиусом 70мм. Выйдите из режима эскизирования повторно нажав кнопку Эскиз. Примените к созданному эскизу, выделив его в дереве объектов, операцию выдавливания . Укажите значение расстояния выдавливания 20 мм.

Нажмите на лицевую грань получившейся детали, и установите ее перпендикулярно плоскости экрана нажав кнопку Нормально к. Войдите в режим эскизирования и воспроизведите указанный ниже чертеж.

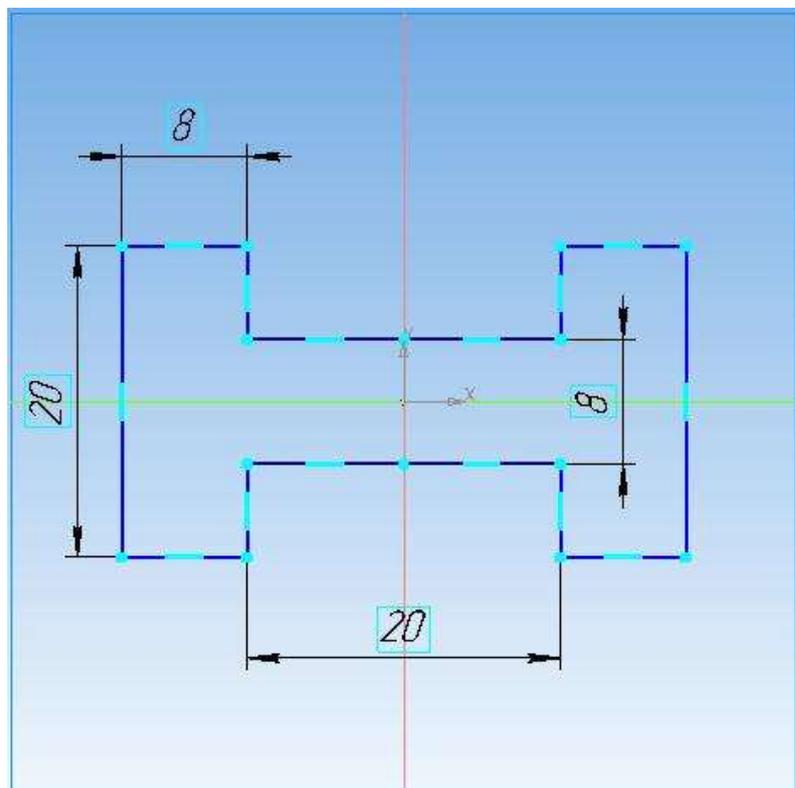


Рисунок -4.130 - Геометрия профиля будущей матрицы

Поскольку профиль имеет небольшой размер возьмем значение длины калибрующего пояска 4 мм. Вновь нажмите кнопку Операция выдавливания . Выделите Эскиз 2 в дереве модели. Расстояние выдавливания установите на значение 4мм. После чего нажмите кнопку создать. Теперь мы должны повторить **тоже самое** с обратной стороны. Разверните деталь и выделите заднюю грань. Сделайте ее перпендикулярной плоскости экрана нажав на кнопку «Нормально к», нажмите кнопку эскиз и повторите чертеж указанный выше (чтобы упростить задачу, можно просто скопировать чертеж из Эскиза №2 и вставить в новый эскиз).

После того как Эскиз №3 создан, вновь произведем операцию выдавливания, на этот раз значение расстояния выдавливания устанавливаем на 12 мм. Перейдем к завершающему этапу создания геометрии. Выделите любую грань детали, сделайте её нормальной экрану и создайте очередной эскиз. Им будет эскиз повторяющий очертания калибрующего пояска, рисунок 4.131.

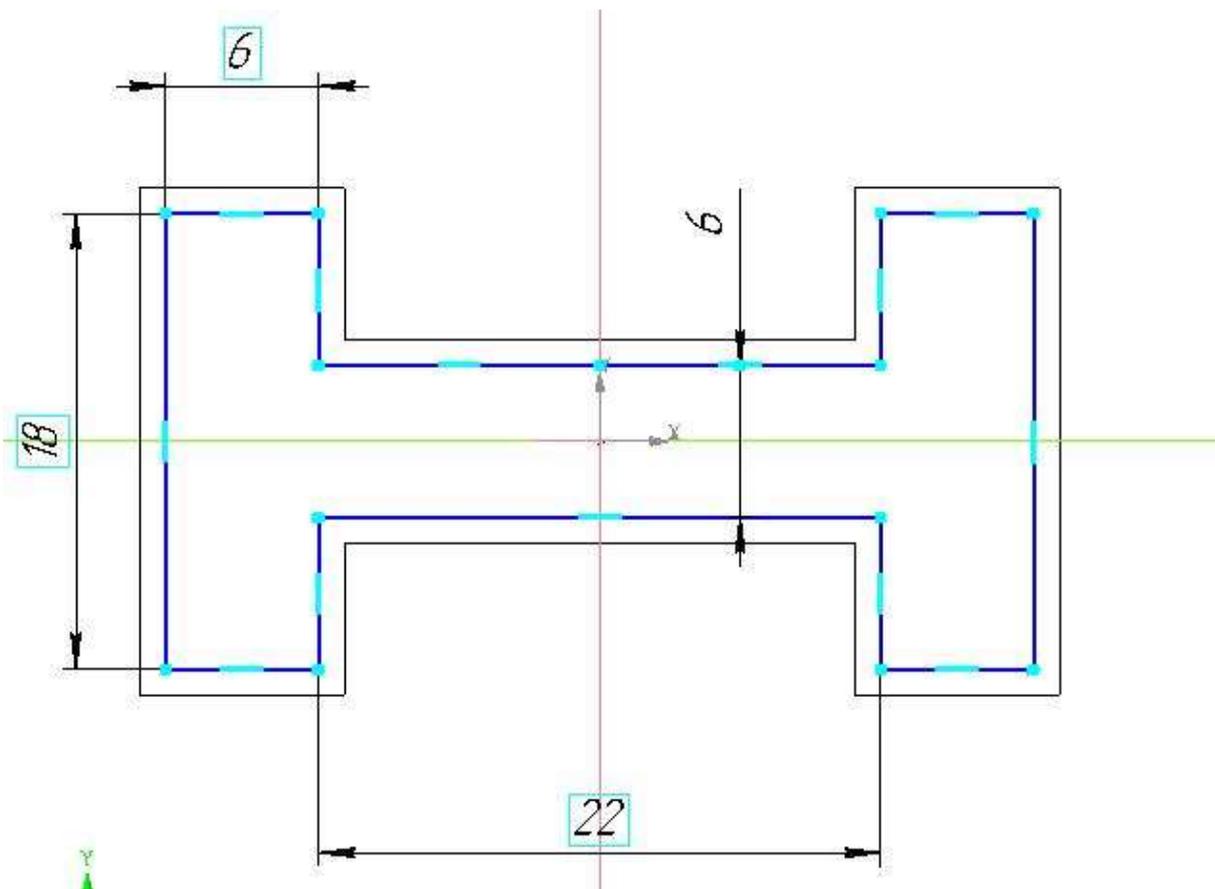


Рисунок 4.131 - Очертания калибрующего пояска

Теперь выделите Эскиз№4 в дереве модели и совершите операцию выдавливания. Расстояние выдавливания должно быть равно 20 мм. После нажатия кнопки создать вы увидите сквозное отверстие. На рисунке 4.132 представлен предварительный результат, который вы должны получить.

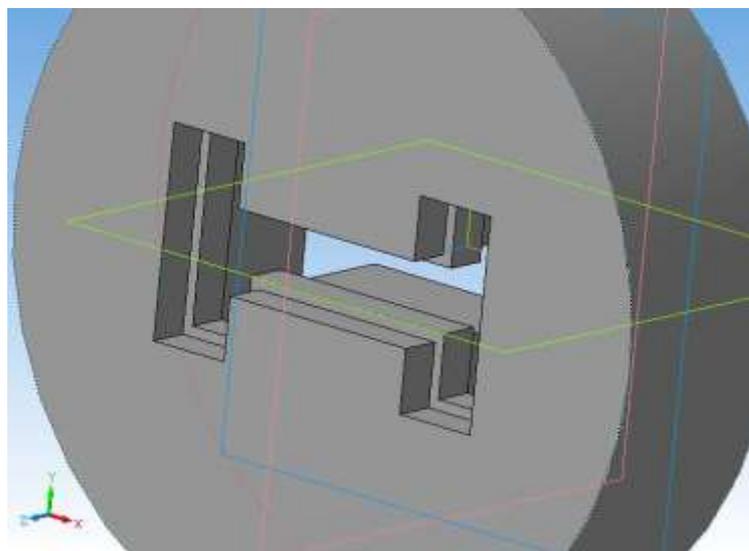


Рисунок 4.132 - Предварительный результат моделирования матрицы

Осталось только добавить скругления на калибрующем пояске, т.к. скругления снижают силу трения, а следовательно и усилие прессования и риск возникновения дефектов, таких как разрыв заготовки. Нажмите кнопку Скругление . После чего, удерживая кнопку Ctrl выделите по очереди каждое ребро калибрующего пояска с обеих сторон. Радиус скругления должен быть равен 0.4 мм. Нажмите кнопку создать. У вас должна получиться такая же деталь как на рисунок 4.133.

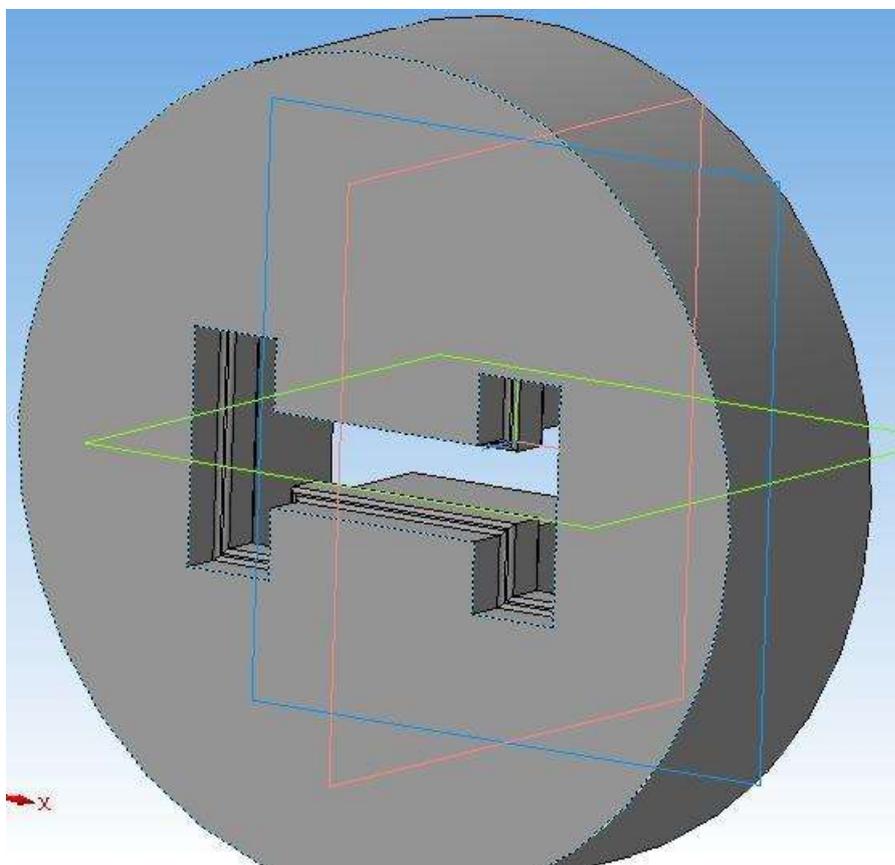


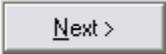
Рисунок 4.133 - Готовая модель матрицы

### Конверсия матрицы в программу DEFORM-3D

Геометрия матрицы создана. Теперь необходимо правильно её сконвертировать. Нажмите Файл >>> Сохранить как; В строке Имя файла напишите Matr. **Пояснение:** Для выполнения поставленной задачи необходимо

использовать английский шрифт как для файла так и для папки, в конечном итоге необходимо создать папку в корне диска C:\ специально для геометрии инструмента. В строке тип файла выберите формат .stl.

На втором этапе запустите Deform-3D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой new problem , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей лабораторной работы (Extr\_фамилия\_группа) и затем нажмите .

### Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов. Выделите в дереве объектов Topdie и перейдите к закладке геометрия . После чего нажмите кнопку Импорт геометрии  и укажите свой сохранённый файл с геометрией матрицы. Выберите Bottom die в дереве объектов, после чего вновь перейдите в меню геометрии и создайте геометрию контейнера. Перейдите в меню геометрических примитивов и создайте цилиндр с отверстием с параметрами, которые указаны на изображении (рисунок4.134).

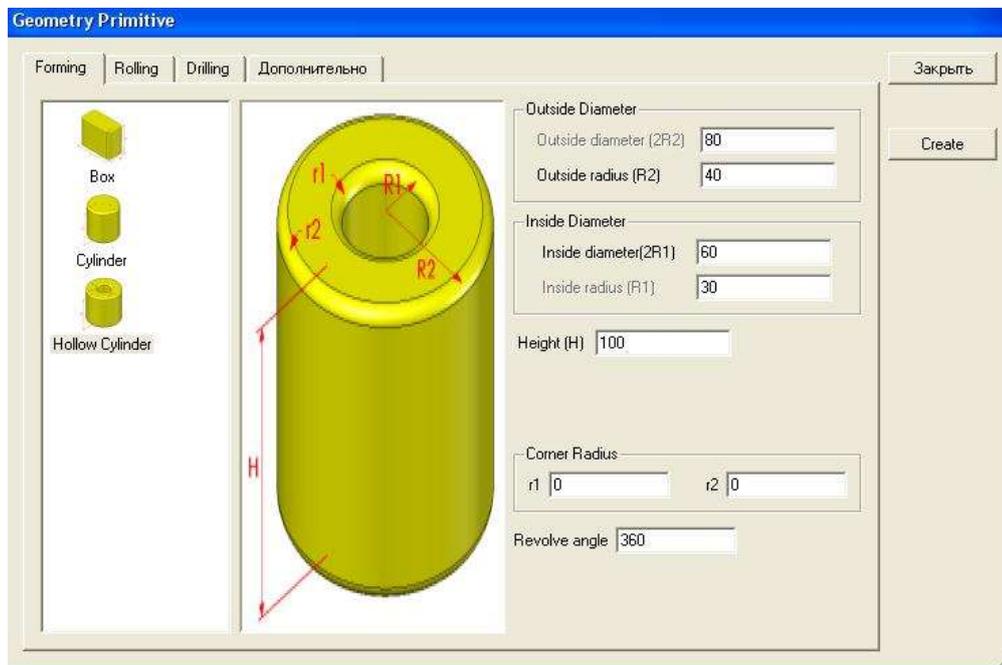


Рисунок 4.134 - Задание геометрии контейнера

Добавьте еще один объект нажатием кнопки . Это будет пресс-шайба. Так же как и в предыдущем случае задайте ей геометрию при помощи геометрических примитивов как указано на изображении. После чего нажмите кнопку Create (Создать), рисунок 4.135.

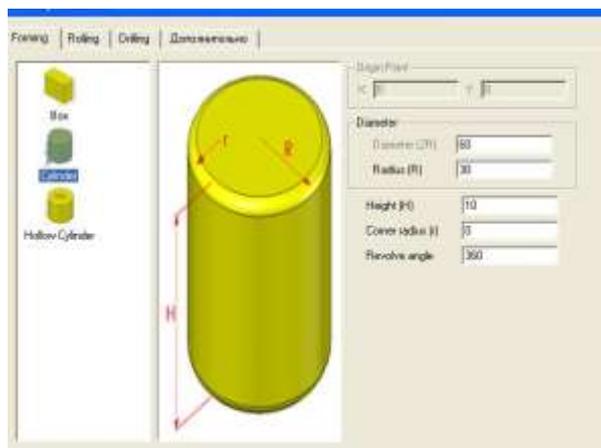
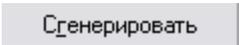


Рисунок 4.135 - Задание геометрии пресс-шайбы

### **Создание геометрии заготовки и сетки конечных элементов.**

Выберите в дереве объектов вашу заготовку (Workpiece). Перейдите к пункту Геометрия/геометрические примитивы и создайте цилиндр высотой 55

мм и диаметром также равным 55 мм.

После задания геометрии заготовки перейдите к закладке сетка . В закладке количество элементов установите значение 40000 элементов и нажмите .

### Задание материала заготовки

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку , откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 14.

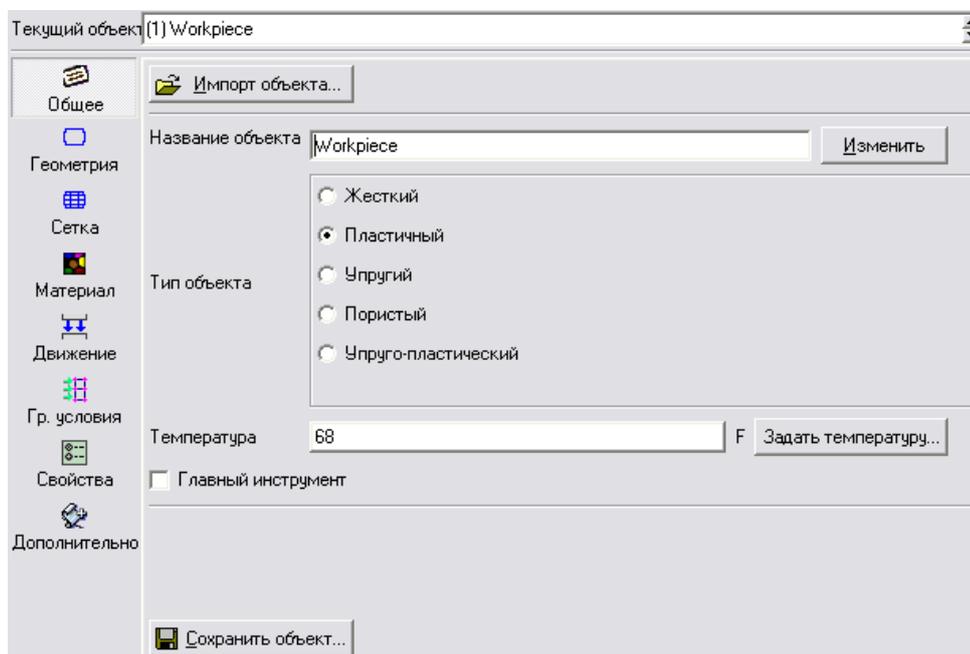


Рисунок 4.136 - Основное окно объекта

Убедитесь что для заготовки установлены свойства пластического объекта.

Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку , откроется окно «Материал», показанное на рисунке 4.137.

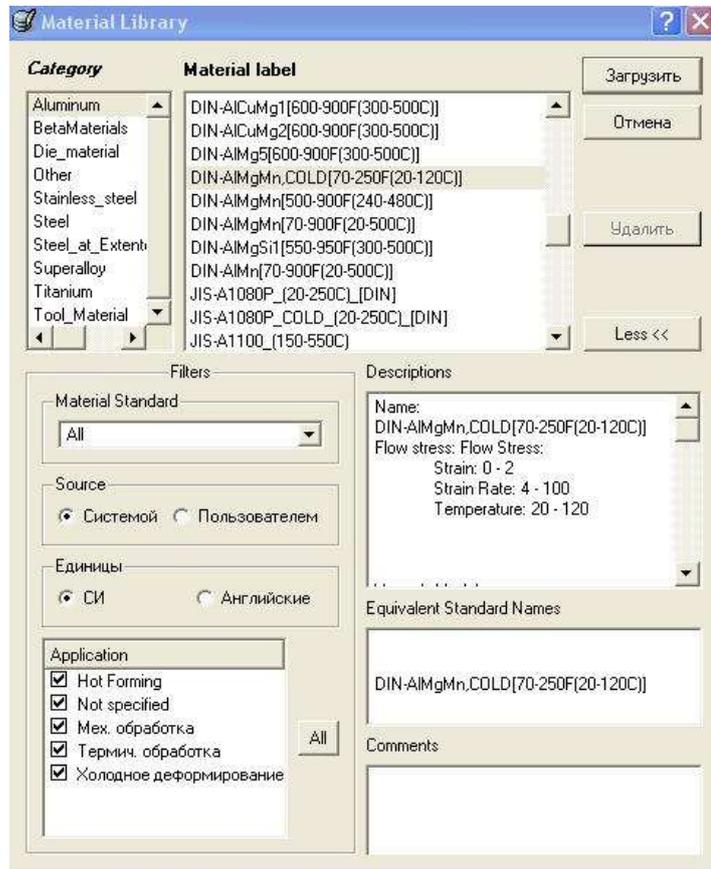


Рисунок 4.137 -Окно «Материал»

В том же Aluminum выберите DIN-AlMgMn,COLD[70-250F(20-120C)] (АД31) и задайте материал кнопкой загрузить.

### Позиционирование оснастки

Нажмите на кнопку позиционирование объектов в верхней панели закладок . Перейдите к закладке Интерференция. Первым шагом будет интерференция заготовки относительно матрицы. Установите параметры смещения как указано на рисунке 4.138 и нажмите применить.

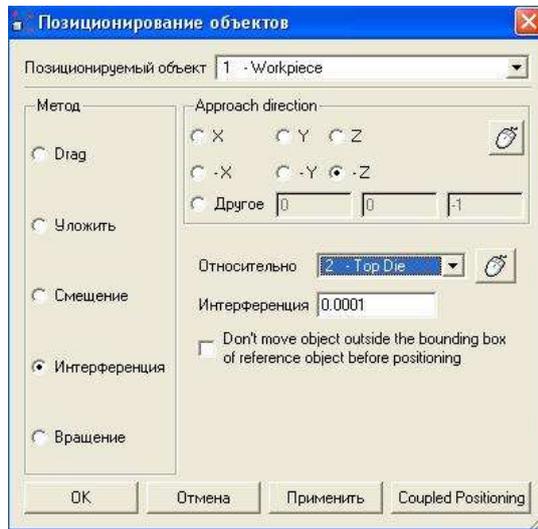


Рисунок 4.138 - Позиционирование заготовки

Теперь нужно спозиционировать пресс шайбу относительно заготовки, рисунок 4.139.

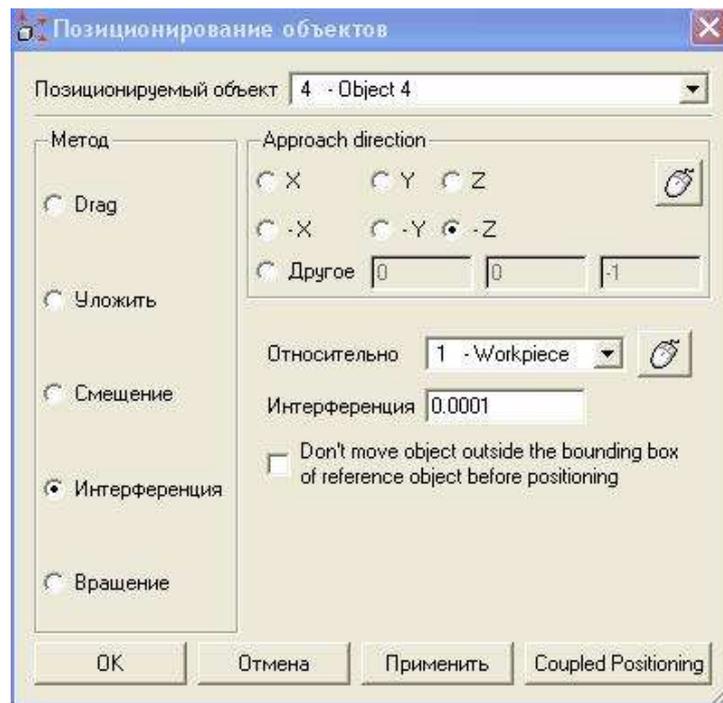
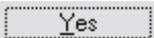


Рисунок 4.139 - Позиционирование пресс шайбы

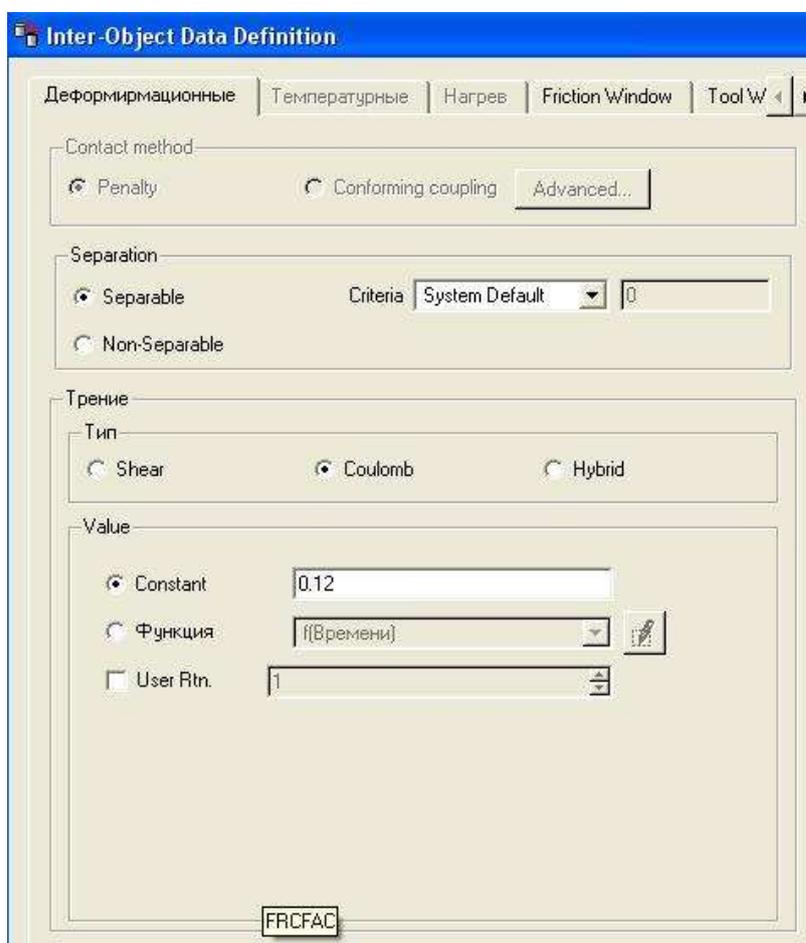
После того как инструмент спозиционирован, нажмите кнопку Ок.

### Назначение связи между объектами

Для определения связи между объектами нажмите кнопку . Так как никакие отношения в настоящее время не определены, появится сообщение, спрашивающее, хотите ли вы, чтобы система добавила отношения по умолчанию за вас. Нажмите кнопку .

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными четырьмя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется между четырьмя жёсткими инструментами. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как Подчинённый объект.

Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений. Так как в этом расчете не будет приниматься во внимание никакой передачи температуры, единственное свойство, которое должно быть определено – трение.

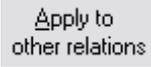


#### Рисунок 4.140 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Выберите коэффициент трения 0.12. Теперь задайте закон трения по Кулону (Constant Tau).

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна INTER-OBJECT.

Теперь, когда отношения между верхним инструментом и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой и остальным инструментом.

Так как коэффициент трения между заготовкой и всеми инструментами одинаков, кнопкой  можно скопировать свойства первого отношения во все остальные. После этого, оба отношения будут иметь коэффициент трения 0,12.

Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом (подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

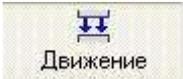
Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы находящиеся на линии контакта не попадут в контакт и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан в окне Экран как цветные точки на поверхностях

заготовки.

## Задание движения

Выделите в дереве объектов пресс шайбу (Object 4) и перейдите во вкладку движение . Нам необходимо задать движение по оси, в данном случае ось -Z. Скорость движения инструмента будет иметь значение 1мм в секунду (рисунок 4.141).

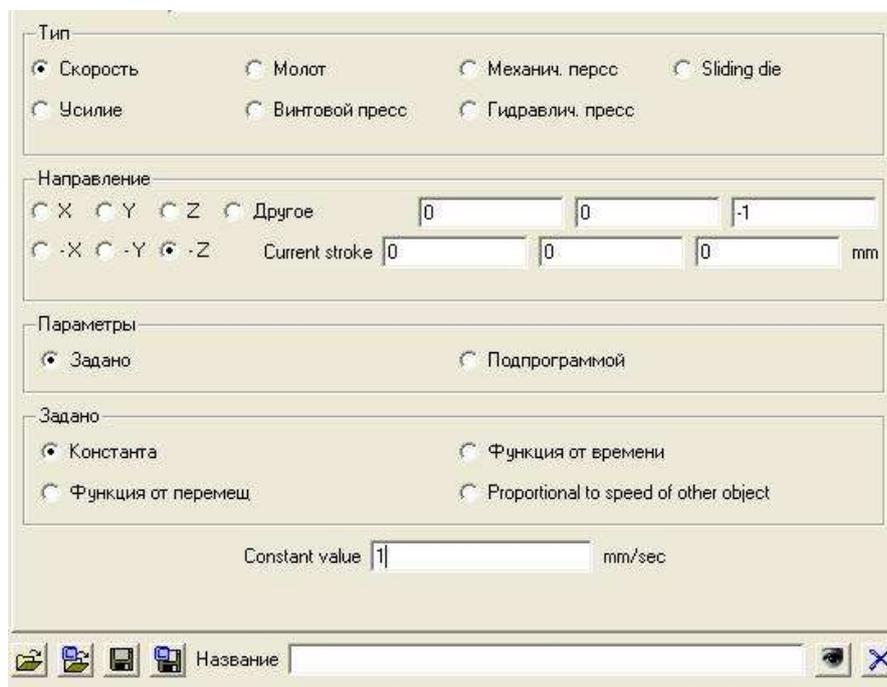


Рисунок 4.141 - Задание движения пресс шайбы

## Установка шагов расчета

Нажмите кнопку Simulation controls  в верхней панели закладок

Нажмите  Основное и убедитесь, что единицы измерения установлены в СИ.

Нажмите  Шаг для просмотра управления временными шагами. Убедитесь, что номер начального шага установлен как -1. Отрицательный знак говорит о том, что это шаг, записанный препроцессором (шаги решения

записанные в базу данных в процессе расчета будут положительны). Установите число шагов расчета 120. Установите приращение шага при сохранении 4 («через сколько шагов сохранять») (рисунок 4.142). Каждый четвертый шаг решения будет записан в базу данных. Установите главный инструмент Top Die. Обычно главным инструментом является тот, который перемещается при расчете, и он используется для контроля шага и остановки.

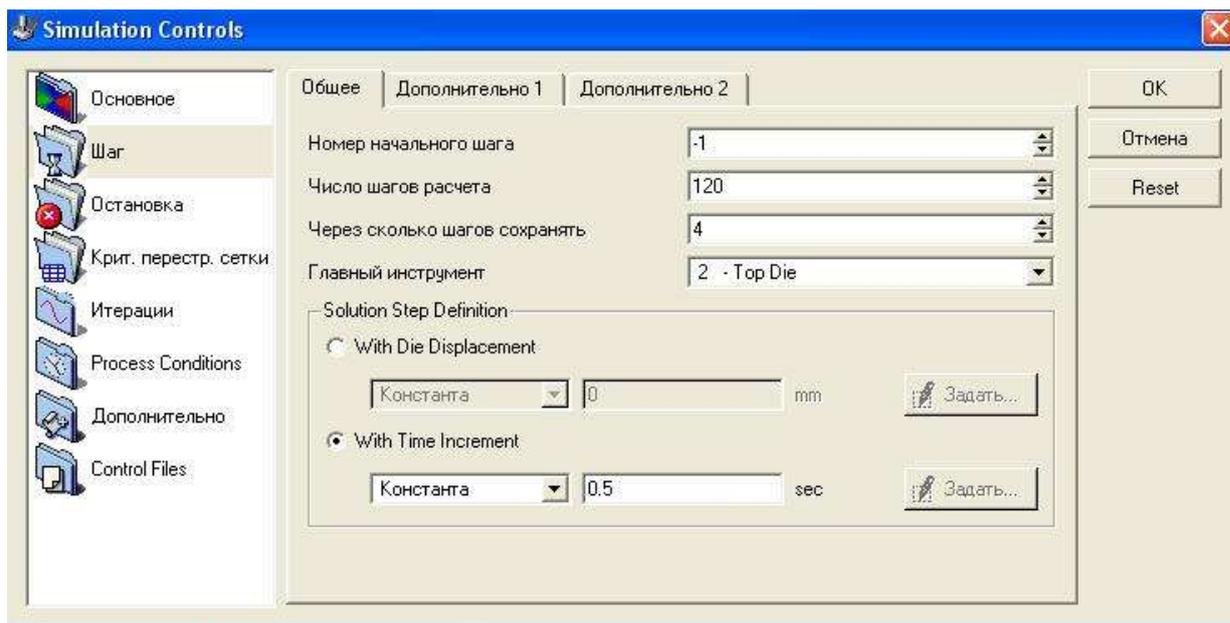


Рисунок 1.142 - Задание числа шагов расчёта

## Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных нажав кнопку , нажмите кнопку **Проверить**, когда появится сообщение **База данных может быть сгенерирована** нажмите кнопку **Сгенерировать** и начнётся генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на рисунке 4.143.

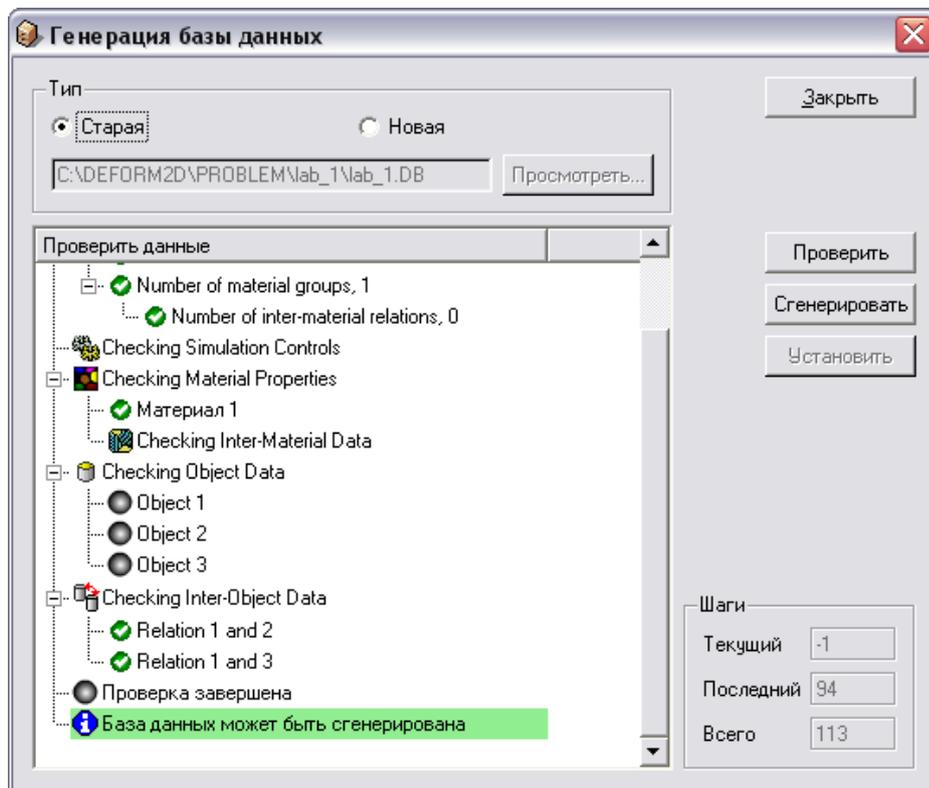


Рисунок 4.143 - Окно «Генерация базы данных»

При появлении сообщения  «Запись базы данных завершена», можете закрыть Deform3D – Preprocessor.

### Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой [Старт](#) или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
*****Message*****
Simulation is completed and stopped at the user specified time step .
```

После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой  в правом нижнем углу окна.

### Просмотр результатов

Посмотрите поэтапно процесс осадки заготовки. Определите моменты перехода между стадиями прессования. Стадии процесса прессования представлены на рисунке 4.144.

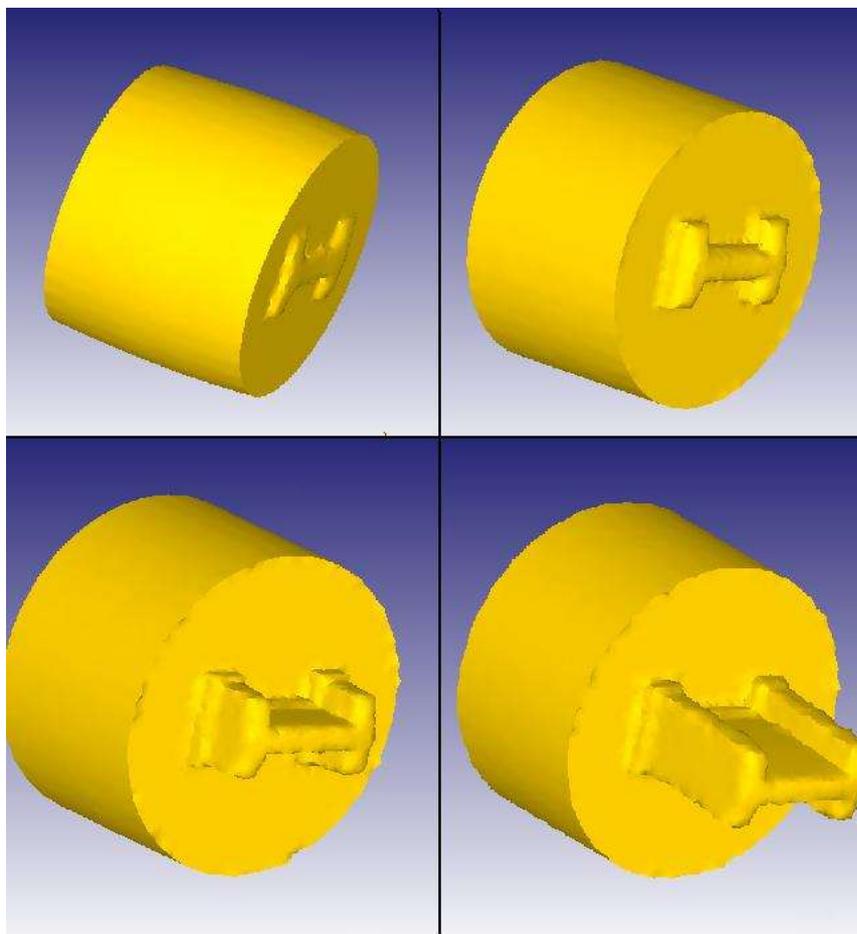


Рисунок 4.144 - Основные этапы прессования

Для того чтобы рассмотреть данный процесс в разрезе нажмите на кнопку разрез (Slice)  в верхней панели закладок. Откроется меню разреза, рисунок 4.145. Затем нажмите ЛКМ примерно на центр и вы получите разрез, рисунок 4.146, после этого нажмите кнопку ОК.

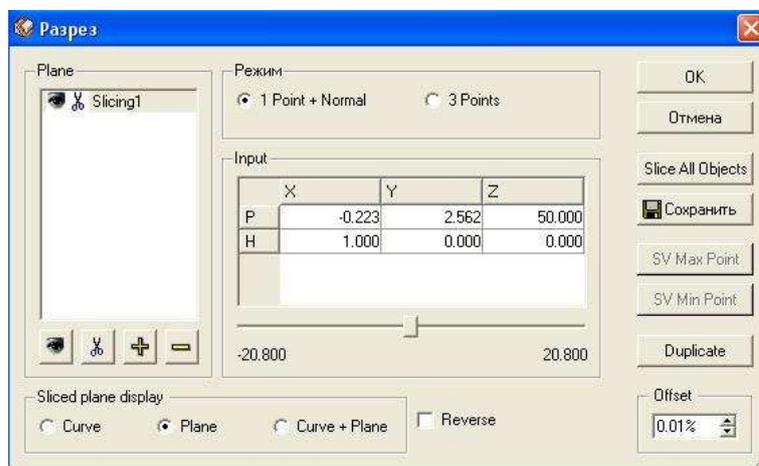


Рисунок 4.145 - Задание разреза

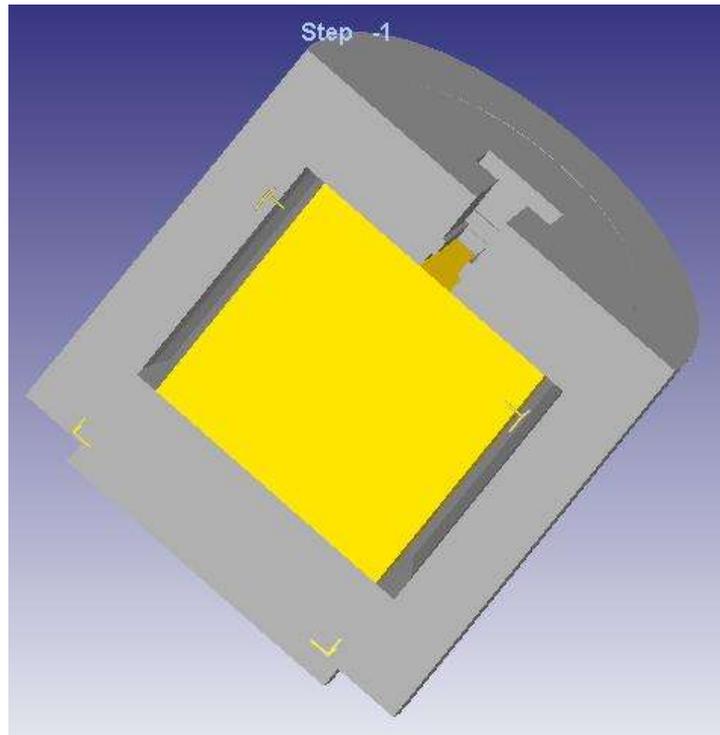


Рисунок 4.146 - Процесс в разрезе

Теперь постройте индикаторную диаграмму процесса.

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке. Выберите только пресс шайбу (object 4). Нажмите кнопку Применить, а затем кнопку ОК (рисунок 4.147).

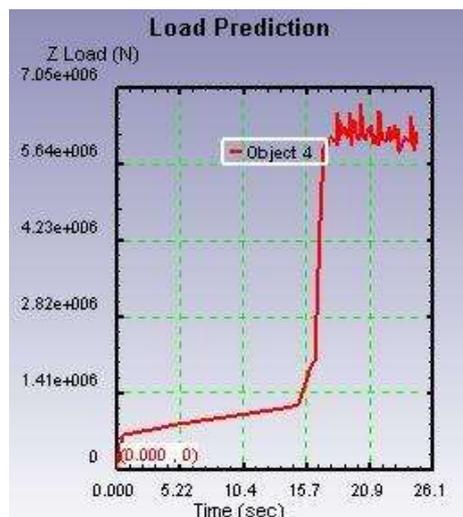


Рисунок 4.147 - Индикаторная диаграмма процесса

Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide).

Сделайте видимой только заготовку. Выберите ее в дереве объектов и нажмите кнопку Режим одиночного объекта (Single object mode) . Затем в верхней панели инструментов нажмите на кнопку Параметры . Вам откроется большое меню. Выберите закладку Stress(напряжение), а в ней закладку Effective. После чего нажмите кнопку принять(Apply) (рисунок 4.148).

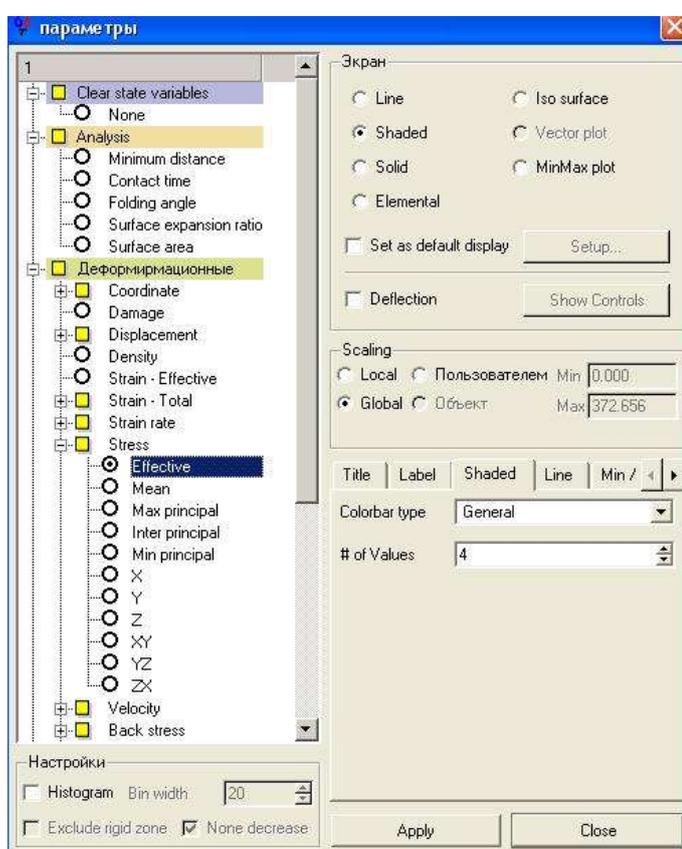


Рисунок 4.148 - Задание отображения внут. напряжений

Вы увидите как распределяются внутренние напряжения в заготовке в каждом шаге процесса прессования.

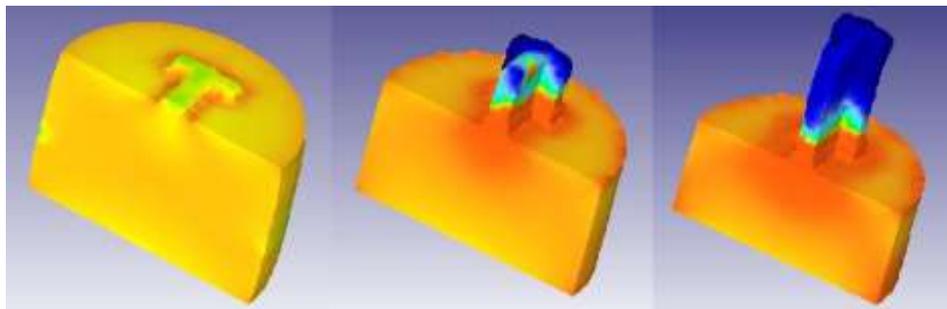


Рисунок 4.149 - Распределение напряжений по этапам прессования

Обратите внимание на количественное распределение напряжений. В каком месте эта величина имеет максимум, в каком минимум. Как распределяются напряжения в областях, где заготовка контактирует с контейнером, с матрицей, на калибрующем пояске.

Чтобы увидеть как происходит течение металла в слитке во время прессования, постройте векторную диаграмму скоростей течения. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и в разделе Скорости (Velocity) поставьте галочку напротив Основных скоростей (Total Vel). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив векторного отображения (Vector Plot). Нажмите  и , рисунок 4.150. Теперь вы можете увидеть как изменяется скорость движения отдельных областей заготовки за весь период прессования, рисунок 4.151, рисунок 4.152.

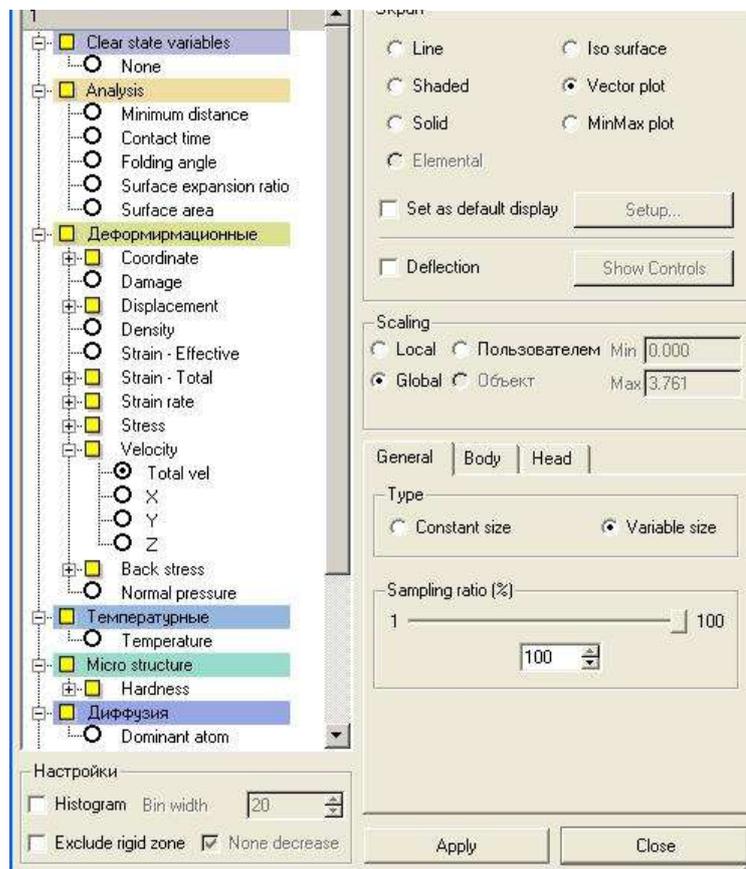


Рисунок 4.150 - Задание отображения вектора течения металла

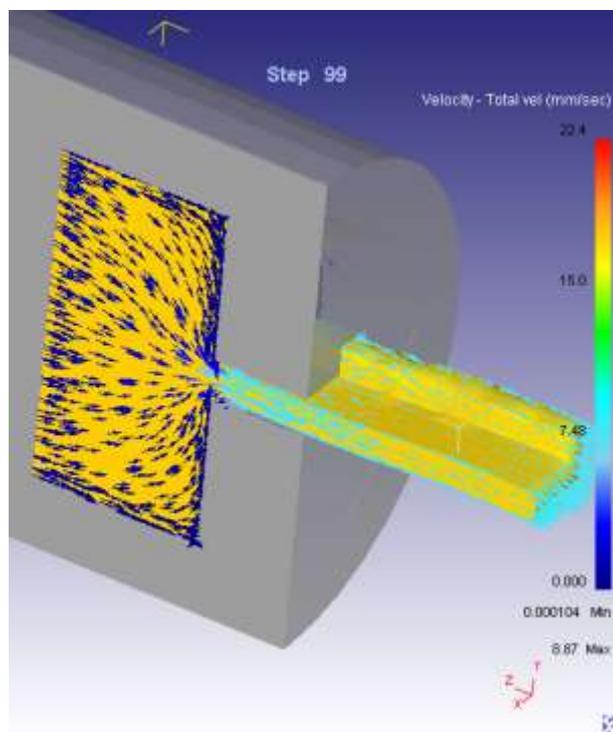


Рисунок 4.151 - Отображение вектора течения металла

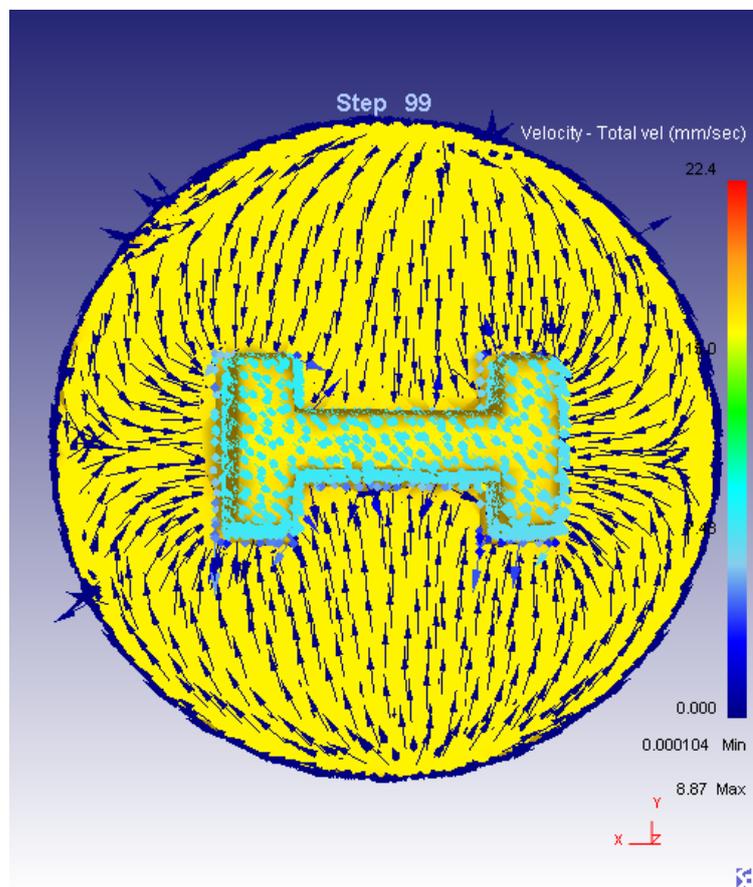


Рисунок4.152 - Отображение вектора течения металла

Внимательно рассмотрите течение металла в заготовке во время прессования на основных стадиях процесса. Используя интерфейс постпроцессора, вы можете вращать заготовку и устанавливать её в удобное для вас положение. Кнопки вращения находятся на верхней панели программы



### Содержание отчёта

1. Схема прямого прессования.
2. Индикаторная диаграмма.
3. Распределение интенсивностей напряжений.
4. Эскиз матрицы для прессования данного профиля.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение процесса прессования и его сущности.

2. Назовите области применения прессования.
3. Перечислите этапы процесса прессования и укажите их на изображениях выше.
4. Покажите очаг пластической деформации.
5. Опишите причину образования прессутяжины.
6. Опишите схемы главных нормальных напряжений и деформаций в прессуемой заготовке.
7. Какой закон трения используется в расчете процесса?
8. Как задать геометрию инструмента?
9. Перечислите основные действия совершенные вами для создания геометрии матрицы в программе Компас - 3D
10. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?

## 5 ВОЛОЧЕНИЕ

### 5.1 Волочение круглого сплошного профиля

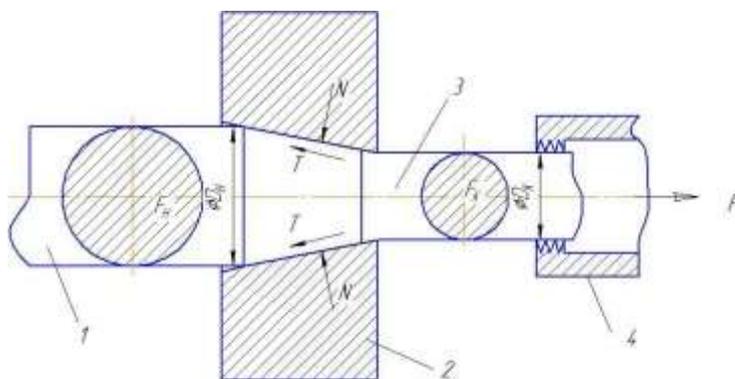
Цель работы: компьютерное моделирование процесса волочения круглых сплошных профилей из алюминия с помощью программного комплекса *DEFORM-2D* и анализ технологических параметров процесса, влияющих на характер распределения напряженно-деформированного состояния.

#### Краткие теоретические сведения

Волочение – процесс обработки металлов давлением, состоящий в протягивании заготовки постоянного поперечного сечения через плавно сужающийся канал волоки в холодном состоянии [57].

С использованием процесса волочения получают широкий ассортимент изделий в виде проволоки, труб, калиброванных прутков и профилей, используемых в различных отраслях промышленности: электротехнике, машиностроении, приборостроении, авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности.

Рассмотрим процесс волочения круглого сплошного профиля 3 из круглой заготовки 1 (рисунок 5.1). Передний конец заготовки 1 заостряют, вставляют в коническое отверстие волоки 2 меньшего диаметра, чем заготовка 1, захватывают клещами 4 и протягивают через волоку 2 с растягивающей силой  $P$ .



1 – заготовка; 2 – волока; 3 – изделие; 4 – клещи

### Рисунок 5.1 - Схема волочения круглого сплошного профиля

В волоке возникают силы реакции  $N$ , направленные по нормали к образующей канала, которые и обжимают металл заготовки. При этом площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина увеличивается [58].

Для описания деформации при волочении применяют следующие технологические параметры:

1. Коэффициент вытяжки (или вытяжка) показывает, во сколько раз увеличилась длина или уменьшилась площадь поперечного сечения профиля:

$$\mu = L_k / L_n = F_n / F_k = D_n^2 / D_k^2,$$

где  $L_n$ ,  $L_k$ ,  $F_n$ ,  $F_k$ ,  $D_n$ ,  $D_k$  – длина, площадь и диаметр изделия до волочения и после него соответственно.

2. Относительное обжатие (степень деформации) – отношение уменьшения площади поперечного сечения изделия к ее начальному значению:

$$\varepsilon = (F_n - F_k) / F_n = 1 - 1 / \mu$$

3. Напряжение волочения – отношение силы волочения  $P$  к площади поперечного сечения изделия  $F_k$  на выходе из волоки:

$$\sigma_{вол} = P / F_k.$$

Так как деформирующее усилие растяжения  $P$  передается в зону деформации через выходящий конец, то напряжение волочения  $\sigma_{вол}$  в нем не должно превышать предела текучести  $\sigma_m$  материала изделия:  $\sigma_{вол} < \sigma_m$ . В противном случае пластическая деформация может происходить и после выхода металла из волоки, отчего будет искажаться форма поперечного сечения изделия после волочения и в конечном итоге может произойти его обрыв.

На величину напряжения волочения оказывают влияние различные факторы. К основным из них относятся: степень деформации, прочностные свойства протягиваемого металла, геометрия продольного профиля канала волоки, трение на контактных поверхностях деформируемого металла и волоки и т.п.

Чем больше степень деформации (вытяжка), тем большее усилие нужно

приложить к выходящему концу и тем большее напряжение растяжения возникает в нем. В связи с этим вытяжка при волочении ограничена прочностью выходящего конца изделия и практически составляет 1,3-1,5.

Сила трения металла о поверхность волокни  $T$  дает составляющую, направленную против движения металла, что повышает деформирующее усилие и уменьшает возможную степень деформации (рисунок 5.1). Поэтому при волочении большое значение имеют мероприятия на уменьшение сил трения.

Ячейки координатной сетки, имеющие в исходном состоянии форму квадратов, в зоне деформации изменяют свою форму не одинаково (рисунок 2). На оси прутка они принимают форму, близкую к прямоугольникам, вытянутым в осевом направлении и сжатым в радиальном. На периферии квадраты превращаются в параллелограммы, вытянутые в продольном направлении и сжатые в радиальном. Углы параллелограммов тем больше отличаются от  $90^\circ$ , чем ближе ячейка расположена к периферии. Превращение квадратных ячеек в параллелограммы свидетельствует о сдвигах во всех слоях в осевом направлении; при этом сдвиги увеличиваются от оси к периферии. Величина сдвигов растет с увеличением угла конусности волокни, степени деформации и коэффициента трения.

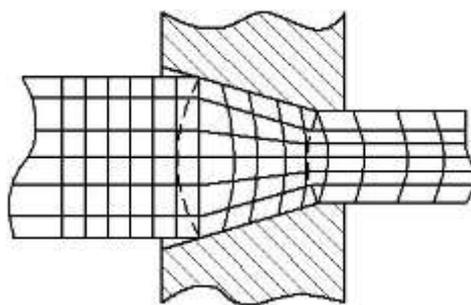


Рисунок 5.2 - Изменение координатной сетки при волочении круглого сплошного профиля

Прямые поперечные линии изгибаются выпуклостью в сторону волочения. Такой характер изменения формы поперечных линий показывает,

что скорость движения элементарных частиц убывает от центра к периферии. Изменение формы ячеек начинается до входа в геометрическую зону деформации и заканчивается перед границей выхода из нее. Относительная деформация ячеек одинакова во всех слоях. Радиальные деформации каждой ячейки равны окружным (тангенциальным) деформациям  $\varepsilon_\theta = \varepsilon_r$ .

Таким образом, деформированное состояние при волочении в главных осях характеризуется в основном деформацией растяжения в продольном направлении и двумя равными между собой деформациями сжатия в радиальном направлении и по касательной к окружности (рисунок 5.3, б).

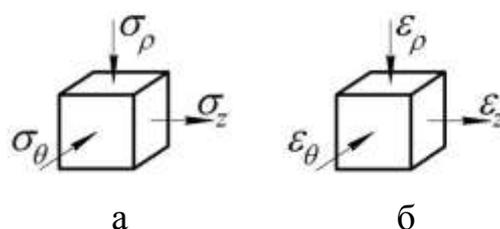


Рисунок 5.3 - Главные схемы деформаций и напряжений при волочении круглого сплошного профиля

Главные линейные деформации связаны между собой условием несжимаемости:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0 .$$

Для круглого профиля сплошного сечения из изотропного материала:

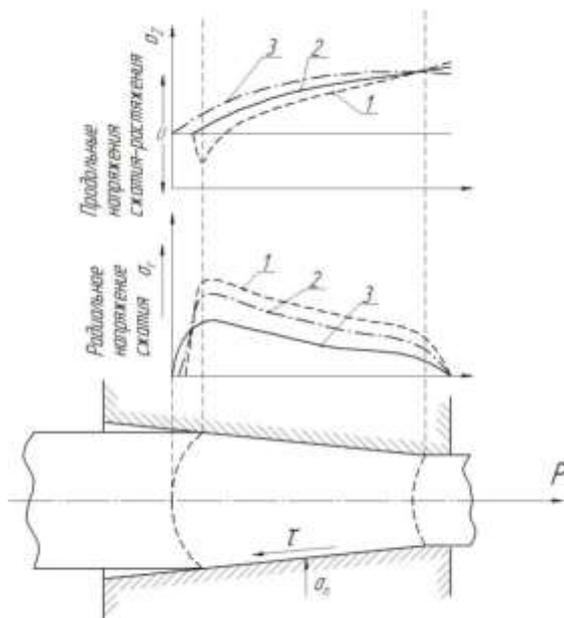
$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -0,5 \cdot \varepsilon_z .$$

При волочении круглых профилей получается осесимметричная разноименная схема напряженного состояния с напряжением растяжения, создаваемым усилием волочения, и с двумя напряжениями сжатия, создаваемыми реакцией стенок канала волокна (рисунок 5.3, а). Т.к. радиальные и окружные деформации равны между собой, равны и напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ .

Уравнение пластичности имеет вид:

$$\sigma_z + \sigma_r = \sigma_m .$$

Напряжения  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ , и  $\sigma_\theta$ , равное  $\sigma_r$ , изменяются в зоне деформации, как по ее длине, так и по сечению (рисунок 5.4). Продольные напряжения увеличиваются от входа в зоне деформации к выходу из нее, где напряжения достигают максимального значения. Радиальные  $\sigma_r$  и окружные  $\sigma_\theta$  напряжения от входа в зону деформации к выходу из нее уменьшаются и в сечении выхода равны нулю.



1 – на поверхности; 2 – в среднем слое; 3 – в центре заготовки

Рисунок 5.4 - Схема изменения радиальных и продольных напряжений в зоне деформации

Продольные напряжения по радиусу канала в зоне деформации увеличиваются от периферии к центру. На выходе из зоны деформации, наоборот, напряжение на периферии больше вследствие более резкого поворота траекторий долевых напряжений вблизи поверхности, чем в центральных слоях.

Радиальные и окружные напряжения уменьшаются от периферии к центру (рисунок 5.4). Из рисунка видно, что на входе в зону деформации при большом угле конусности и высокой степени деформации продольные напряжения могут быть сжимающими в кольцевой области вблизи контактной

поверхности в связи с влиянием внеконтактной зоны на входе. В этой кольцевой области все три главные напряжения – сжимающие [58].

На контактной поверхности металла с волокой действуют нормальное напряжение сжатия –  $\sigma_n$  и напряжение трения –  $\tau$ , которое можно принять равным по закону Кулона-Амантона –  $f\sigma_n$  (рисунок 5.4).

Сложное влияние на усилие волочения оказывает форма продольного профиля канала волоки. По длине канал можно разделить на четыре части (рисунок 5.5):

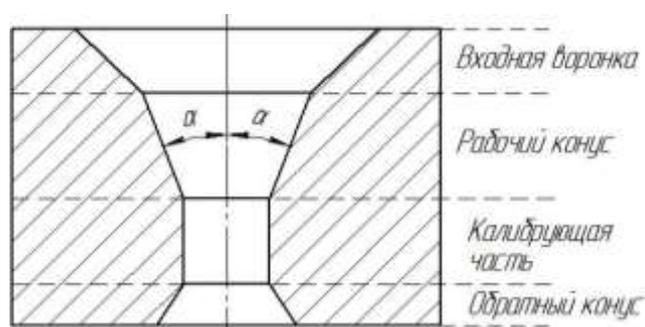


Рисунок 5.5 - Схема продольного профиля канала волоки

1. Входная воронка – наиболее широкая часть волоки, служащая для облегчения ввода в нее заготовки и подачи смазки в рабочую зону.
2. Рабочий конус – предназначен для осуществления деформирования.
3. Калибрующая часть – необходима для придания протягиваемому профилю окончательных размеров поперечного сечения и повышение стойкости выходной части рабочего конуса.
4. Обратный конус – служит для предотвращения повреждений, задиров, царапин при выходе протянутого изделия из волоки.

Изменение угла конусности влияет на усилие волочения. С одной стороны, увеличение угла конусности повышает усилие волочения из-за роста неравномерности деформации, скорости деформации и ухудшения смазки. С другой стороны, увеличение угла конусности уменьшает поверхность контакта металла с волокой и тем самым уменьшает силу контактного трения и усилие волочения. Поэтому в зависимости от протягиваемого материала, профиля и

условий волочения имеется область оптимальных углов конусности ( $5-15^\circ$ ), при которых усилие волочения получается минимальным [59].

При волочении круглого профиля на входе в зоне деформации образуется кольцо износа (рисунок 5.6). В области начинающегося течения металла заготовки, частицы поверхности канала волоки выкрашиваются. Поверхность становится неровной, это в свою очередь усиливает дальнейшее выкрашивание. Кольцо износа становится шире, глубже и более неровным.

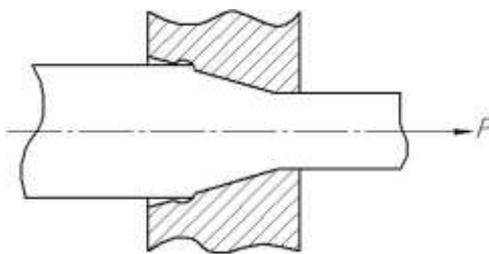


Рисунок 5.6 - Схема образования кольца износа

Изменение формы и размеров заготовки при волочении связано с изменением формы каждого отдельного зерна. В процессе волочения зерна вытягиваются в направлении оси волочения, а поперечный размер их уменьшается (рисунок 5.7). Такое расположение зерен называется текстурой деформации и является причиной различия свойств деформированного металла вдоль и поперек волокон. Таким образом, металл, практически изотропный до волочения, после него становится анизотропным.

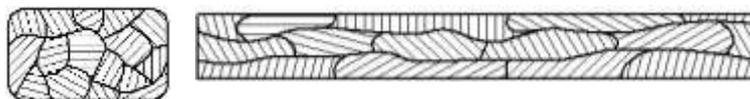


Рисунок 5.7 - Схема образования текстуры деформации при волочении

Пластическая деформация при холодном волочении существенно изменяет механические свойства профиля (рисунок 5.8). При повышении степени деформации интенсивно возрастают прочностные характеристики:

твёрдость  $HB$ , предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_{0.2}$  и столь же интенсивно уменьшаются пластические характеристики: относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\psi$ .

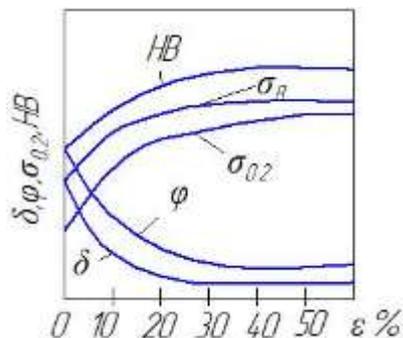


Рисунок 5.8 - Характер изменения механических свойств при волочении

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

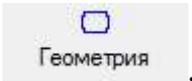
### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *WIRE\_DRAWING*. Нажмите кнопку **Finish**.

После запуска препроцессора убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (вызовите окно **Simulation controls** нажатием на кнопку **Simulation controls** ).

### Построение геометрии инструмента и заготовки

Выполним компьютерное моделирование волочения круглого сплошного профиля диаметром  $\varnothing 22$  мм на  $\varnothing 20$  мм через коническую волоку с углом  $12^\circ$ .

С помощью геометрических примитивов (пункт **Геометрия** ), закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**) постройте заготовку с размерами по

высоте 40 мм и радиусом 11 мм (рисунок 5.9, а). Для этого в окне **Geometry Primitive** (геометрические примитивы) необходимо выбрать тип объекта «*Cylinder*» и ввести при помощи клавиатуры в области **Размер** в строках **Width** (ширина) и **Height** (высота) значения, соответственно, 40 и 11 мм (рисунок 2.165.10). Нажать ЛКМ на кнопку **Create** (создать), а затем **Заккрыть**.

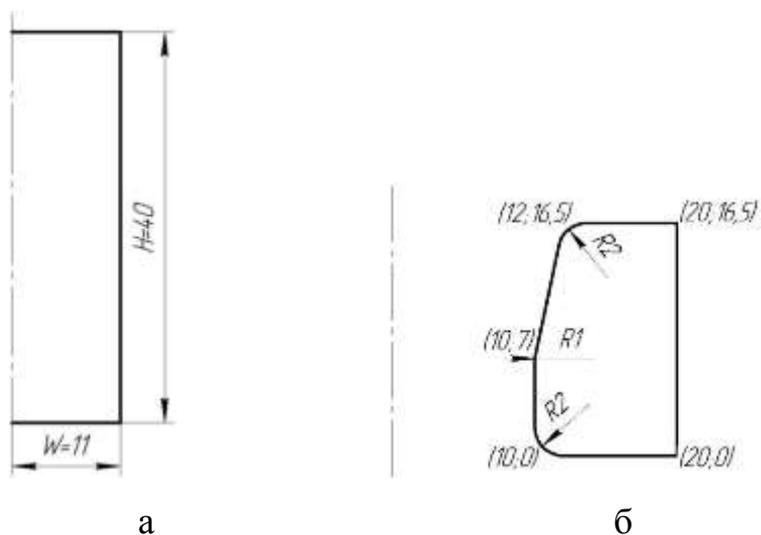


Рисунок 5.9 - Геометрия заготовки (а) и волокна (б)

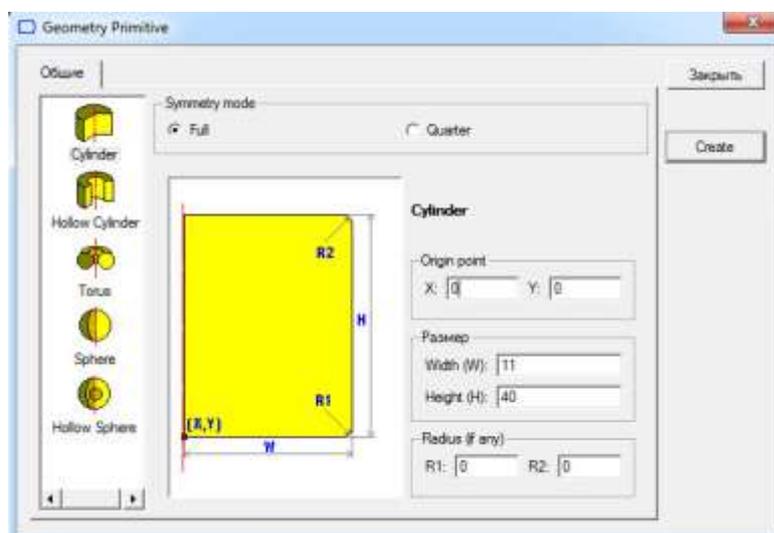


Рисунок 5.10 - Окно **Geometry Primitive**

Добавьте в **Дерево объектов Top Die** (волокна), нажав кнопку **Добавить объект** . Перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия**. В появившееся

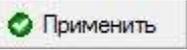
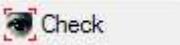
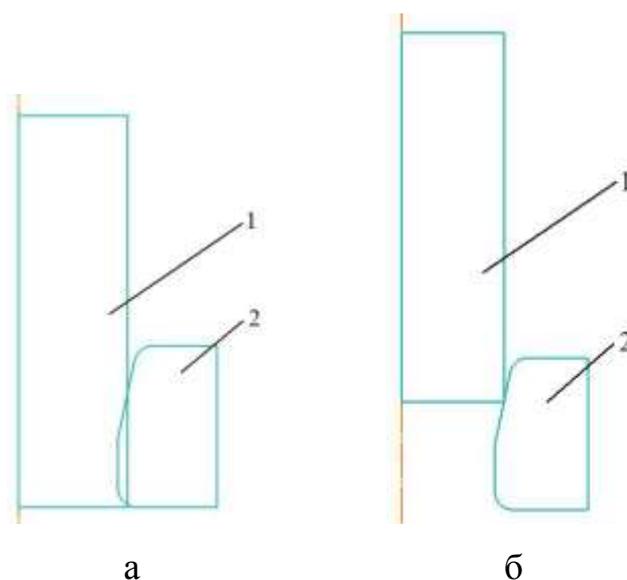
**Поле ввода геометрии** (таблицу) последовательно введите значения, представленные в таблице 5.1 (рисунок 5.9, б). После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить** .

Таблица 5.1 - Координаты точек для построения волоки

№	X	Y	R
1	20	0	0
2	20	16,5	0
3	12	16,5	2
4	10	7	1
5	10	0	2
6	20	0	0

Проверьте полученную геометрию на наличие ошибок, для этого нажмите кнопку **Check** , а затем кнопку **Check&CorrectGeometry**. В случае верного построения должно появиться сообщение «*Geometry is legal*».

Конечная геометрия заготовки и волоки, изображена на рисунке 5.11, а.



1 – заготовка; 2 – волока

Рисунок 5.11 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а)  
и позиционирования (б)

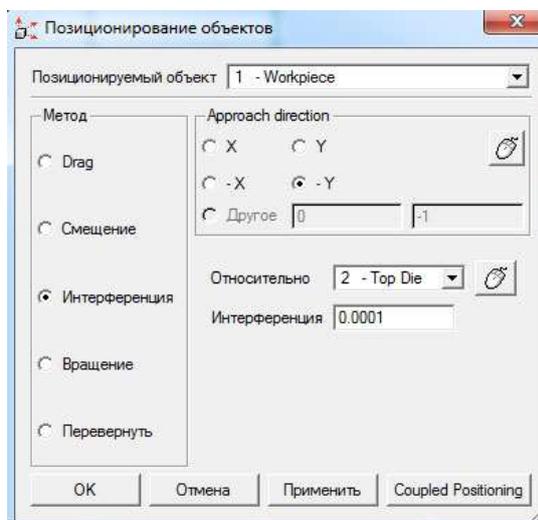


Рисунок 5.12 - Окно **Позиционирование объектов**

### Позиционирование объектов

Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 5.12), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения заготовки и волокна относительно друг друга (рисунок 5.11, б) воспользуйтесь методом **Интерференция**. В строке **Позиционируемый объект** выберите *Workpiece*, а в строке **Относительно** – *Top Die* (рисунок 5.12). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «-Y». Для позиционирования нажмите кнопку **Применить**. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунке 5.11, б.

### Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт

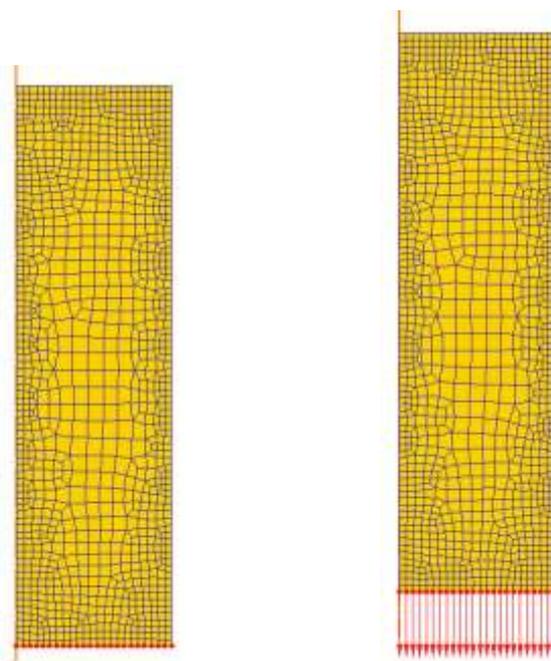
**Сетка**  Сетка, задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DIN-AlMgMn, COLD[70-250F(20-120C)]* (АД31) и нажмите кнопку **Загрузить**.

### Задание движения

Т.к. деформирующее усилие при волочении прикладывается к заготовке, то необходимо наложить перемещение в отрицательном направлении оси *Y* на узлы конечно-элементной сетки, лежащие на нижнем торце заготовки (рисунок 5.13, а).

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и перейдите к пункту **Bdry. Cnd.**  Bdry. Cnd. (граничные условия), укажите тип граничного условия в блоке **В.С. Type** –  *Velocity* (скорость), введите значение скорости -1 мм/с в строку **Velocity** (минус указывается для перемещения против оси), а в блоке **Направление** поставьте флажок напротив надписи «*Y*» (рисунок 5.14, а).



а

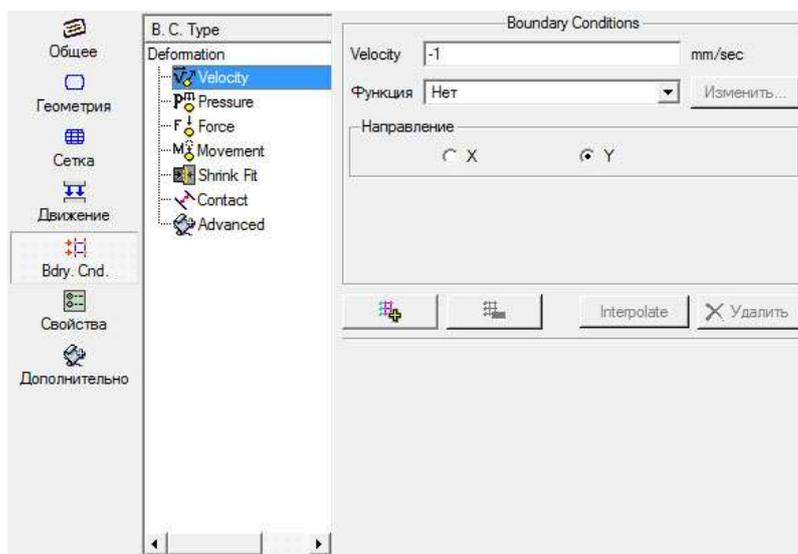
б

Рисунок 5.13 - Выбор узлов заготовки (а) и наложенное перемещение (б)

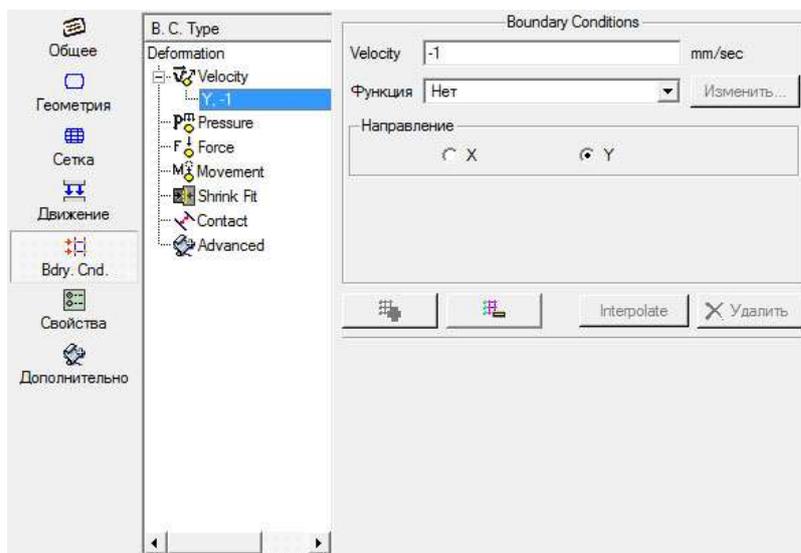
Теперь необходимо выбрать узлы, на которые будет наложено граничное условие, т.е. узлы, составляющие нижний торец заготовки. В окне **Pick nodes** (выбор узлов), обычно расположенном в левом нижнем углу экрана, нажмите кнопку **By edge**  (по грани) для выбора всех узлов какой-либо грани. ЛКМ укажите нижнюю грань заготовки, при этом все узлы грани выделяться красными точками (рисунок 5.13, а).

Для применения указанного граничного условия на выбранные узлы нажмите кнопку **Добавить гр. условия**  в пункте **Bdry. Cnd.** При этом узлы с наложенным граничным условием обозначаться красными стрелками, направленными в сторону перемещения (рисунок 5.13, б) и в пункте **Bdry. Cnd.** появится новое граничное условие «Y, -1» (рисунок 5.14, б).

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.



а



б

Рисунок 5.14 - Пункт **Bdry. Cond.** до (а) и после (б) задания граничных условий

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными контактными парами (рисунок 5.15).

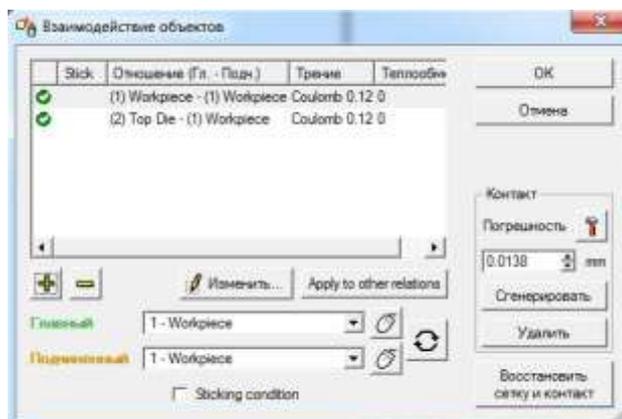


Рисунок 5.15 - Окно **Взаимодействие объектов** после задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить**  **Изменить...**, в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «*Coulomb*» (трение по закону Кулона), укажите

коэффициент трения равный 0,12 и нажмите кнопку **Заккрыть** (рисунок 5.16).

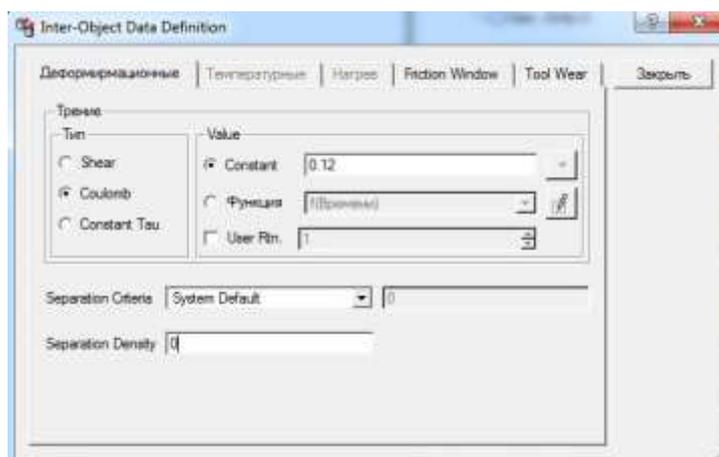


Рисунок 5.16 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Т.к. коэффициент трения между заготовкой и волокой одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к остальным (рисунок 5.15).

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта. Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

### Задание числа шагов расчета

Т.к. движение накладывается на узлы заготовки, а не на инструмент, то шаг решения задачи необходимо ограничить по времени. Для этого нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем в блоке **Задание шагов решения** установите флажок напротив надписи **With Equal Time Increment** (с равным приращением по времени) и введите величину шага – 0,25 с (при скорости волочения 1 мм/с за один шаг нижний торец заготовки переместиться на 0,25 мм) (рисунок 5.17).

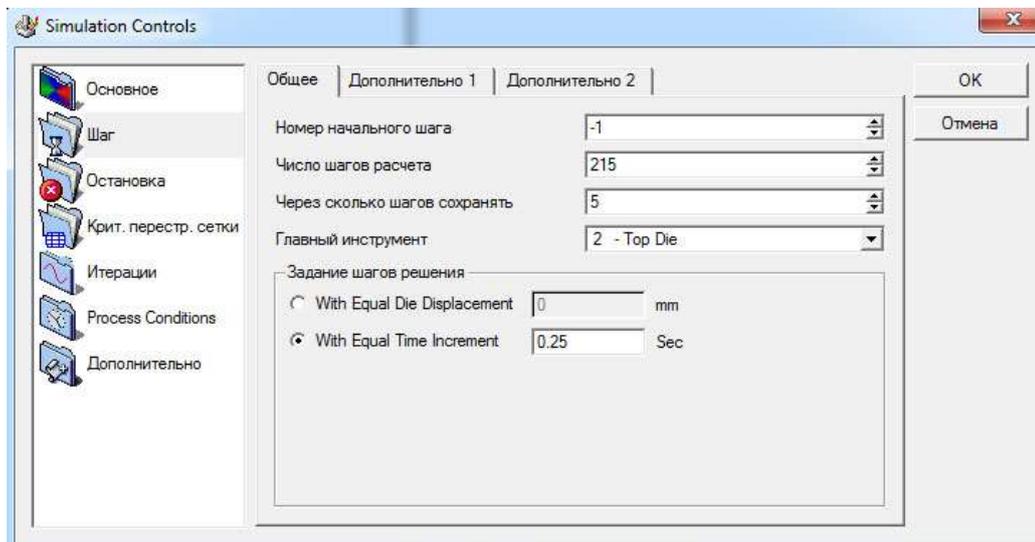


Рисунок 5.17 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Количество шагов расчета примем равным 215 и введем данное значение в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 5.17). В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 18). Для закрытия окна нажмите кнопку **Заккрыть**.

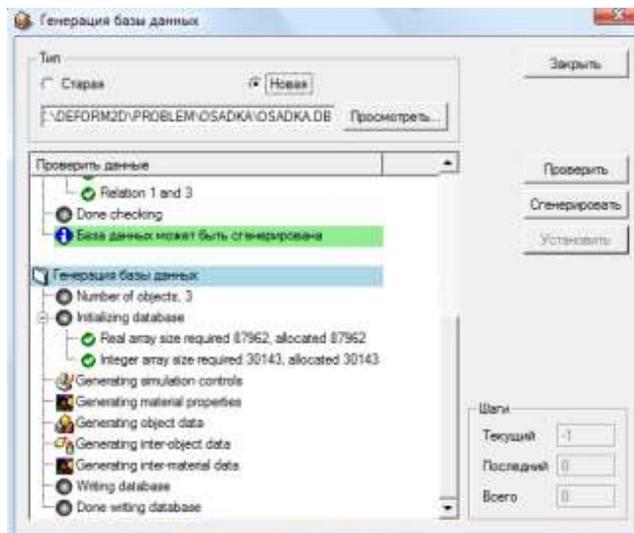


Рисунок 5.18 - Окно Генерация базы данных

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку . Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается.

### Анализ результатов моделирования

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** .

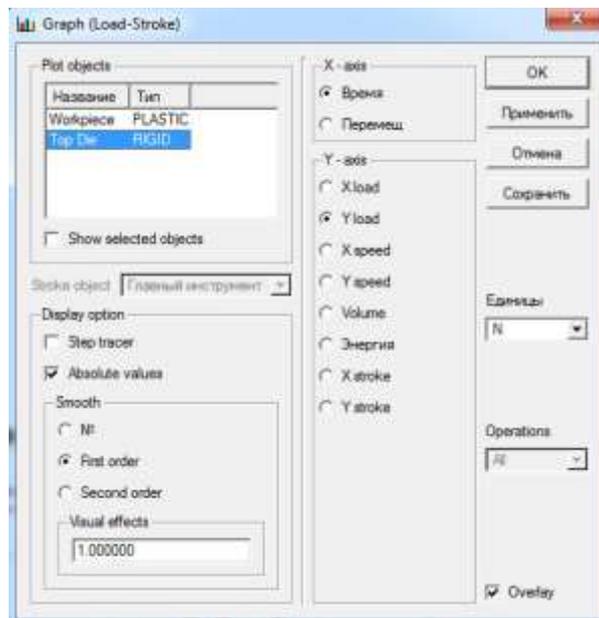


Рисунок 5.19 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

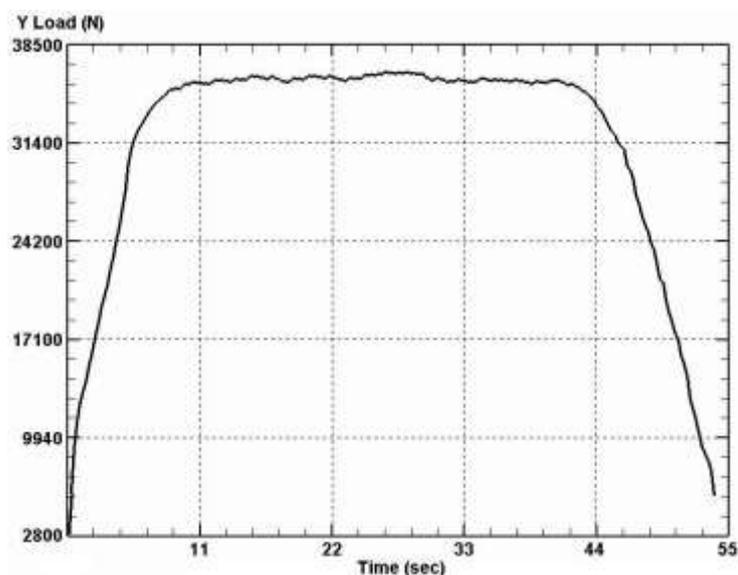


Рисунок 5.20 - Изменение усилия волочения

Опишите характер изменения усилия прессования по стадиям процесса (рисунок 5.20). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 5.19) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение матрицы, поэтому в разделе **X-axis** установите «Время». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния на установившейся стадии волочения (рисунок 5.22). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*») (рисунок 5.21). В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки и векторному полю скоростей (рисунок 5.23). Для отображения скоростей (рисунок 5.23, а) нажмите кнопку **Параметры** , выберите тип переменной «*Velocity*» и подтип «*Total Vel*» (рисунок 5.21). В разделе **Экран** установите «*Vector plot*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

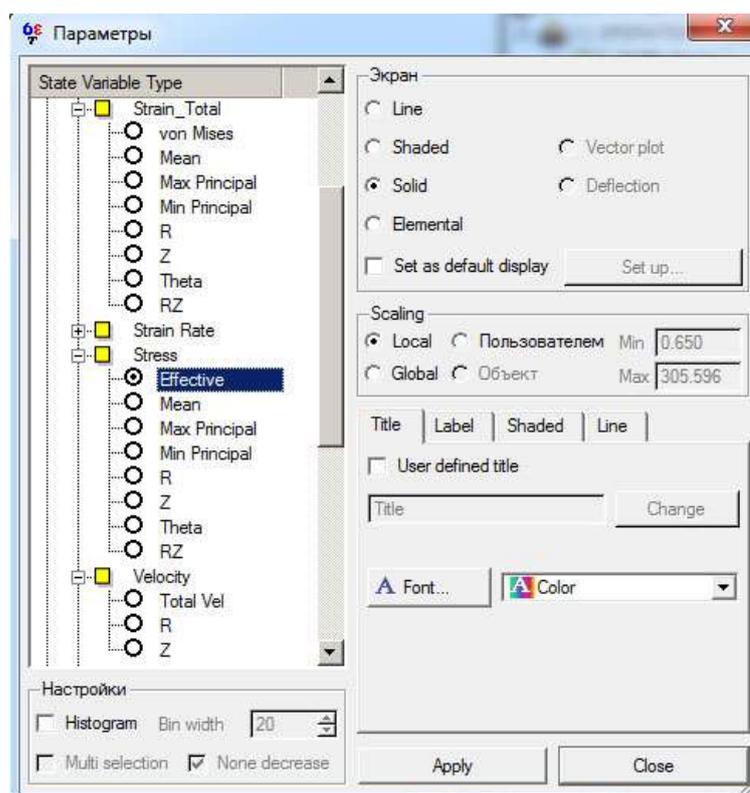


Рисунок 5.21 - Окно **Параметры**

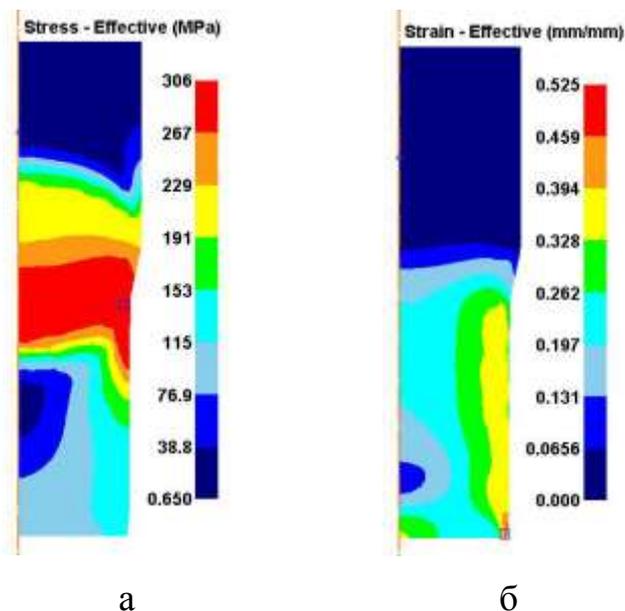


Рисунок 5.22 - Распределение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б)

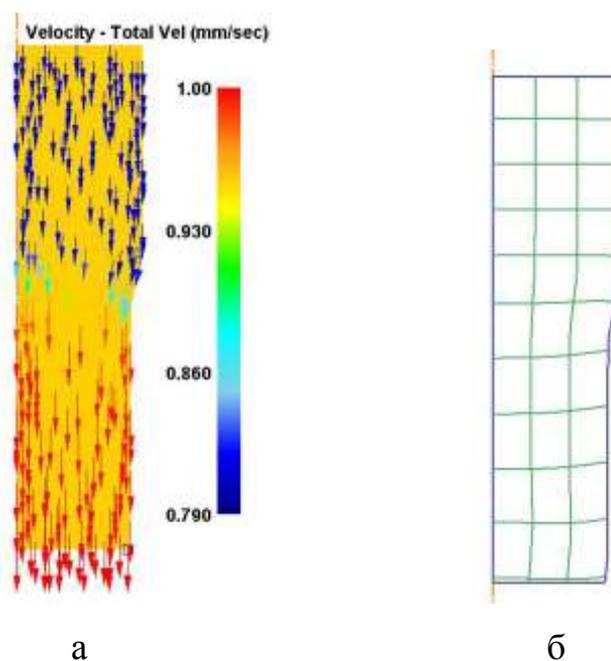
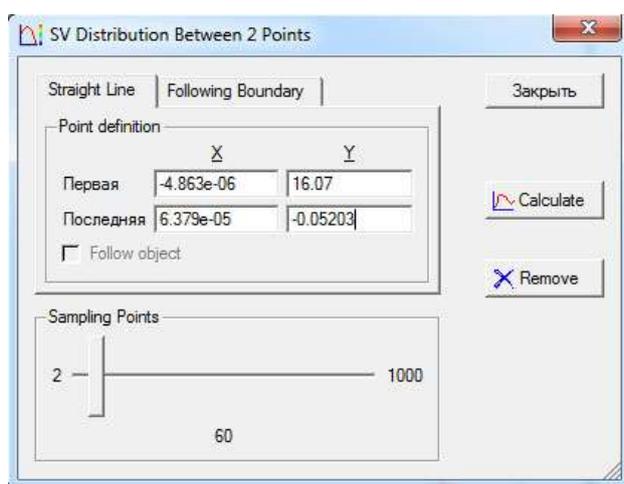


Рисунок 5.23 - Поле скоростей (а) и искажение координатной сетки (б) при волочении

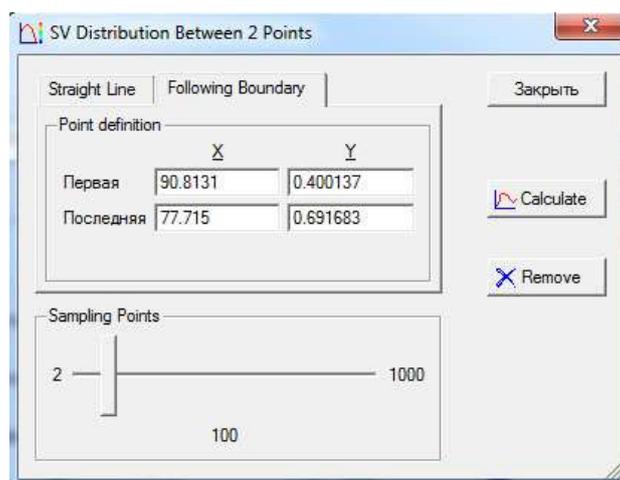
Для построения координатной сетки (рисунок 5.23, б) нажмите кнопку **Flow Net**  и в окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* и снова нажмите **Next**. В новом окне введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 3 и 10. Нажмите

кнопку **Next**, а затем **Finish**.

Проведите анализ изменения осевых, радиальных, окружных и касательных напряжений в продольном сечении ОПД при волочении (рисунок 26, а). Начнем с построения графика изменения радиальных напряжений. Для этого необходимо отобразить распределение этих напряжений в деформируемой заготовке: нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Stress*» и подтип «*R*». Нажмите **Apply**, а затем **Close** (рисунок 5.21).



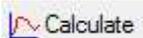
а

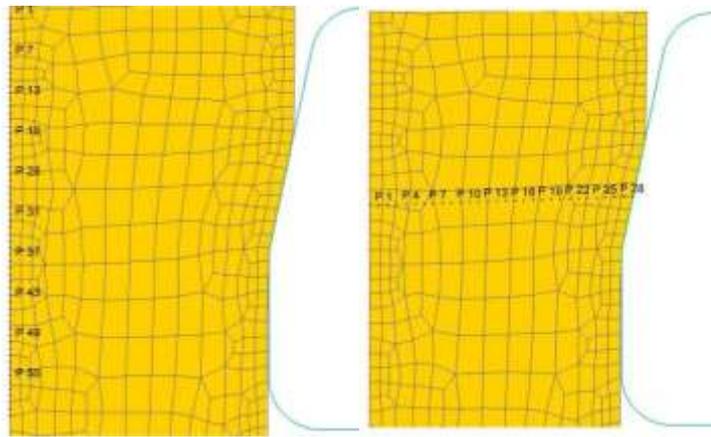


б

Рисунок 5.24 - Окно построения графика по точкам

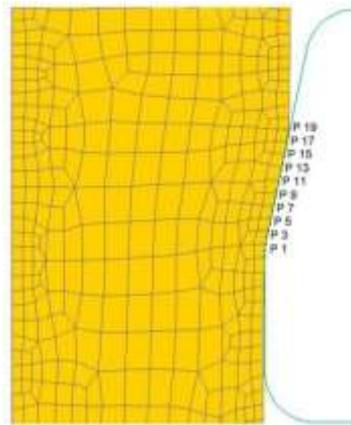
Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Straight Line** (прямая линия) и в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 60 (рисунок 5.24, а).

В окне **Display**, предварительно увеличив ОПД кнопкой **Увеличить** , щелчком ЛКМ укажите точку начала P1 и конца P60 ОПД (рисунок 5.25, а). Нажмите на кнопку **Calculate**  (расчет), при этом в графическом окне отобразится график (рисунок 5.26, а). Нажмите кнопку **Заккрыть**.



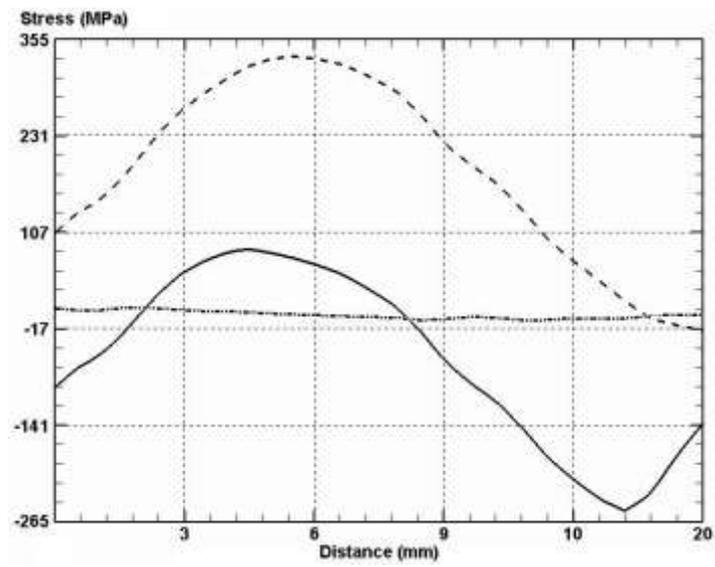
а

б

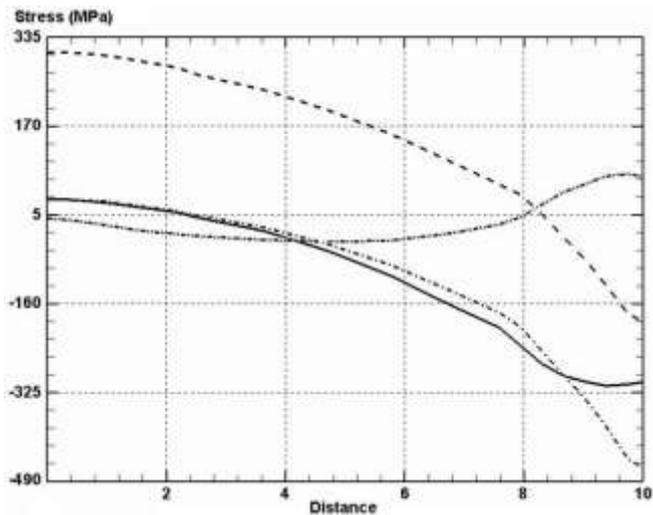


в

Рисунок 5.25. Выбор точек для построения графиков



а



б

----- — радиальные; - . - . - . — осевые; - · - · - · — окружные;  
 - - - - - - - - — касательные напряжения

Рисунок 5.26 - Эпюры распределения напряжений в продольном (а) и поперечном (б) сечении ОПД при волочении

Постройте эпюры распределения осевых, окружных и касательных напряжений вдоль ОПД (рисунок 5.26, а). Для этого достаточно отобразить распределение этих характеристик в деформируемой заготовке и программа автоматически пересчитает ранее построенный график. Вызовите окно **Параметры**  (рисунок 21), а затем выберите тип переменной «*Stress*» и подтип «*Z*», «*Theta*» и «*RZ*», соответственно. На графике, изображенном на рисунке 5.27, а, значение 0 мм по оси абсцисс соответствует точке P1 на рисунке 5.26, а, а 20 мм – точке P60. Радиальные и окружные напряжения совпадают.

Действуя аналогично, проанализируйте изменение осевых, радиальных, окружных и касательных напряжений в поперечном сечении ОПД при волочении (рисунок 5.26, б). Точки для построения графика изображены на рисунке 5.25, б.

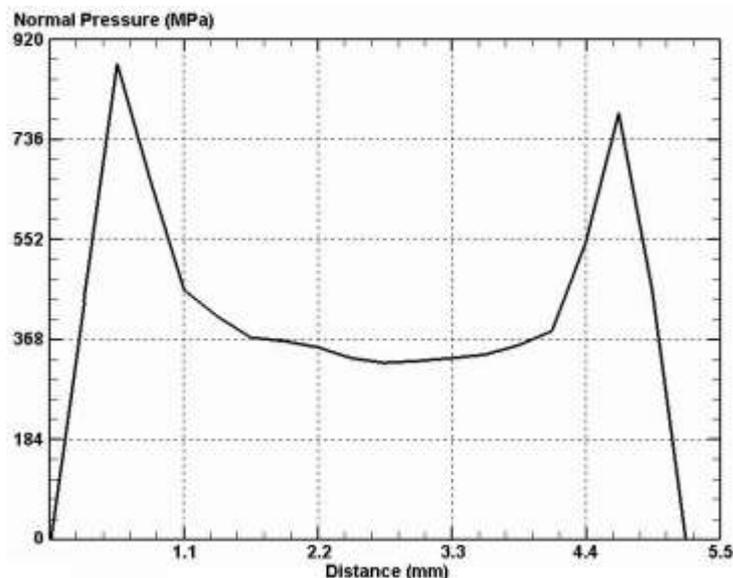
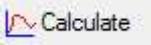


Рисунок 5.27 - Эпюра распределения нормального давления на границе металл – волокна

Постройте график изменения нормального давления на границе деформируемый металл – заготовка (рисунок 5.27). Для этого нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Normal Pressure*». Нажмите **Apply**, а затем **Close** (рисунок 5.21). Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Following Boundary** (по границе) и в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 20 (рисунок 5.24, б). Укажите конечную точку P1 и начальную точку P20 конусной части волокна (рисунок 5.25, в). Нажмите на кнопку **Calculate**  (расчет), а затем **Заккрыть**. На получившемся графике (рисунок 5.27), значение 0 мм по оси абсцисс соответствует точке P1 на рисунке 5.25, в, а 10 мм – точке P20.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса волочения;
  - схема процесса волочения;
  - схемы напряженно-деформированного состояния при волочении.
4. Результаты моделирования волочения через коническую волоку:
  - компьютерная модель волочения;
  - искажение координатной сетки и векторное поле скоростей при волочении;
  - график усилия волочения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций при волочении;
  - график изменения осевых, радиальных, окружных и касательных напряжений в поперечном и продольном сечении ОПД при волочении;
  - эпюра распределения нормального давления на границе деформируемый металл – волока.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте определение процесса волочения.
2. Перечислите основные участки канала волоки.
3. Что называется напряжением волочения?
4. Напишите условия стабильности процесса волочения.
5. По какой формуле рассчитывают коэффициент вытяжки при волочении сплошных круглых профилей?
6. Перечислите основные факторы, влияющие на величину напряжения волочения.
7. Как найти предельную вытяжку при волочении?
8. Опишите схемы главных деформаций и напряжений при волочении круглых сплошных профилей.

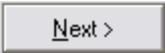
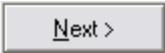
9. Как искажается координатная сетка при волочении круглого сплошного профиля?
10. Запишите условия пластичности при волочении.
11. Как изменяются осевые продольные напряжения по длине канала волокни?
12. Какую функцию выполняет входная воронка в канале волокни?
13. Как влияет угол конусности на усилие волочения?
14. Назовите причины образования кольца износа.
15. Как изменяется структура протягиваемого металла при волочении?
16. Как изменяются механические свойства в зависимости от степени деформации при волочении?
17. При каких условиях образуется внеконтактная зона на входе волоку заготовки?
18. Запишите условия постоянства объема при волочении.
19. Какие реактивные силы возникают при волочении?
20. Как определить границы зоны деформирования по изменениям координатной сетки?
21. Опишите характер изменения сдвиговых деформаций по сечению профиля.
22. Почему при волочении центральные слои движутся быстрее, чем периферийные слои?
23. Как связаны между собой вытяжка и степень деформации?
24. Как связаны между собой скорость входа и выхода заготовки в канал волокни?
25. Как в программе *DEFORM-2D* построить график усилия волочения в зависимости от перемещения?
26. Как открыть задачу в пост- или препроцессоре?
27. Перечислите способы позиционирования объектов в *DEFROM-2D*?

## 5.2 Волочение круглой заготовки

Цель работы: компьютерное моделирование процесса волочения круглой заготовки из алюминия с помощью программного комплекса DEFORM-3D и анализ технологических параметров процесса. Закрепление навыков работы с 3D моделями и расчетами.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Запустите Deform-3D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей лабораторной работы (фамилия\_группа\_1) и затем нажмите .

### Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов два новых инструмента кнопкой , которая находится под деревом объектов.

Нам понадобятся следующие элементы: Заготовка, волока и так называемый зажим для протяжки заготовки. В работе будем уменьшать диаметр поперечного сечения алюминиевой заготовки с 12мм до 9мм, что соответствует степени деформации 44%.

Приступим к созданию геометрии. Выберите заготовку (Workpiece) в дереве объектов и перейдите к закладке геометрия . Мы создаем заготовку длиной  $l = 55\text{mm}$  диаметром  $d = 12\text{mm}$ . Для создания оснастки будем пользоваться геометрическими примитивами, а также воспользуемся уже созданной моделью волоки. Нажмите кнопку геометрические примитивы в закладке геометрия. Из 3-х видов примитивов выберите 2-й (цилиндр) и задайте ему указанные на рисунке 5.28 параметры. После задания параметров нажмите кнопку Create (создать).

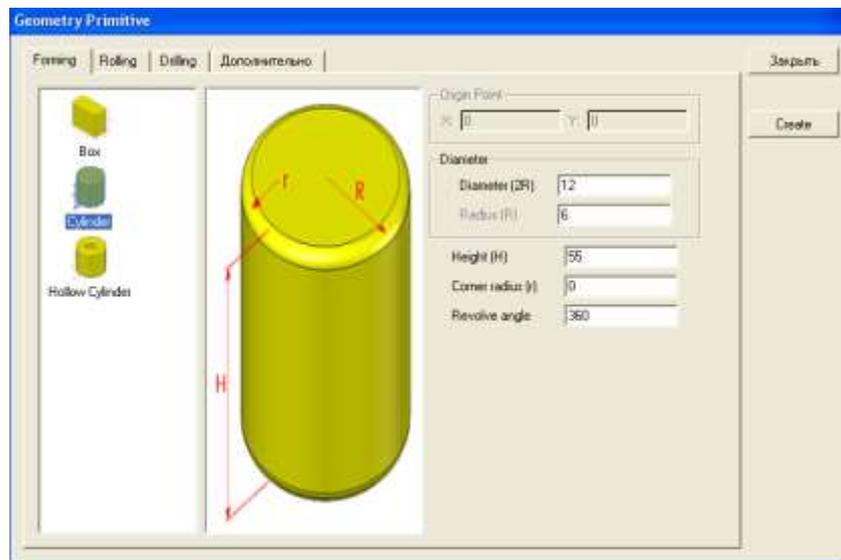


Рисунок 5.28 - Геометрия заготовки

Перейдем к созданию элемента, который будет имитировать клещи, зажимающие заковку, необходимые для реализации процесса протяжки. Он будет представлять собой небольшую шайбу, созданную также из примитива цилиндр, размерами  $h = 55\text{мм}$  и  $d = 12\text{мм}$  (рисунок 5.29). Каким образом такой объект сможет выполнять функцию зажимных клещей? Ответ на этот вопрос будет дан позже. Выделите в дереве объектов Bottom die и перейдите к закладке геометрия  Геометрия, после чего воспользуйтесь геометрическим примитивом цилиндр.

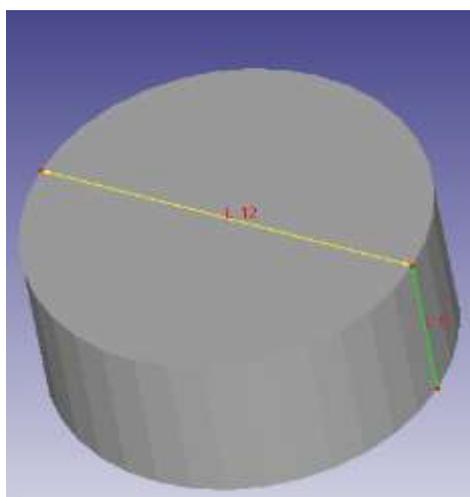


Рисунок 5.29 - Имитатор тянущих клещей

Перейдем к созданию инструмента волоки. Выделите Top\_die в дереве объектов, перейдите к вкладке геометрия  и нажмите на кнопку импорт геометрии . Теперь необходимо загрузить уже существующую на компьютере модель волоки (рисунок 5.30). Файл называется Drawing\_die, путь к нему это D:\Deform-3D\tools\

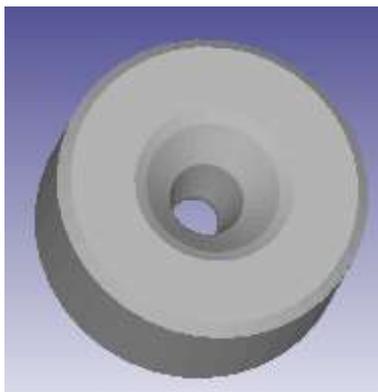


Рисунок 5.30 - Модель волоки

На рисунке 5.31 предоставлен более подробный чертеж геометрии ВОЛОКИ.

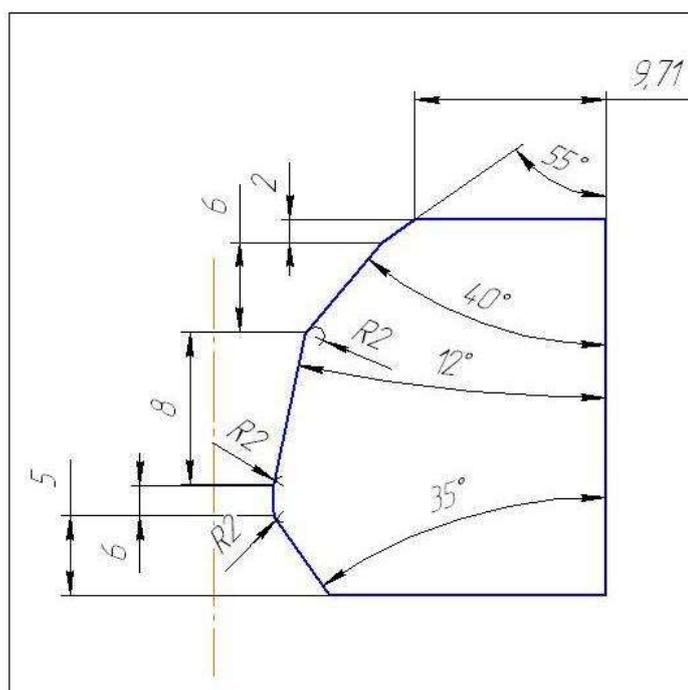
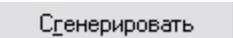


Рисунок 5.31 - Чертеж геометрии волоки

## Создание сетки конечных элементов

Выберите в дереве объектов вашу заготовку (Workpiece). Перейдите к закладке сетка  Сетка. В закладке количество элементов установите значение 30000 элементов и нажмите .

## Задание материала заготовки

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку  Общее, откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 5.32.

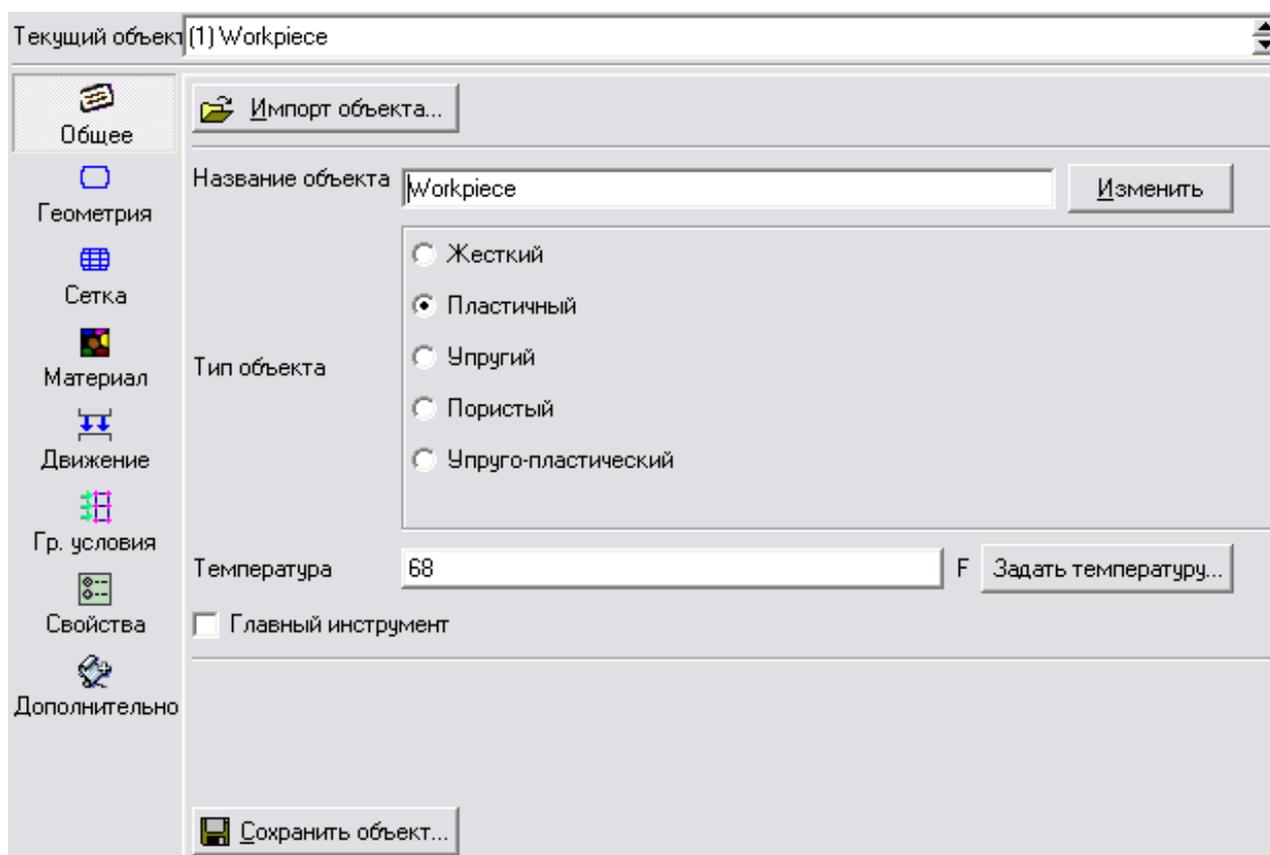


Рисунок 5.32 -Основное окно объекта

Убедитесь что для заготовки установлены свойства пластического объекта.

Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку , откроется

окно «материал», показанное на рисунке 5.33.

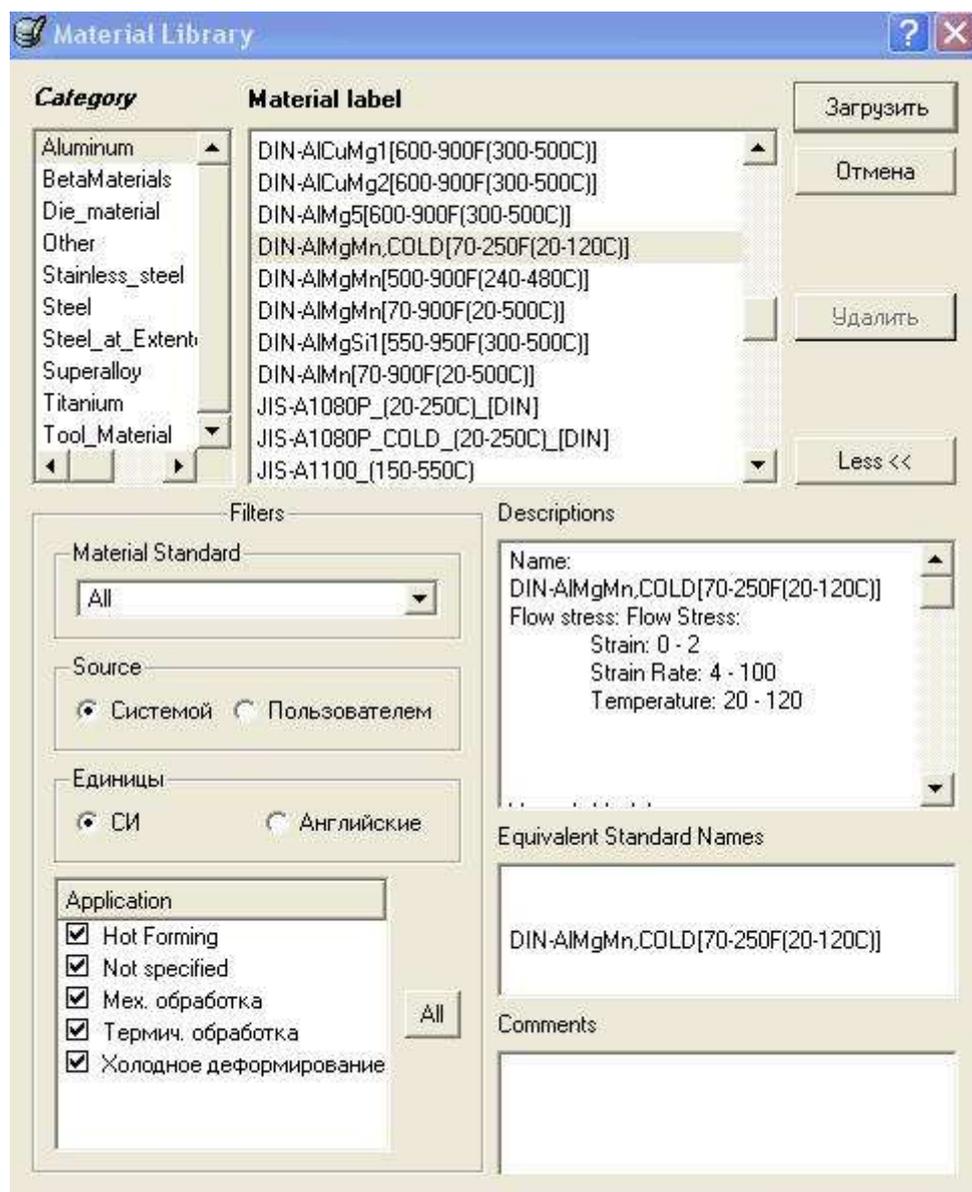


Рисунок 5.33 - Окно «Материал»

В том же Aluminum выберите DIN-AlMgMn,COLD[70-250F(20-120C)] (АД31) и задайте материал кнопкой загрузить.

### Позиционирование оснастки

Нажмите на кнопку позиционирование объектов в верхней панели закладок . Перейдите к закладке Интерференция. Первым шагом будет интерференция заготовки относительно матрицы. Установите параметры смещения как указано на рисунке 5.34 и нажмите Применить.

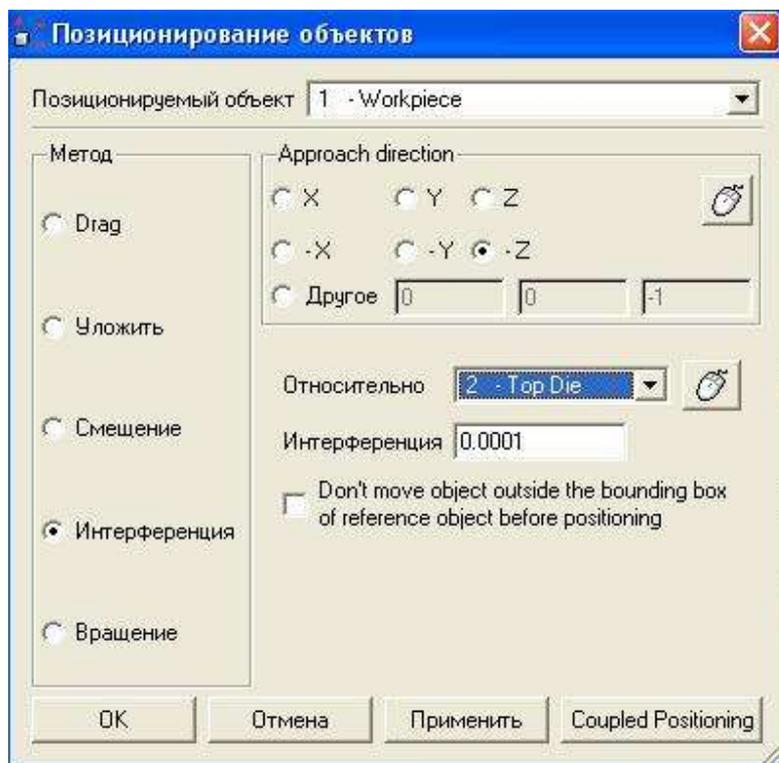


Рисунок 5.34 - Positioning the blank

Then position the «directing» part relative to the blank along the Z axis, Figure 5.35 and 5.36.

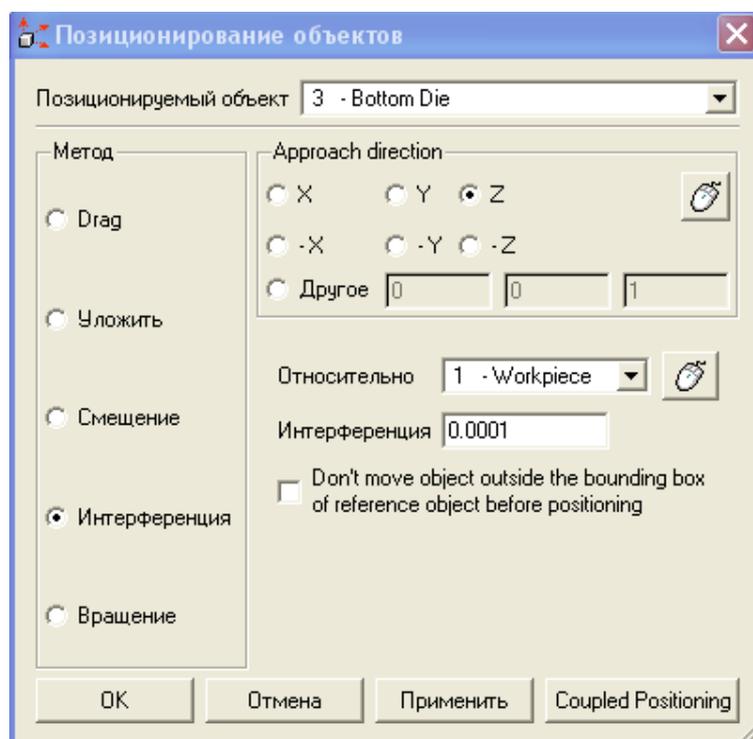


Рисунок 5.35 - Positioning the tool

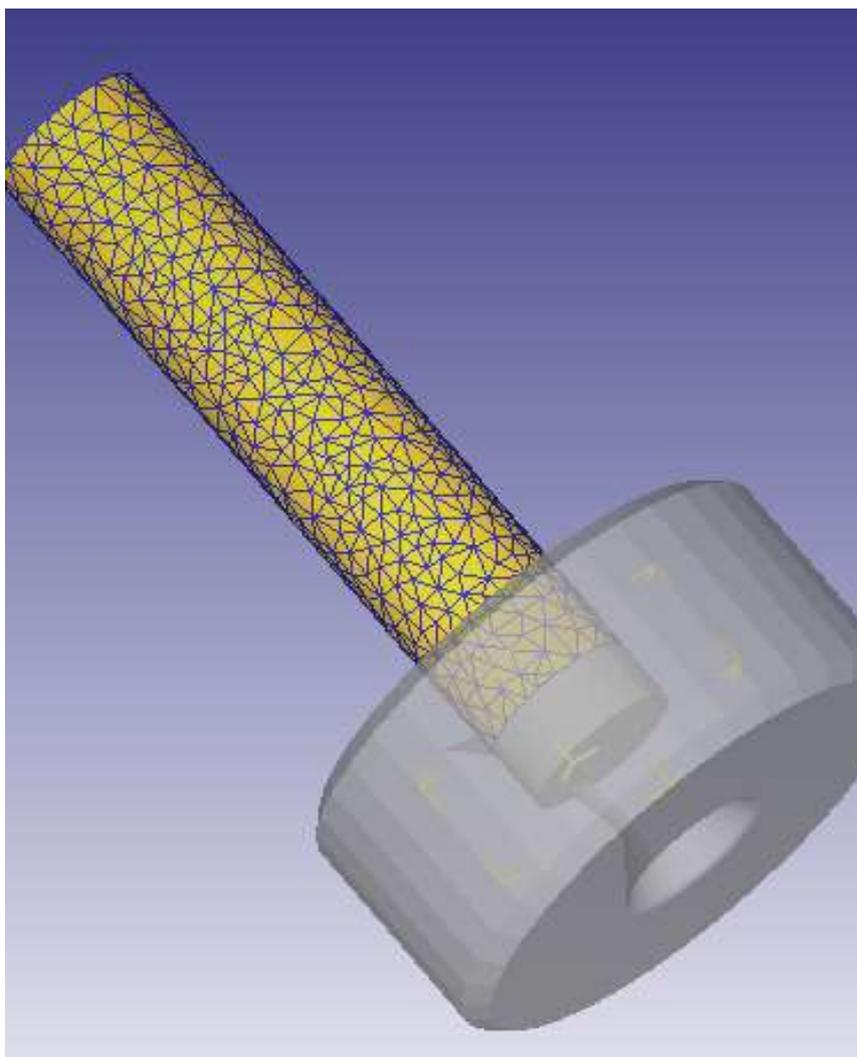


Рисунок 5.36 - Правильно расположенная оснастка

### Назначение связи между объектами

Для определения связи между объектами нажмите кнопку . Так как никакие отношения в настоящее время не определены, появится сообщение, спрашивающее, хотите ли вы, чтобы система добавила отношения по умолчанию за вас. Нажмите кнопку .

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными двумя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется лишь одним инструментом - волокой. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как подчинённый

объект.

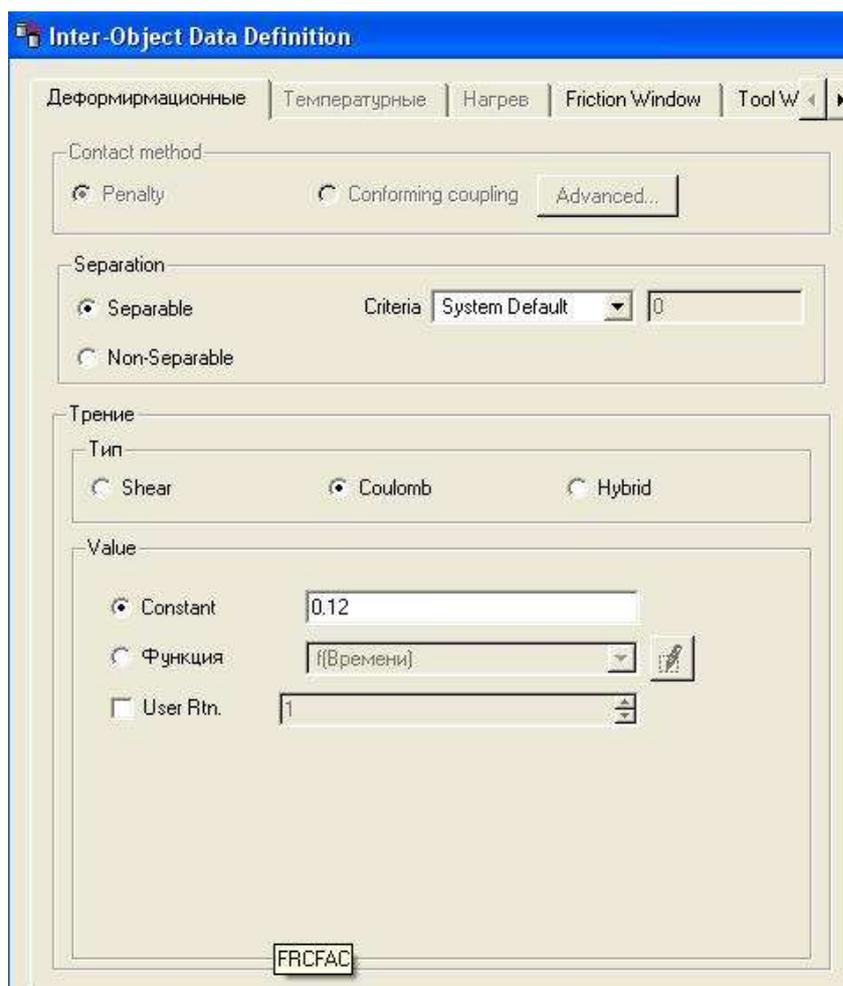


Рисунок 5.37 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Выберите коэффициент трения 0.12. Теперь задайте закон трения по Зибелю (Constant Tau) (рисунок 5.37).

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна INTER-OBJECT.

Теперь, когда отношения между волокой и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой направляющей частью.

Кликните ЛКМ дважды на отношение Bottom die – Workpiece. Выберите коэффициент трения 0.12. Теперь задайте закон трения по Зибелю (Constant Tau). Но, в случае с этой контактной парой в подразделе Separation (Разделение) установите галочку на пункте Non-Separable (неотделимо) (рисунок 5.38).

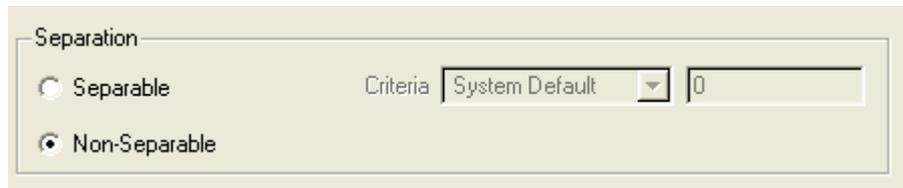


Рисунок 5.38 - Задание параметра «Неразделимо»

Этот параметр и будет являться ключевым в моделировании процесса волочения в DEFORM - 3D. Он будет имитировать поведение захватывающих клещей в реальном процессе волочения.

### Задание движения

Выделите в дереве объектов Bottom\_die и перейдите во вкладку движение



. Нам необходимо задать движение по оси, в данном случае ось -Z. Скорость движения инструмента будет иметь значение 1мм в секунду (рисунок 5.39).

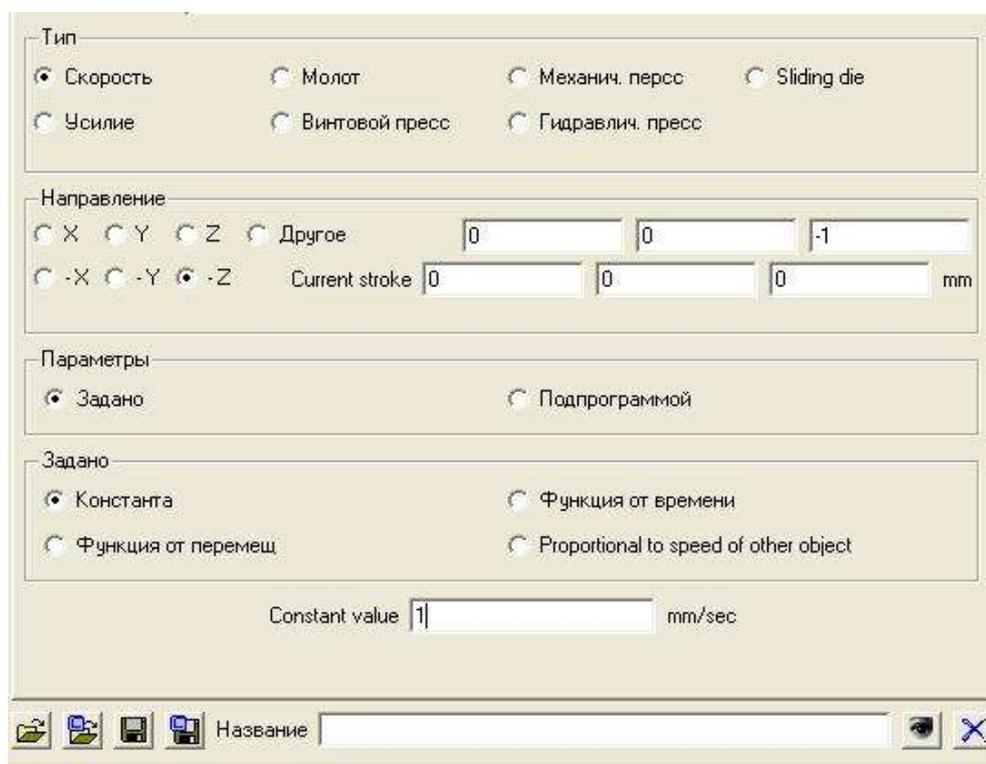


Рисунок 5.39 - Задание скорости волочения

## Установка шагов расчета

Нажмите кнопку Simulation controls  в верхней панели закладок.

Нажмите  Основное и убедитесь, что единицы измерения установлены в СИ.

Нажмите  Шаг для просмотра управления временными шагами. Убедитесь, что номер начального шага установлен как -1. Отрицательный знак говорит о том, что это шаг, записанный препроцессором (шаги решения записанные в базу данных в процессе расчета будут положительны). Установите число шагов расчета 110. Установите приращение шага при сохранении 3 («через сколько шагов сохранять»). Каждый четвертый шаг решения будет записан в базу данных. Установите главный инструмент Top Die (Волока) (рисунок 5.40).

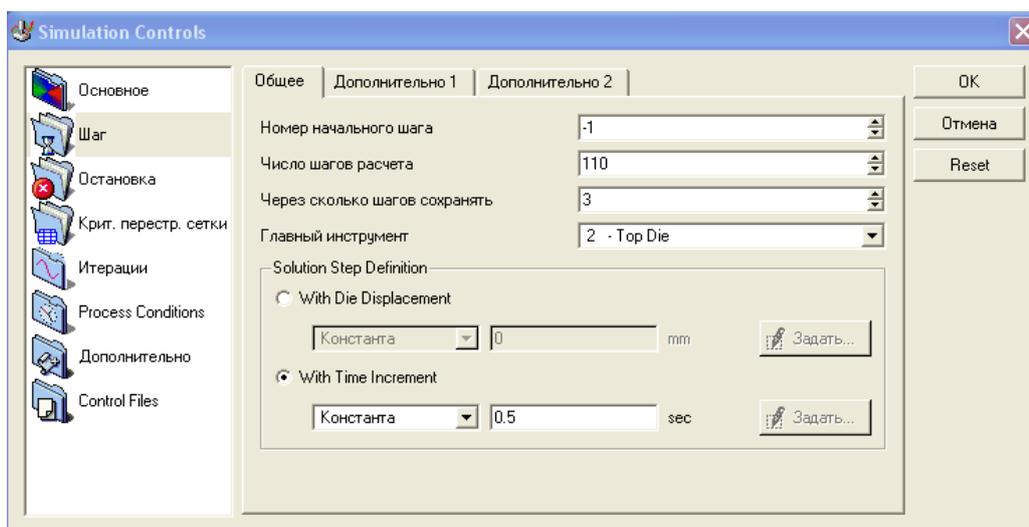


Рисунок 5.40 - Задание числа шагов расчёта.

## Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных нажав кнопку , нажмите кнопку **Проверить**, когда появится сообщение  База данных может быть сгенерирована нажмите кнопку **Сгенерировать** и начнётся генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на рисунке 5.41.

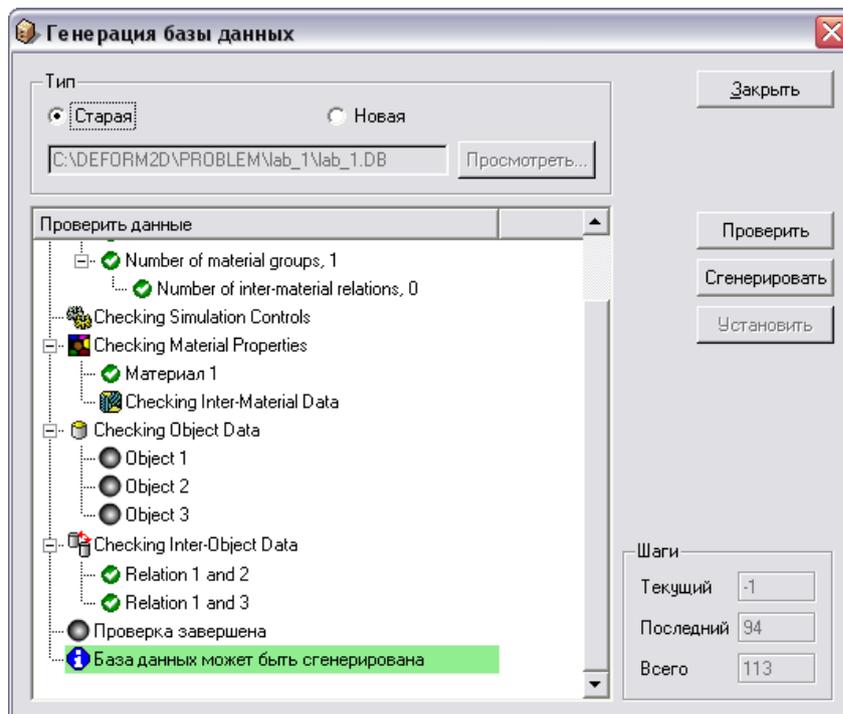


Рисунок 5.41 - Окно «Генерация базы данных»

При появлении сообщения  «Запись базы данных завершена», можете закрыть Deform3D – Preprocessor.

### Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой [Старт](#) или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
*****Message*****
Simulation is completed and stopped at the user specified time step .
```

После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой  в правом нижнем углу окна.

### Просмотр результатов

Посмотрите поэтапно процесс волочения (рисунок 5.42).

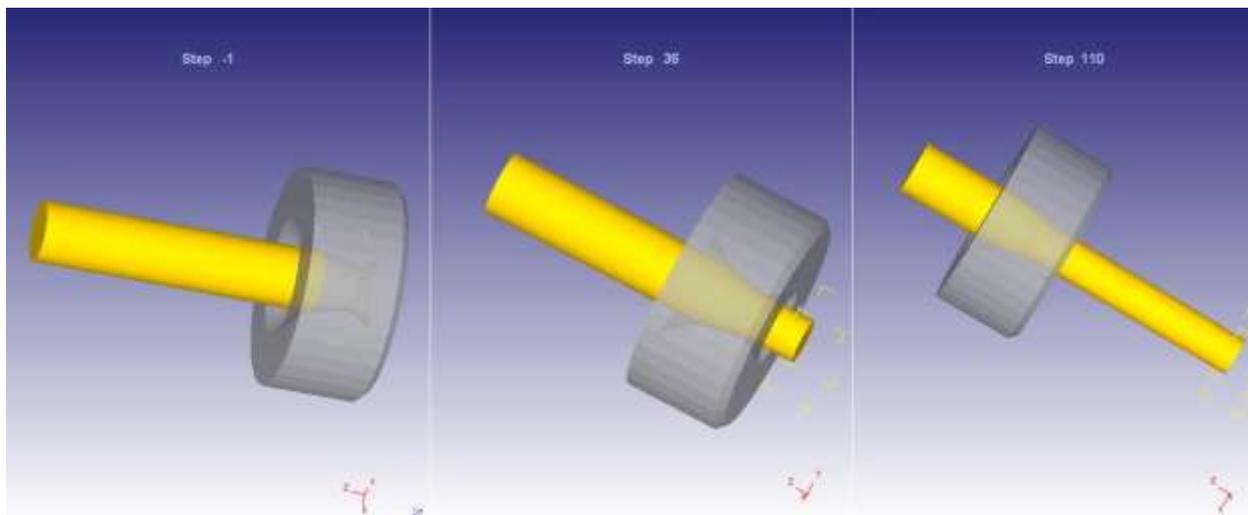


Рисунок 5.42 - Этапы волочения

### Построение индикаторной диаграммы процесса

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков. Выберите только волоку (Top die). Нажмите кнопку Применить, а затем кнопку ОК (рисунок 5.43).

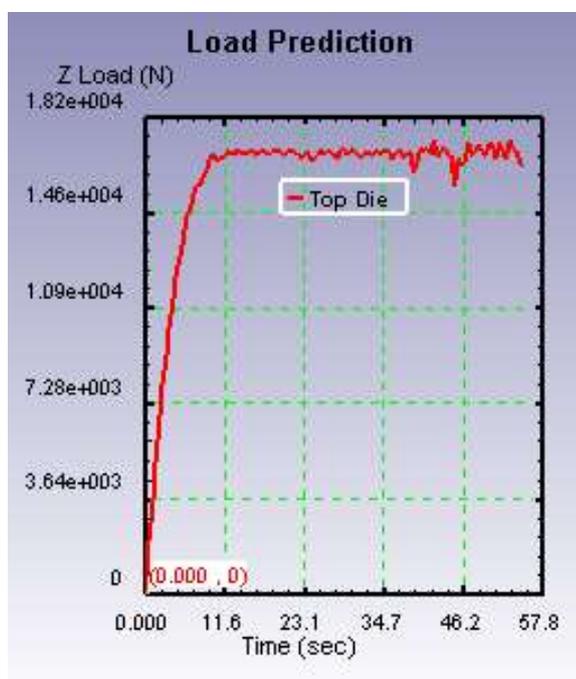


Рисунок 5.43 - Индикаторная диаграмма процесса

Самостоятельно определите стадии волочения, используя график усилия перемещения. Когда посмотрели графический результат, его можно скрыть,

для этого наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide) (рисунки 5.44, 5.45).

Задайте разрез процесса, а также активируйте отображение внутренних напряжений.

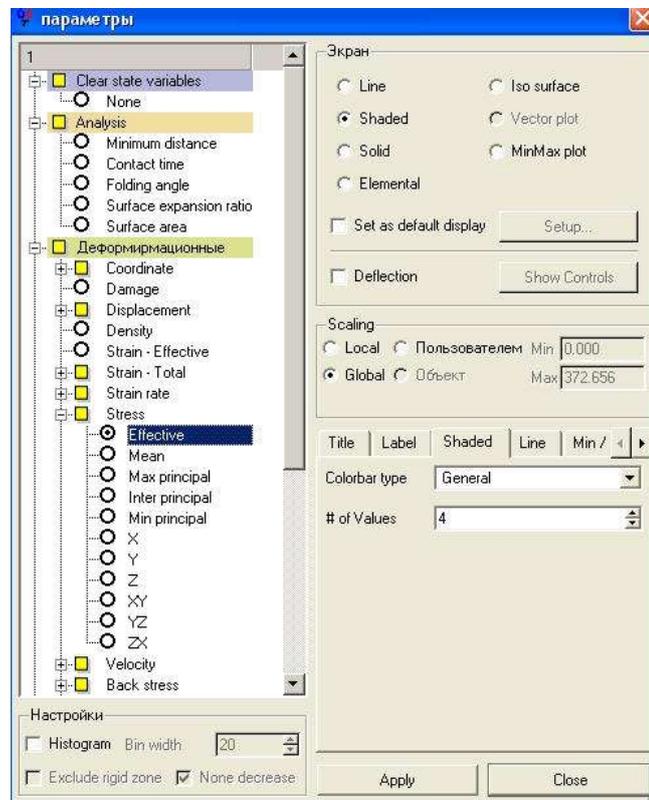


Рисунок 5.44 - Задание отображения внутренних напряжений

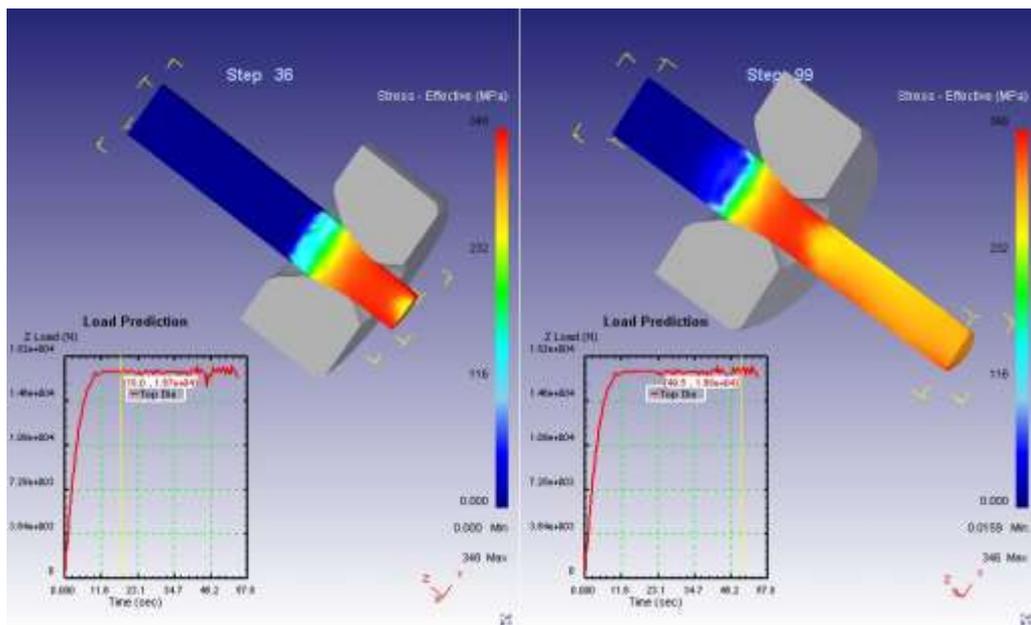


Рисунок 5.45 - Распределение внутренних напряжений

Сделайте видимой только заготовку. Выберите ее в дереве объектов и нажмите кнопку Режим одиночного объекта (Single object mode) . Затем активируйте режим отображения течения металла в заготовке (рисунок 5.46). Рассмотрите поэтапно полученную картину отображения скоростей (рисунок 5.47). Сравните скорости течения металла на входе в волоку и на выходе из неё.

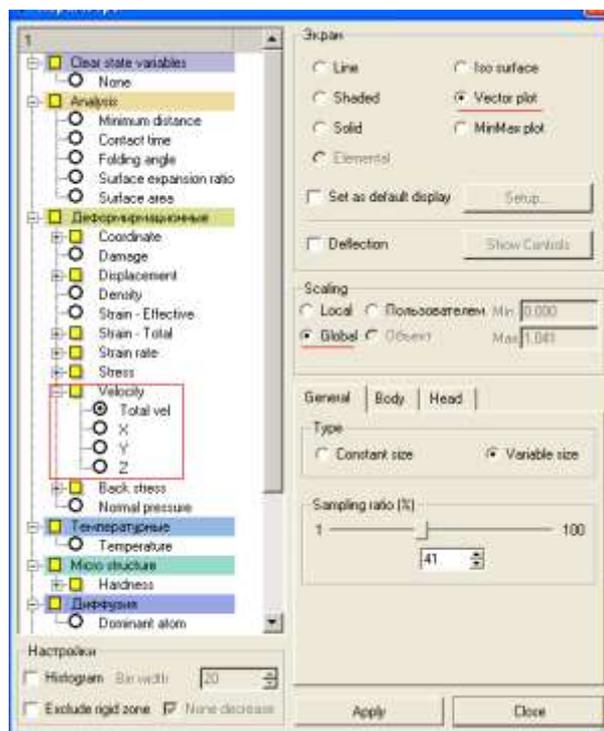


Рисунок 5.465 - Задание вектора течения металла

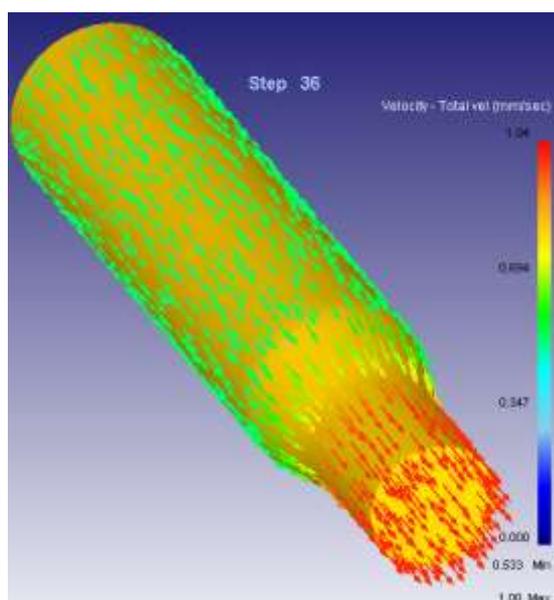


Рисунок 5.47 - Отображение вектора течения металла

Таким же образом можно посмотреть на величину упрочнения металла. Нажмите на кнопку Параметры . Вам откроется большое меню. Выберите закладку Strain-Total(Упрочнение), а в ней закладку Max principal. После чего нажмите кнопку принять(Apply) (рисунок 5.48).

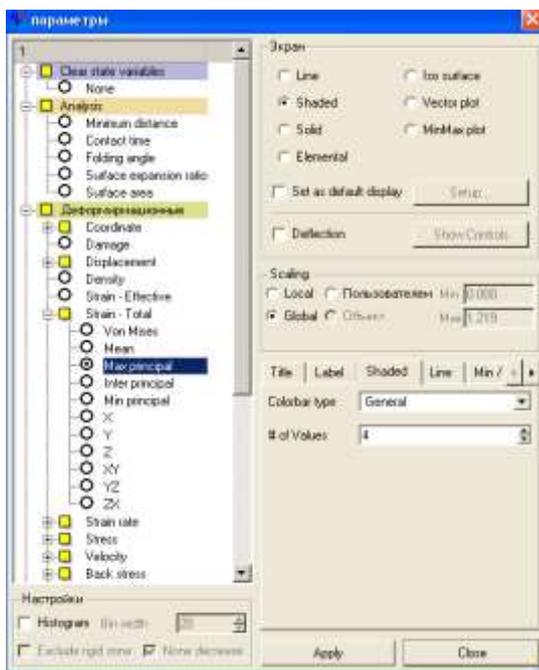


Рисунок 5.48 - Задание отображения величины упрочнения

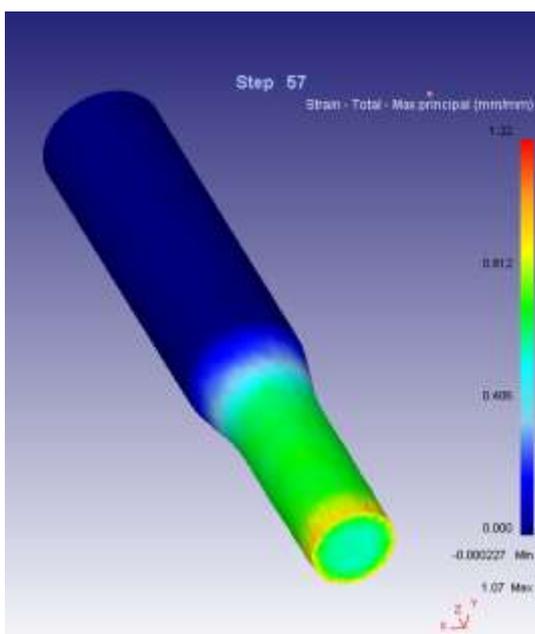


Рисунок 5.49 - Упрочнение материала заготовки

## Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема волочения заготовки.
4. Индикаторная диаграмма.
5. Распределение интенсивностей напряжений.
6. Эскиз волоки, используемой в данной работе.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение процесса волочения?
2. Перечислите основные виды волочения?
3. Какую функцию выполняет входная воронка в канале волоки?
4. Как влияет угол конусности на усилие волочения?
5. Как определить зоны деформирования при волочении в программе DEFORM – 3D?
6. Почему при волочении центральные слои движутся быстрее чем периферийные слои?
7. Какой закон трения используется в расчете процесса?
8. Как задать геометрию инструмента?
9. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?
10. Как связаны между собой вытяжка и степень деформации?
11. Как открыть задачу в пост- или препроцессоре?
12. Перечислите способы позиционирования объектов в DEFORM?



### **5.3 Безоправочное волочение тонкостенных труб в блок волок**

Цель работы: компьютерное моделирование процесса безоправочного волочения тонкостенных труб из алюминиевых сплавов в блок волок с помощью метода конечных элементов в специализированном программном комплексе DEFORM-2D и анализ технологических параметров.

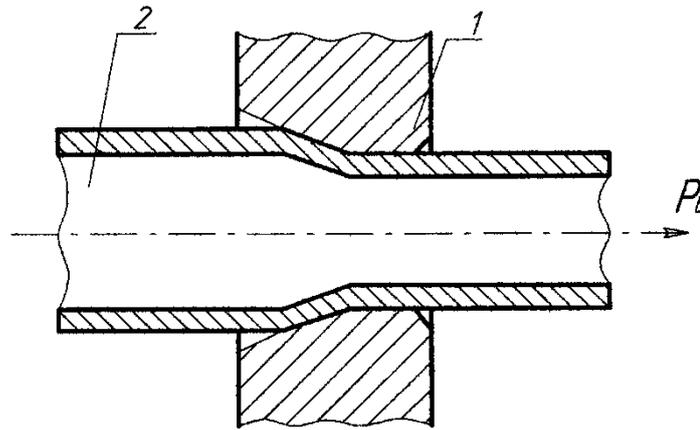
#### **Краткие теоретические сведения**

Одним из видов изделий, получаемых волочением, является тонкостенная труба.

В наше время трубы являются одним из важнейших элементов, используемых для решения многообразных технических проблем. Это обусловлено исключительными свойствами применяемого материала, имеющего высокую прочность и упругость при обычных и высоких термических нагрузках, а также дающее возможность получить прочнейшее соединение путем сварки. Трубы находят свое применение в различных отраслях промышленности: автомобилестроение, авиастроении, транспортном, энергетическом машиностроении, а также в нефтедобывающей, химической промышленности, в повседневном быту для прокладки водопровода и т.д.

Безоправочное волочение тонкостенных труб в основном применяют как для изготовления труб малого диаметра, так и в качестве отделочных переходов, цель которых – получение труб с жесткими допусками по диаметру. Заготовку для безоправочного волочения обычно получают прессованием, холодной прокаткой труб или оправочным волочением.

Схема волочения тонкостенной трубы в одну волоку приведена на рисунке 5.50.



1 – волока; 2 – трубная заготовка

Рисунок 5.50 - Схема процесса волочения тонкостенной трубы без оправки

Основная особенность деформации металла по этой схеме заключается в том, что из-за отсутствия внутренней опоры металл при волочении течет в направлении наименьшего сопротивления и в направлении приложенной силы  $P_0$  и внутрь трубы. Поэтому стенка тонкостенной трубы при волочении без оправки обычно утолщается.

В последнее время в трубной промышленности при безоправочном волочении тонкостенных труб все шире начинают применять сдвоенные волокна (рисунок 5.51).

При безоправочном волочении труб из алюминия и его сплавов предельные вытяжки за переход весьма значительны и могут достигать 1,5 - 1,6. Однако эти вытяжки зачастую не могут быть реализованы в производственных условиях, так как при этом способе волочения величина вытяжки ограничивается не столько прочностными свойствами металла трубы, сколько качеством внутренней поверхности и устойчивостью поперечного сечения трубы. При безоправочном волочении труб с ростом деформации заметно ухудшается внутренняя поверхность, приобретая вид так называемой «апельсиновой корки». При этом образуется определенная чешуйчатость, вызванная тем, что отдельные, по-разному ориентированные зерна металла деформируются различно. В связи с этим при безоправочном волочении оптимальные вытяжки не превышают 1,4 - 1,5. Чаще всего при безоправочном

волочении стараются увеличить дробность деформации путем установки в волокодержателе двух последовательно расположенных волок.

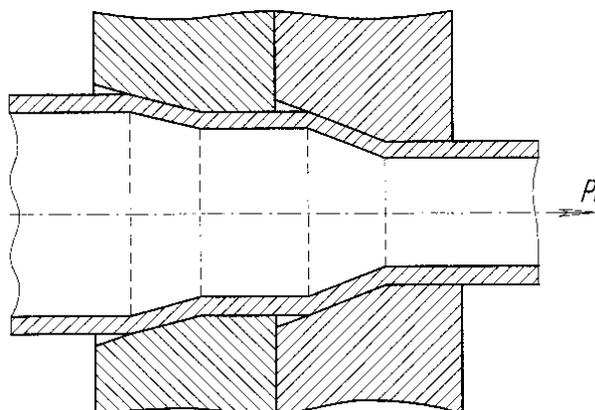


Рисунок 5.51 – Схема безоправочного волочения тонкостенных труб в две волокна

Первая по ходу волочения волокна служит для центровки трубы, а во второй осуществляется основное обжатие трубы по диаметру. Надежная центровка трубы при входе в волокно обеспечивает снижение неравномерности деформации, что позволяет на 10 – 15% повысить вытяжки за переход и уменьшить продольную кривизну труб после волочения.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

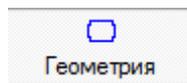
Для создания новой задачи необходимо в DEFORM-2D левой кнопкой мыши (ЛКМ) вызвать команду  на панели управления. После нажатия ЛКМ команды **Next** появляется запрос на ввод названия задачи. Даем название: DRAWING. Затем нажимаем **Finish**.

После запуска препроцессора необходимо убедиться в том, что в качестве системы измерения выбрана система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (**Simulation controls** ).

## Построение геометрии инструмента и заготовки.

### Позиционирование объектов

Выполним компьютерное моделирование процесса волочения трубы диаметром  $\varnothing 20\text{мм}$  до  $\varnothing 15\text{мм}$  через 2 конические волокна.. Геометрию заготовки можно построить с помощью геометрических примитивов ( пункт **Геометрия**



, закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**). Задаем размеры: по высоте 40мм, внутренним радиусом 2 мм (рисунок 5.52). Для этого в окне **Geometry Primitive** необходимо выбрать тип объекта **hollow Cylinder** и ввести в строках **Width** (ширина)и **Height** (высота) значения соответственно 2 и 40мм (рисунок 5.52).В графе **Origin point** в графе X ввести 10 Затем необходимо нажать ЛКМ команду **Create** (создать), а затем **Заккрыть**.

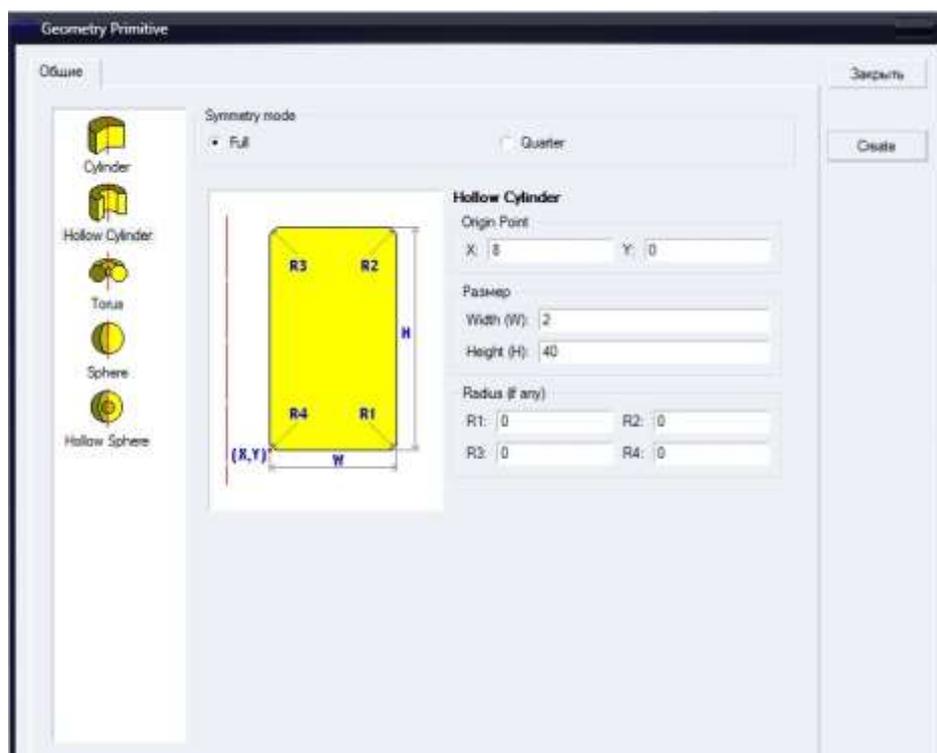


Рисунок 5.52 – Окно **Geometry Primitive**

Для создания модели первой волокна необходимо добавить в **Дерево объектов** верхний инструмент **Top Die**. Для этого необходимо ЛКМ нажать команду **Добавить объект** . Для построения геометрии волокна необходимо

перейти к закладке **Edit** в пункте геометрия. В появившееся **Поле ввода геометрии** последовательно введем значения, представленные на рисунке 5.53. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на команду **Применить**.

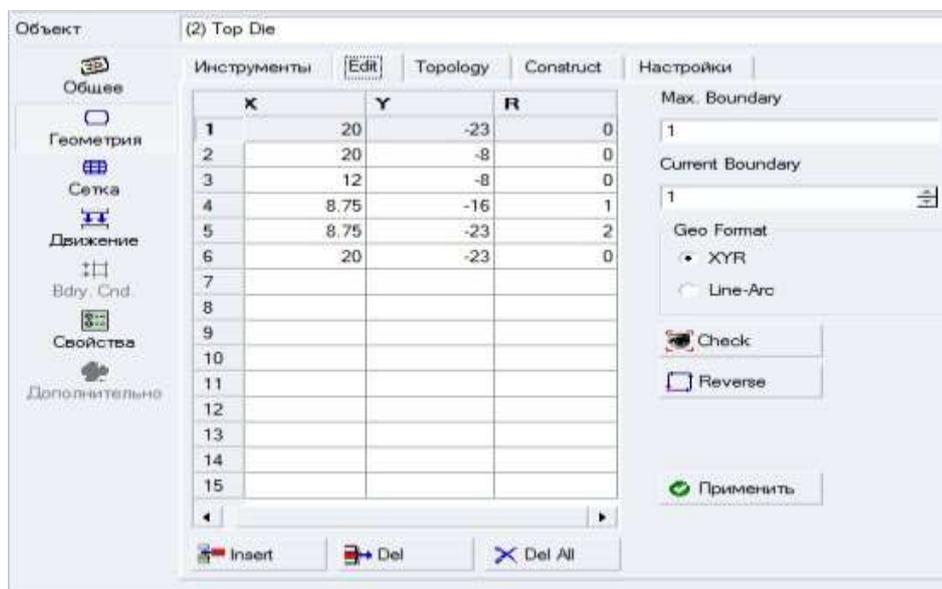


Рисунок 5.53 – Построение геометрии первой волоки

Для создания второй волоки необходимо добавить в **Дерево объектов** нижний инструмент **Bottom Die**. Для этого необходимо ЛКМ нажать команду **Добавить объект** . Для построения геометрии волоки необходимо перейти к закладке **Edit** в пункте геометрия. В появившееся **Поле ввода геометрии** последовательно введем значения, представленные на рисунке 5.54. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на команду **Применить**.

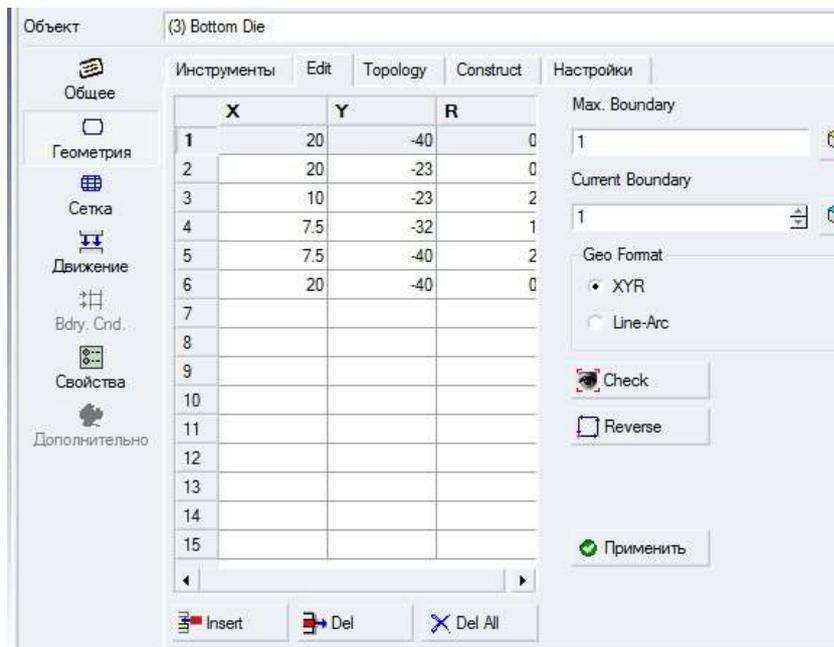


Рисунок 5.54 – Построение геометрии второй волоки

Проверяем полученную геометрию на наличие ошибок, для этого ЛКМ вызовем команду **Check&Correct Geometry**, находящуюся в закладке **Check** . В случае верного построения появится сообщение «*Geometry is legal*». Конечная геометрия заготовки и волоки изображена на рисунке 5.58.

Для расположения заготовки и волоки относительно друг друга (рисунок 5.55) в окне **Object positioning**  вызовем ЛКМ команду **Позиционирование объектов** – метод **Интерференция** (рисунок 5.55). В строке **Позиционируемый объект** выбираем *Workpiece*, в строке **Относительно** – *Top Die*. Так как необходимо перемещение заготовки по оси Y в обратном направлении, в блоке **Approach direction** поставим флажок напротив надписи «-Y». Нажать ЛКМ команду **Применить** (рисунок 5.55).

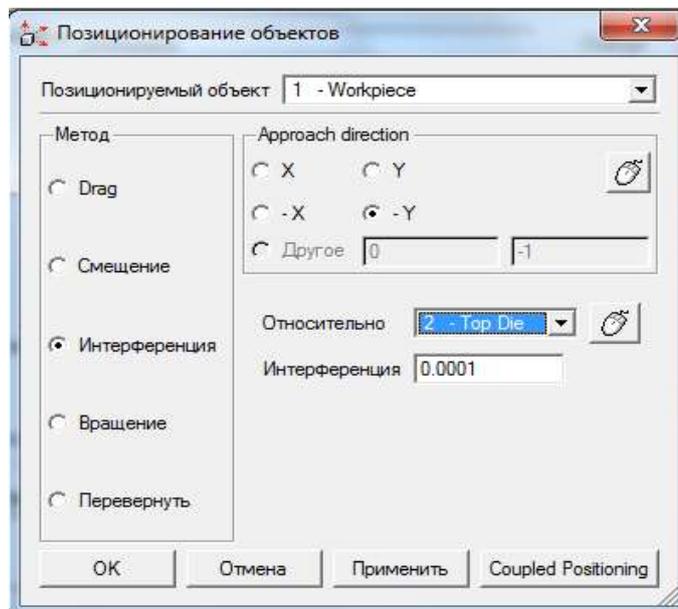


Рисунок 5.55 – Окно **Позиционирование объектов**

### Создание модели заготовки

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы необходимо перейти к закладке **Сетка** . Зададимся количеством конечных элементов равным 1000 и нажмем команду **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки. Для этого в пункте **Общее** вызовем закладку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выбираем алюминиевый сплав *DIN-ALMgMn, GOLD[70-250F(20-120C)]* (АД31) и выбираем команду **Загрузить**.

Сплав АД31 относится к группе алюминиевых деформируемых сплавов и используется для изготовления деталей невысокой прочности и высокой коррозионной стойкости, работающих в интервале от  $-70^{\circ}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ .

### Задание движения

Так как деформирующее усилие при волочении прикладывается к заготовке, то необходимо наложить перемещение по оси *Y* в отрицательном направлении на узлы конечно-элементной сетки, лежащие на нижнем торце заготовки (рисунок 7).

В **Дереве объектов** выделяем заготовку *Workpiece* и переходим к

пункту **Bdry.Cnd.**  (граничные условия). Тип граничного условия: *Velocity* (скорость), находящийся в блоке **В.С. Type**. Зададим значение скорости равное -1мм/с. В блоке **Направление** поставим флажок напротив надписи «Y».

Выберем узлы, на которые будет наложено граничное условие, находящиеся на нижнем торце заготовки. Для этого в окне **Pick nodes** (выбор узлов), обычно расположенном в левом нижнем углу экрана, выбираем команду **By edge**  (по грани). Затем ЛКМ укажем нижнюю грань заготовки, при этом все узлы грани выделяются красными точками.

Для применения указанного граничного условия на выбранные узлы вызываем ЛКМ команду **Добавить граничные условия**  в пункте **Bdry.Cnd.**

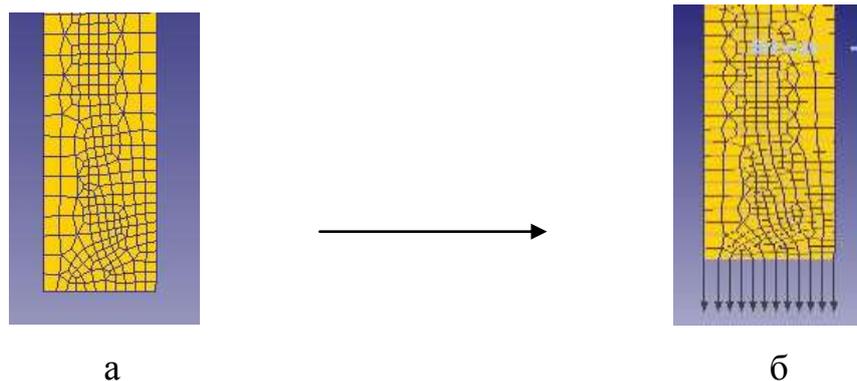


Рисунок 5.56 – Выбор узлов заготовки (а) и наложенное перемещение (б)

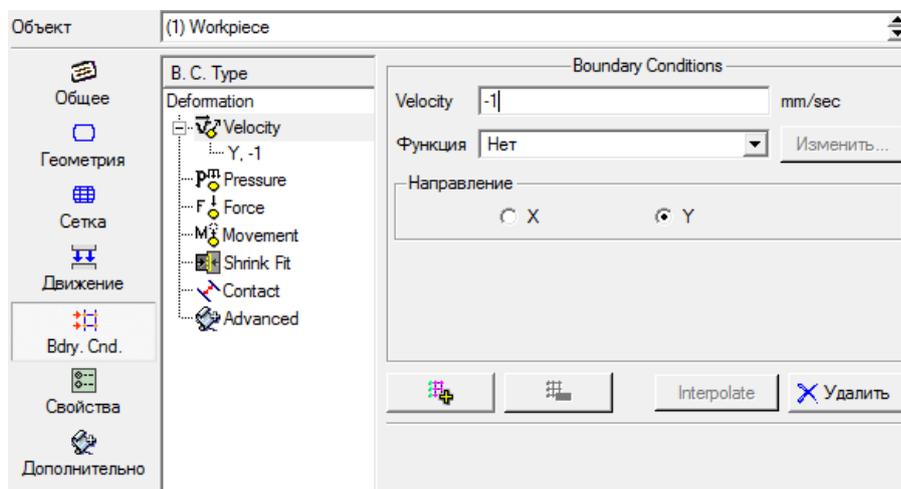


Рисунок 5.57 – Задание граничных условий

## Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Для назначения контактных поверхностей необходимо ЛКМ вызвать команду **Inter-object** , в появившемся окне выбираем команду **Yes**. Окно (рисунок 5.58).

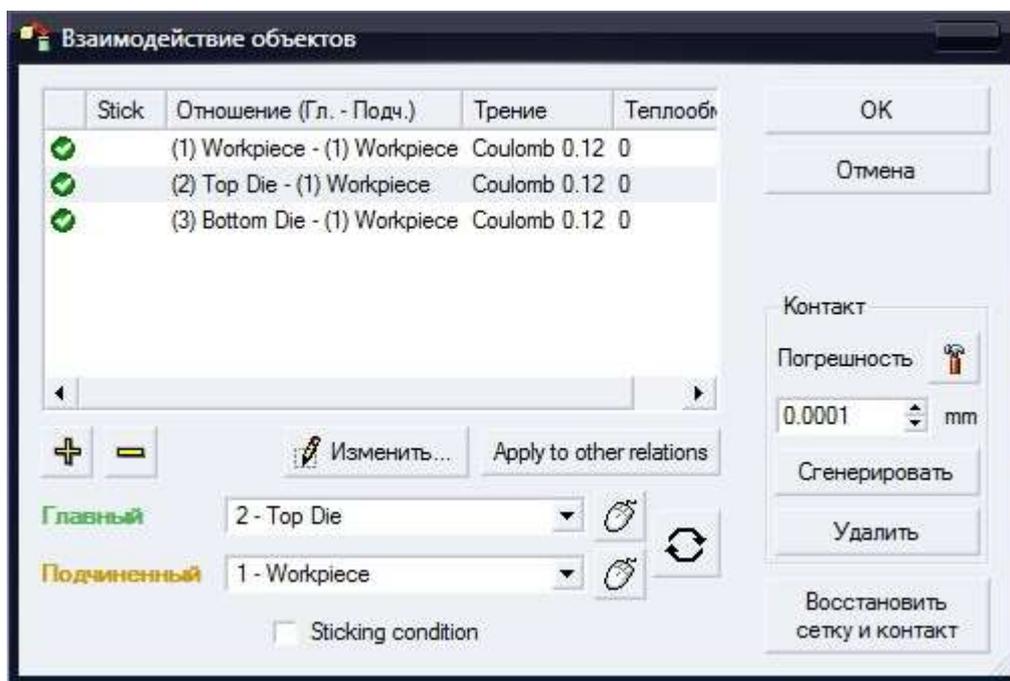


Рисунок 5.58 – Окно **Взаимодействие объектов** после задания исходных данных

Для определения параметров контакта необходимо вызвать команду **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставить флажок напротив надписи «*Coulomb*» (трение по закону Кулона), и указать коэффициент трения равный 0,12. Нажать **Заккрыть** (рисунок 5.59).

Так как коэффициент трения между заготовкой и волокой одинаков, необходимо вызвать команду **Apply to other relations**, чтобы применить параметры первого контакта к остальным.

Для генерации точности, с которой компьютер создаст контактные пары, необходимо нажать кнопку **Погрешность** , после чего вызвать команду **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта. Для выхода из окна

**Взаимодействие объектов** необходимо ЛКМ нажать **ОК**.

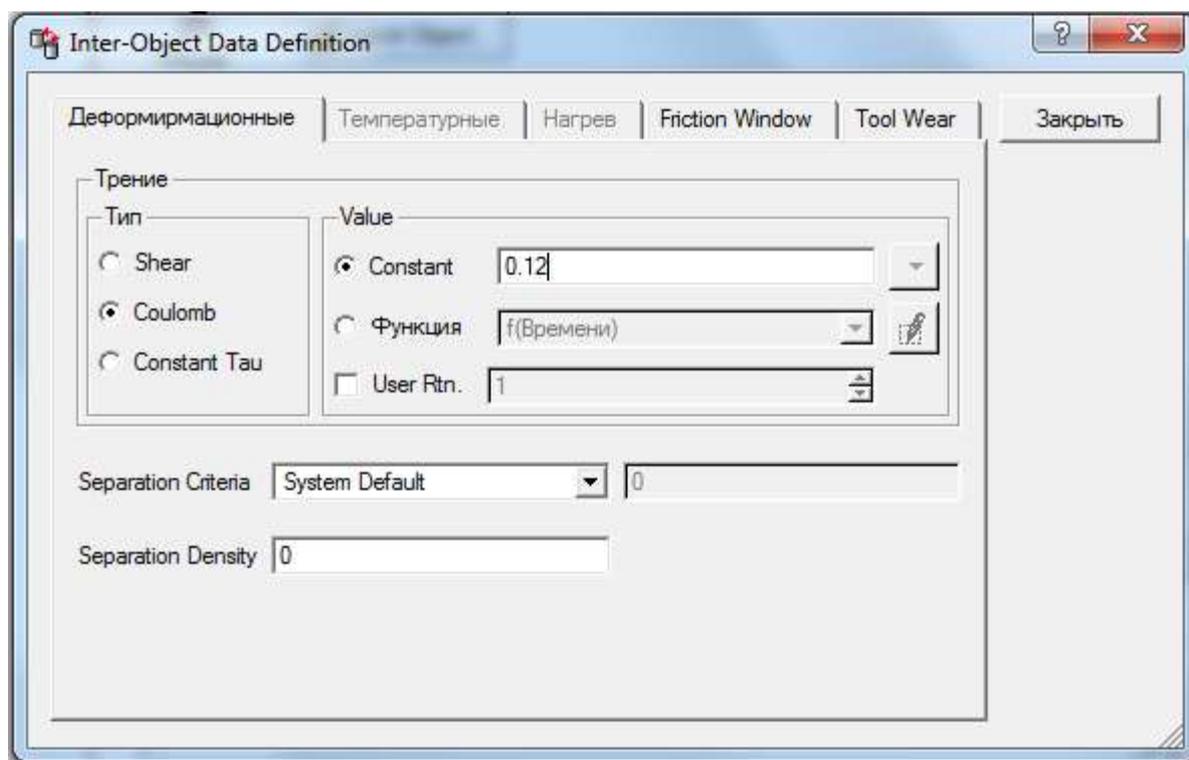


Рисунок 5.59 – Задание коэффициента трения

### Задание числа шагов расчета

Так как движение накладывается на узлы заготовки, а не на инструмент, то шаг решения задачи необходимо ограничить во времени. Для этого необходимо вызвать ЛКМ окно **Simulation controls**  и перейти к закладке

**Шаг** . В блоке **Задание шагов** установим флажок напротив надписи **With Equal Time Increment** (с равным приращением по времени), введем величину 0,25, т.е. при скорости волочения 1мм/с за один шаг нижний торец заготовки переместится на 0,25 мм.

Количество шагов расчета примем равным 365 и введем данное значение в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 5.60). В строку **Через сколько шагов сохранять** вводим число 10 – интервал сохранения шагов в базу данных, в строке **Главный инструмент** установим *Top Die*. Для подтверждения команды необходимо ЛКМ нажать **ОК**.

Данные необходимо сохранить нажав ЛКМ **Сохранить** ,

расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

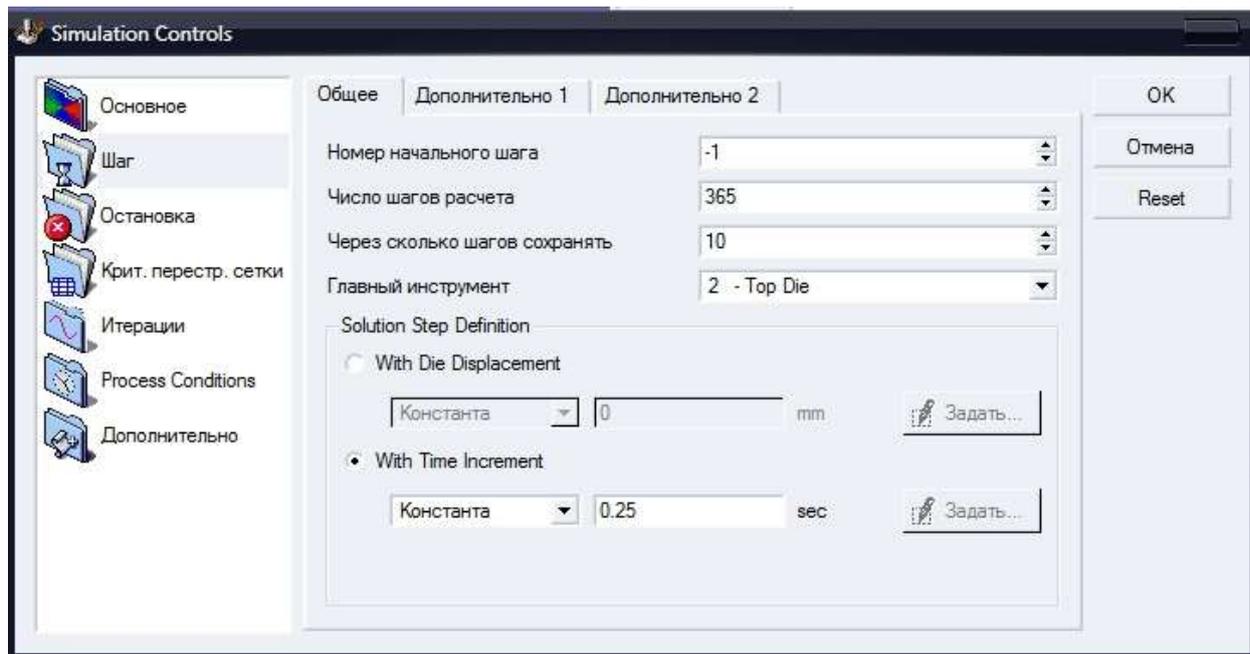


Рисунок 5.60 – Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

### Запись базы данных и проведение моделирования

Для проверки данных и создания базы необходимо вызвать ЛКМ команду **Data base generation** , затем в появившемся окне **Генерация базы данных** вызвать команду **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 5.61). Для выхода из окна **Генерация базы** необходимо нажать ЛКМ кнопку **Заккрыть**.

Для проведения моделирования в пункте **Simulator** в **Главном окне** необходимо ЛКМ вызвать команду **Старт** или нажать на кнопку . Для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент необходимо вызвать закладку **Сообщения**. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается.

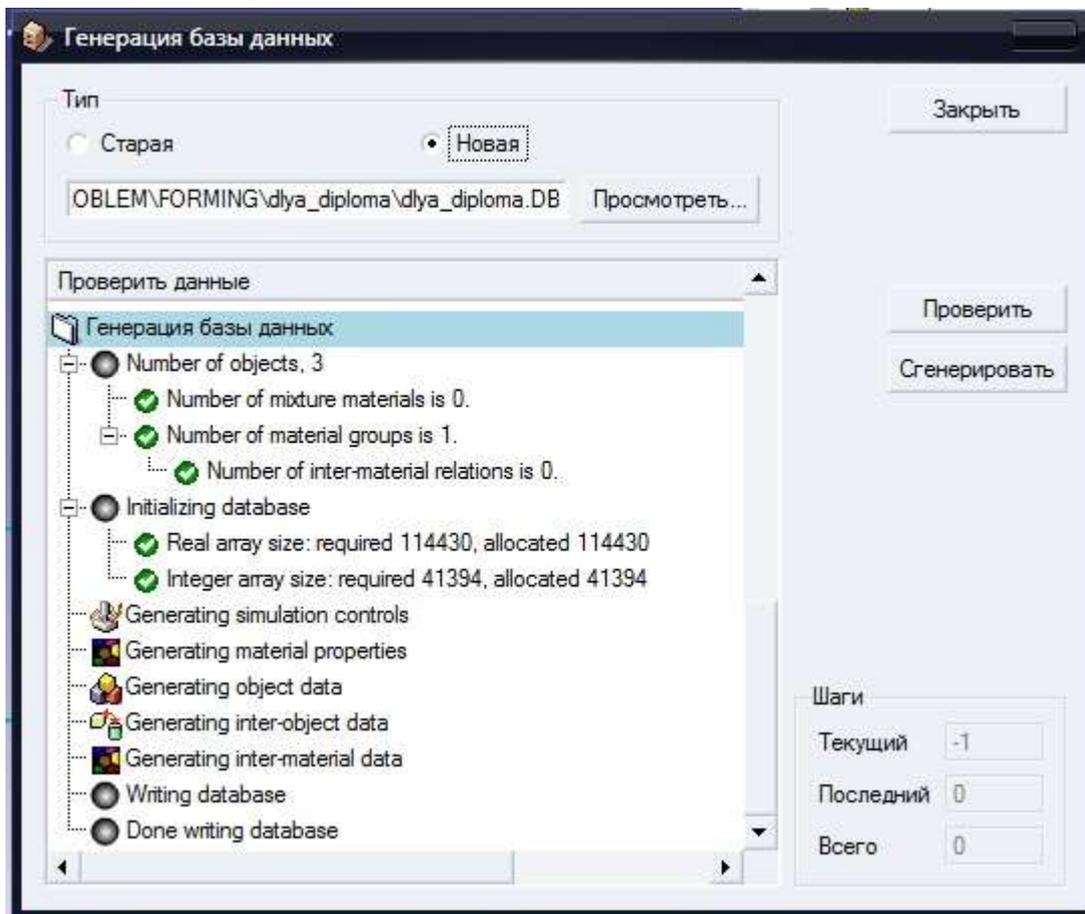


Рисунок 5.61 -Генерирование базы данных

### Анализ результатов моделирования

Для анализа результатов моделирования необходимо открыть решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «DEFORM-2D Постпроцессор». Для перемещения по шагам расчета используют кнопки **One step back** ◀ и **One step forward** ▶.

### Анализ характера изменения усилия волочения

Для изучения характера изменения усилия волочения по стадиям процесса необходимо построить график зависимости усилия волочения от времени. Для этого необходимо ЛКМ вызвать команду **График (Усилия-Перемещения)** 📊. В появившемся окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 5.62) в разделе **Plot objects** указать верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение матрицы, для этого в разделе **X-axis** установим флажок напротив «Время» (рисунок 5.62).

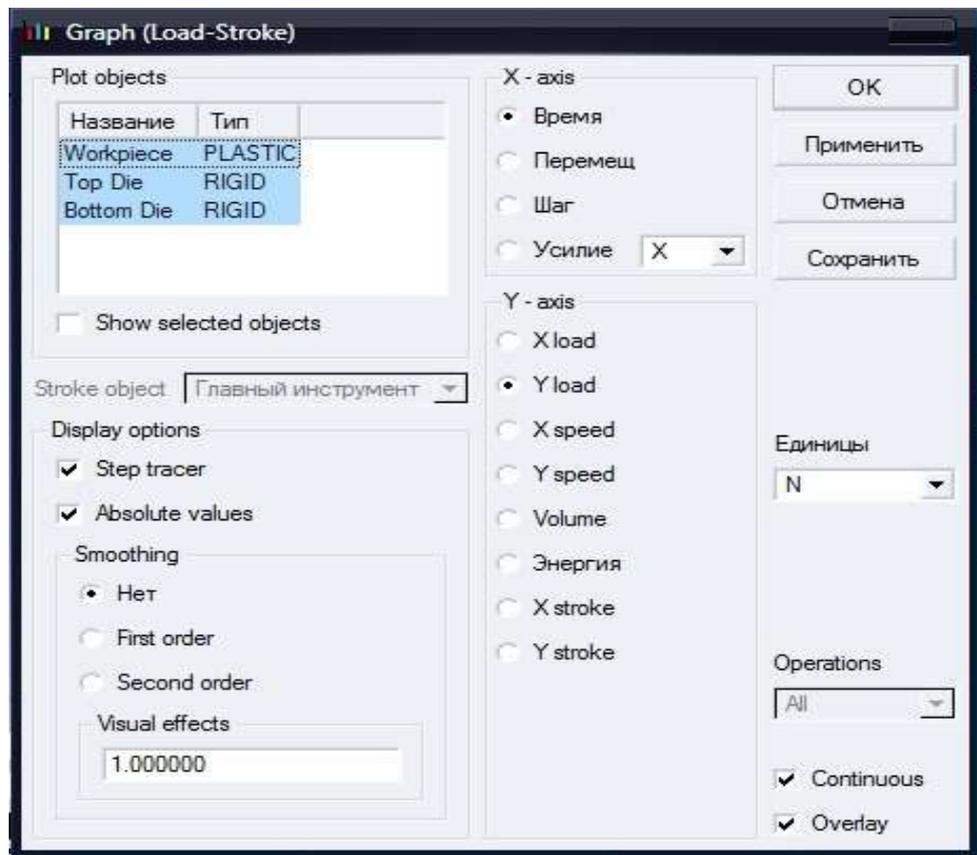


Рисунок 5.62 – Окно **Graph (Load-Stroke)**

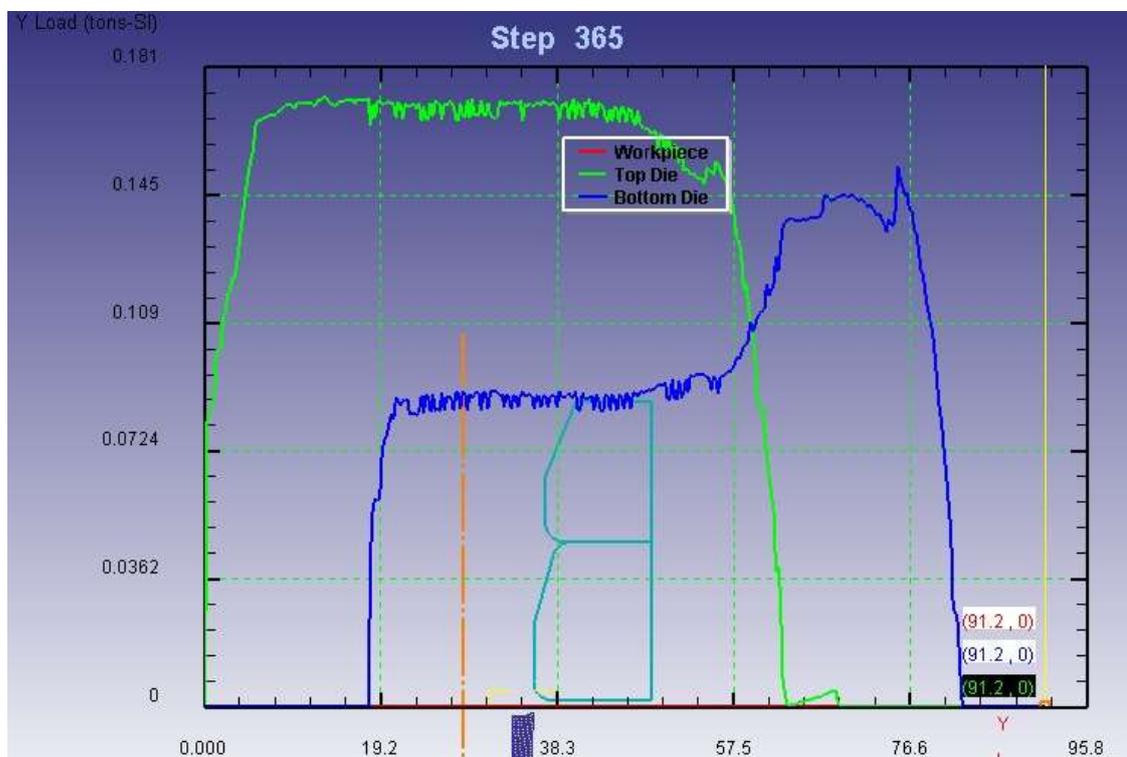


Рисунок 5.63 – Зависимость усилия волочения от времени

Данные моделирования позволили установить характер зависимости

усилия волочения от времени. Процесс состоит из трех стадий: не устоявшийся процесс - рост усилия при входе в канал волокна, установившийся процесс, где усилие практически не меняется и убывание усилия на выходе изделия из канала волокна – не устоявшийся процесс.

Для анализа напряженно-деформированного состояния следует отобразить распределения интенсивности напряжений и деформаций. Для этого нужно ЛКМ вызвать команду **Параметры** , выбрать тип переменной «Stress» («Strain Total») и подтип «Effective» (рисунки 5.64). В разделе **Экран** необходимо установить флажок напротив «Solid», а в **Scaling** – «Local».

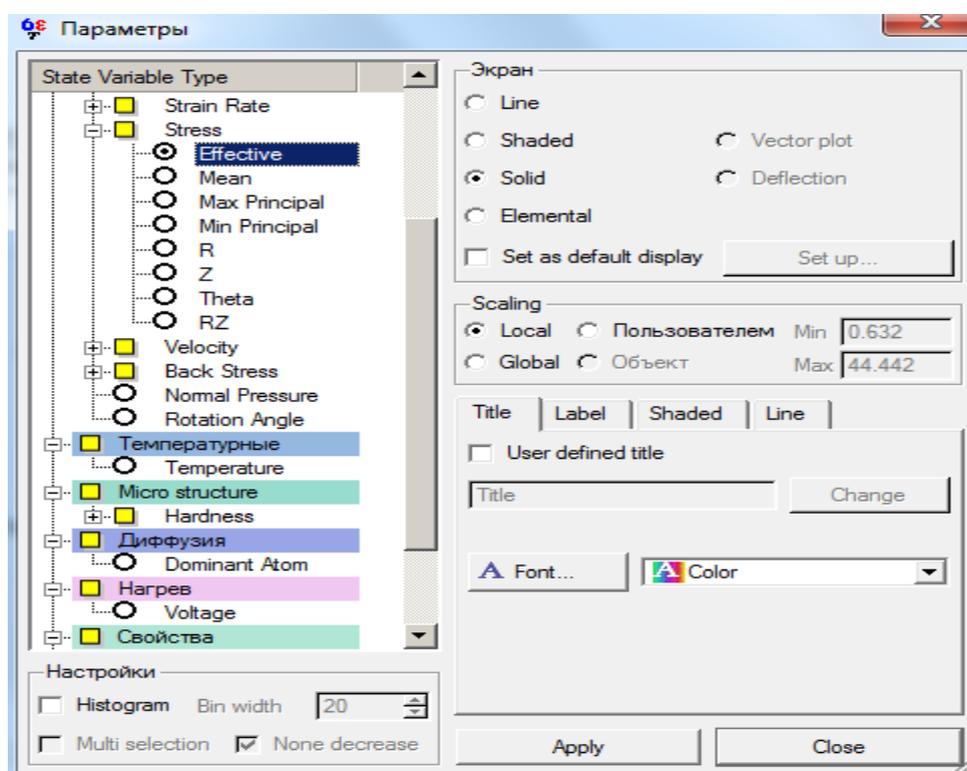


Рисунок 5.64 – Окно **Параметры**

Для выполнения команды необходимо ЛКМ нажать команду **Apply**, затем **Close**.

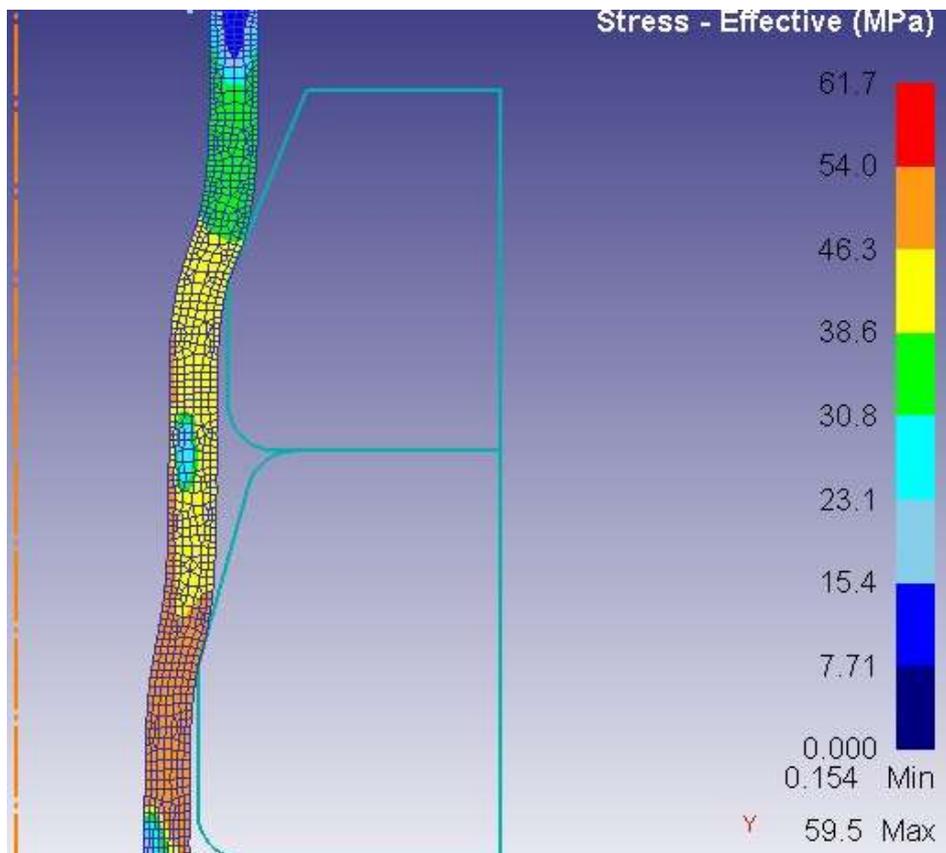


Рисунок 5.65- Распределение напряжений на границе металл-волокна

Для изучения распределения нормального давления на границе деформируемый металл – волокна следует построить график. Для этого необходимо ЛКМ вызвать команду **Параметры**  и выбрать тип переменной «*Normal Pressure*», затем нажать **Apply** и **Close**. После этого ЛКМ вызвать команду **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне выбрать закладку **Following Boundary** (по границе), в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвинуть ползунок на значение 20, указать конечную точку P1 и начальную P20 конусной части волокна (рисунок 5.66). Для выполнения команды необходимо нажать ЛКМ команду **Calculate**  (расчет) и **Заккрыть**.

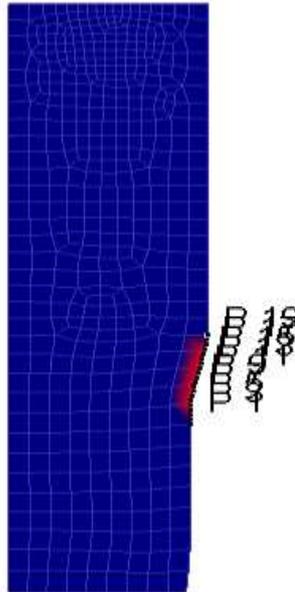


Рисунок 5.66- Задание начальной и конечной точек

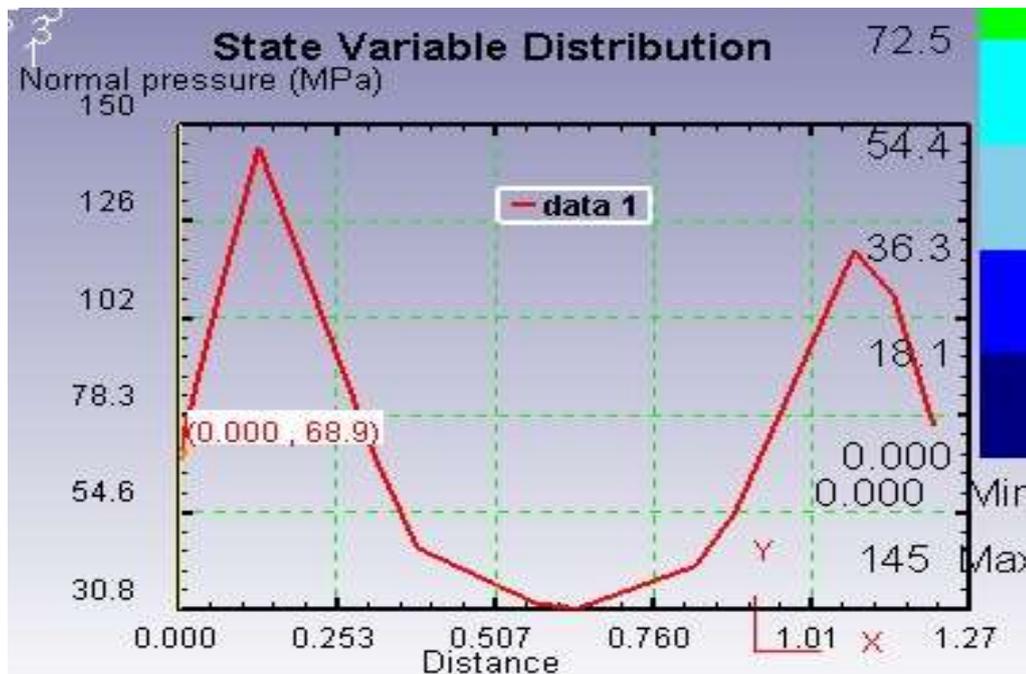


Рисунок 5.67 -Распределение нормального давления на границе металл-волокна

Как следует из приведенной эпюры распределения нормального давления на границе металл - волокна (рисунок 5.67), максимум давления приходится на входную и выходную зоны рабочего канала волокна.

В месте контакта заготовки и волокна резко меняются направления линий скольжения металла, возрастает угол их поворота, что, как следствие, приводит к скачкообразному возрастанию нормального давления.

Для изучения распределения напряжений следует построить график. Для этого необходимо ЛКМ вызвать команду Параметры  и выбрать тип переменной «Stress» и подтип «R» (рисунок 5.68). В разделе Экран необходимо установить флажок напротив «Line», а в Scaling – «Local», затем нажать Apply и Close.

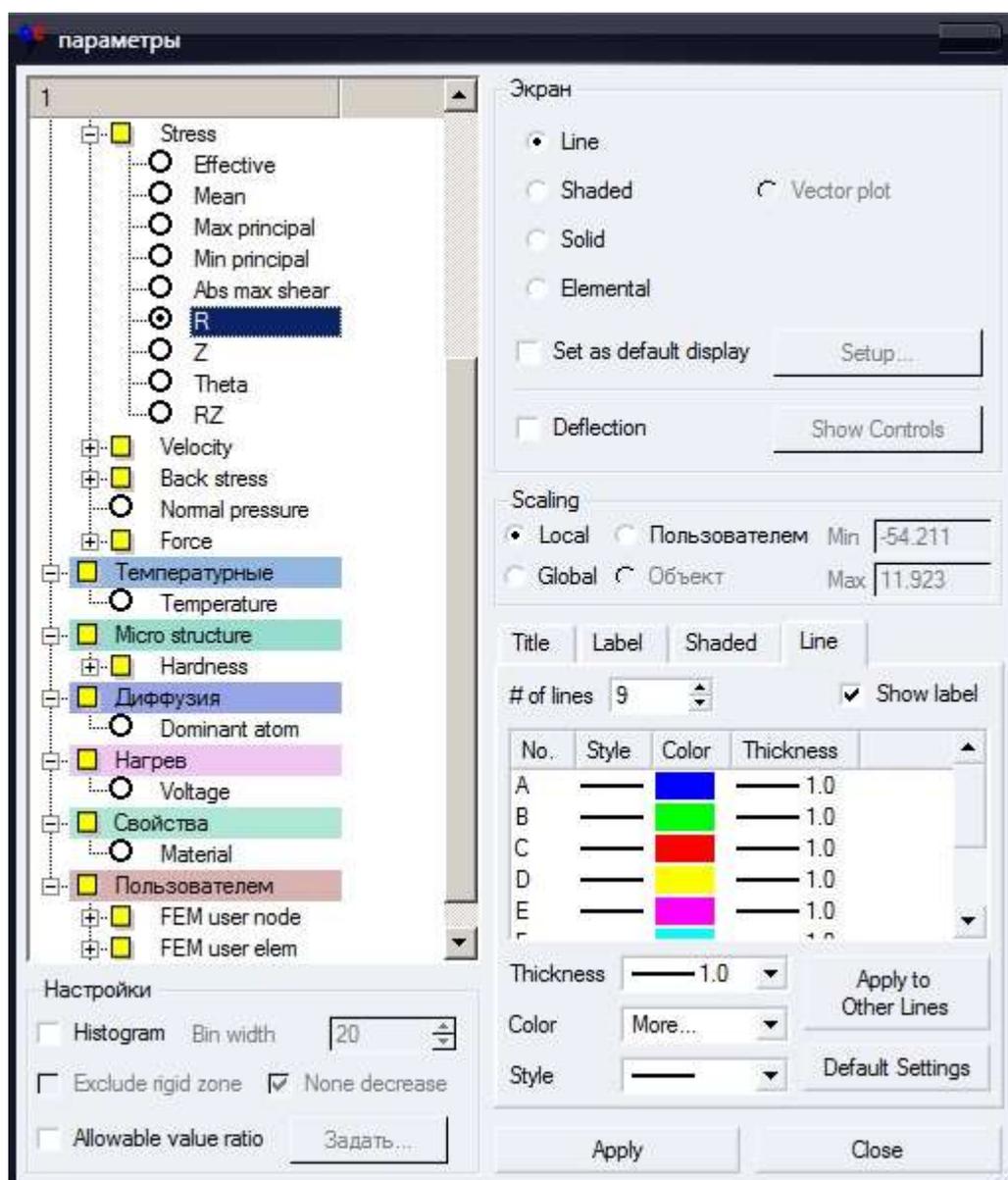
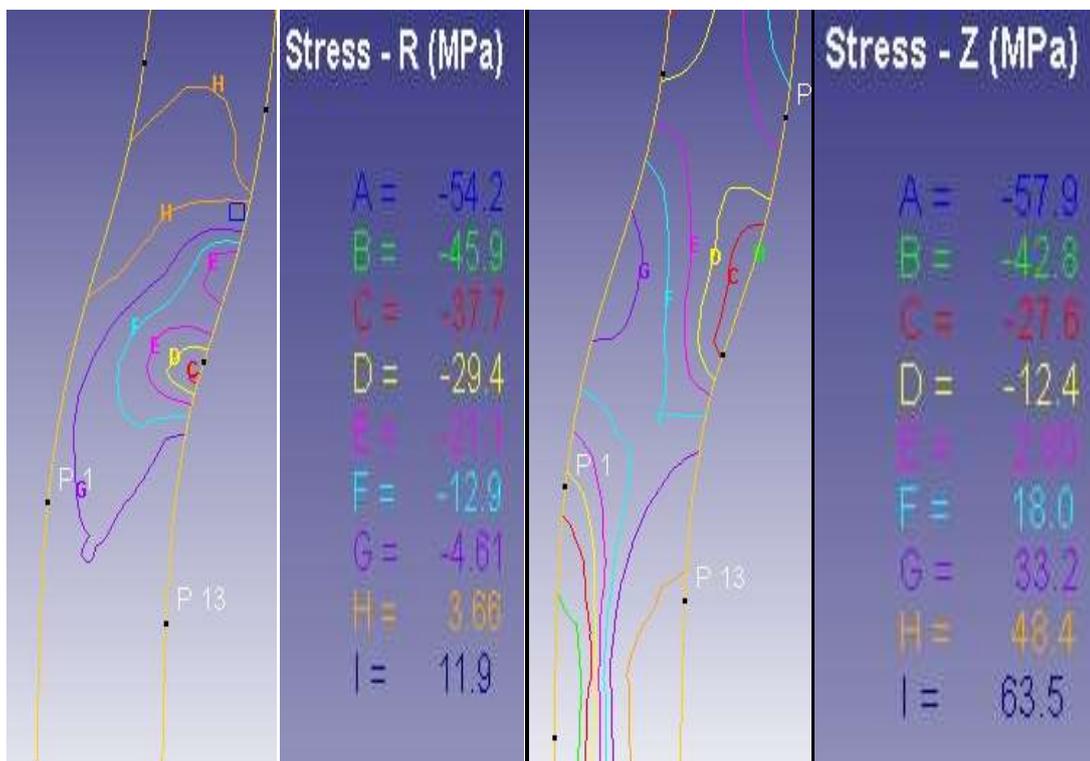
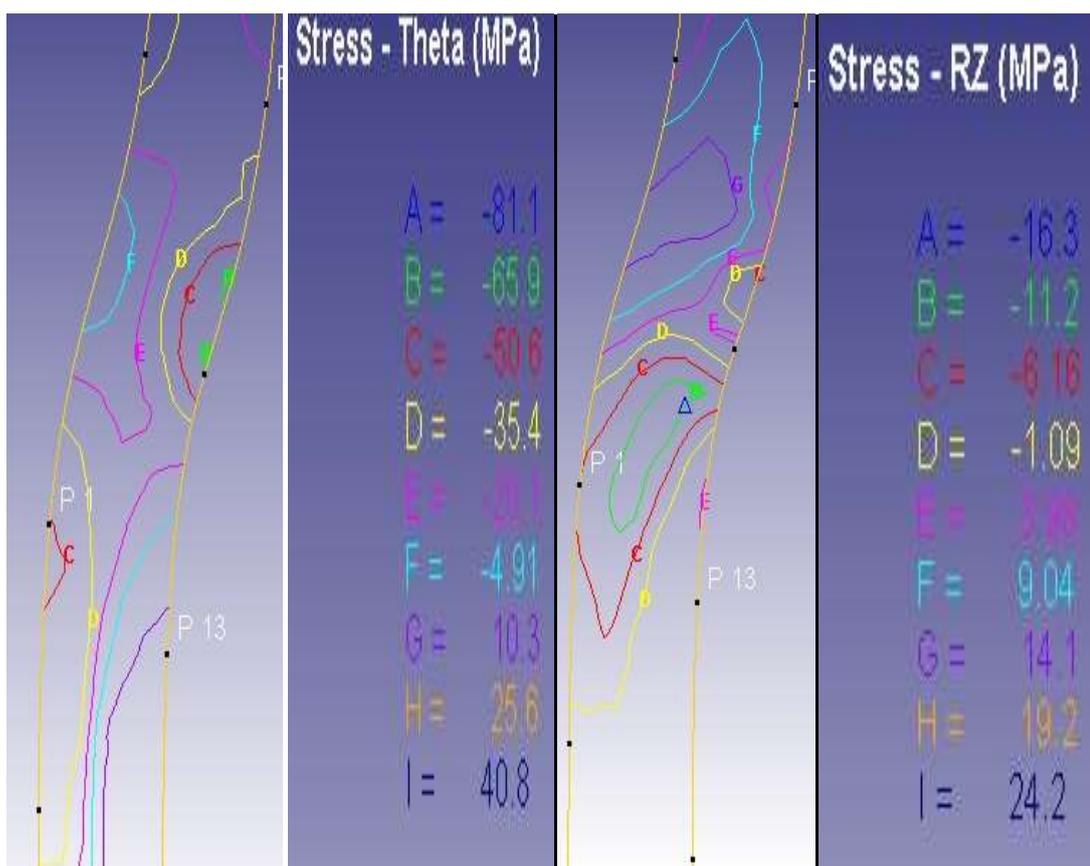


Рисунок 5.68- Окно **Stress**



а)

б)



в)

г)

Рисунок 5.69- Распределение радиальных (а), осевых (б), окружных (в), касательных (г) напряжений

Как видно из рисунка 5.69 продольные растягивающие напряжения в центральных слоях максимально на входе в рабочую зону в месте контакта металла с волокой, в периферийных слоях по мере движения поперечного сечения заготовки от входа к выходу из канала волоки из сжимающих становятся растягивающими и продолжают возрастать. Это происходит потому, что в установившемся процессе волочения поперечное сечение по направлению к выходу уменьшается, а объем металла между этим сечением и сферой входа в деформационную зону увеличивается.

На основе опыта при создании координатной сетки можно описать характер взаимного перемещения частиц металла в деформационной зоне. Для построения координатной сетки (рисунок 5.70) необходимо ЛКМ вызвать команду **Flow Net**  и в столбцах **Starting step** и **Ending step** ввести соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Затем необходимо нажать кнопку **Next**, выбрать тип сетки *Rectangular* и снова нажать **Next**. в новом окне ввести в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y : 5 и 30. Нажать ЛКМ кнопку **Next** и **Finish**.

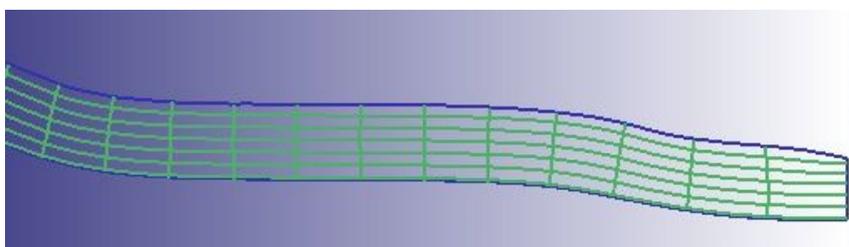


Рисунок 5.70 – Искажение координатной сетки при волочении трубной заготовки

Для анализа течения металла по векторному полю скоростей необходимо ЛКМ вызвать команду **Параметры** , выбрать тип переменной «*Velocity*» и подтип «*Total Vel*». В разделе **Экран** необходимо установить «*Vector plot*». Для выполнения команды нажать ЛКМ команду **Apply**, затем **Close** (рисунки 5.71, 5.72).

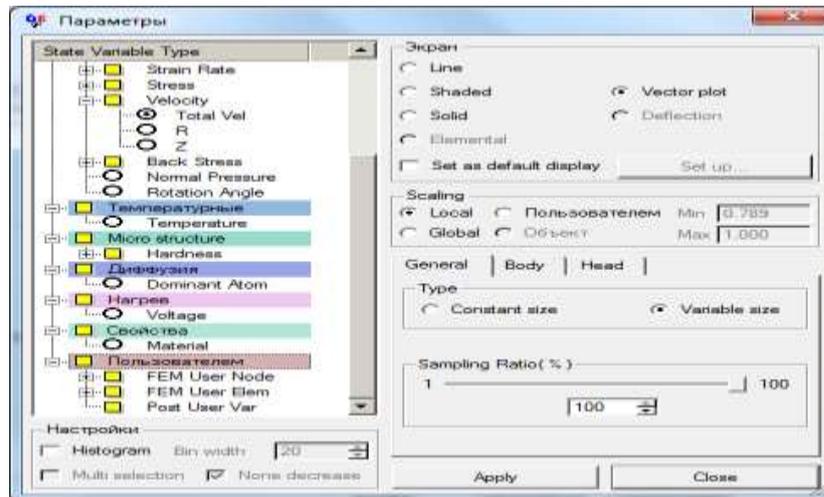


Рисунок 5.71 – Окно Параметры

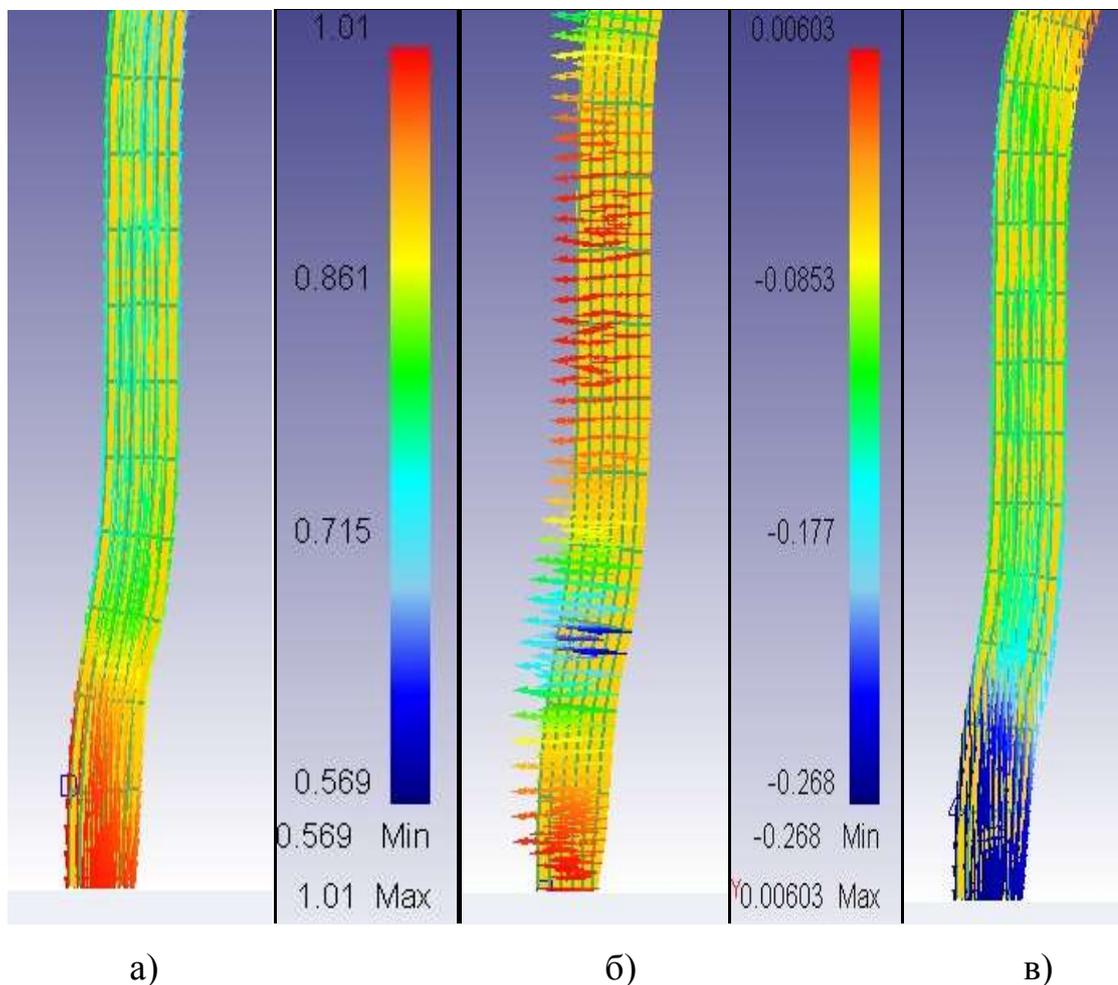


Рисунок 5.72 – Векторное поле полных (а), радиальных (б) и осевых (в) скоростей течения металла

Изменение формы ячеек координатной сетки начинается до их входа в рабочий канал волокна, представляющий собой объем, ограниченный

контактной поверхностью и двумя плоскостями, проходящими через окружности начала и конца контактной поверхности. Об этом свидетельствует тот факт, что начало искривления поперечных линий и точки поворота продольных линий координатной сетки находятся на некотором расстоянии от плоскости входа в рабочий канал и образуют у входа в деформационную зону поверхность, близкую к сфере. Ячейки, расположенные в центральных осях, при волочении начинают вытягиваться в осевом направлении и сжиматься в радиальном. Линейные размеры ячеек, расположенных в периферийных слоях перед самым входом в рабочий канал, уменьшаются вдоль оси канала и увеличиваются в радиальном направлении. Таким образом, перед входом в канал на протягиваемом металле образуется первая (задняя) зона внеконтактной деформации.

Векторное поле осевых скоростей течения металла характеризуется максимальными значениями на выходе из волокна с постепенным затуханием ко входу (рисунок 5.72). В радиальном направлении наблюдается уширение металла до входа в канал волокна с последующим сужением. В зоне деформации наблюдается разница между скоростями течения металла в центральных слоях, где скорость практически падает до 0, и на периферии, где скорость максимальна.

Для анализа характера изменения усилия волочения по волокнам постройте графики зависимости усилий волочения от времени процесса (рисунок 5.73) для 5 различных вариантов деформаций 0-100, 25-75, 50-50, 72-75, 100-0.

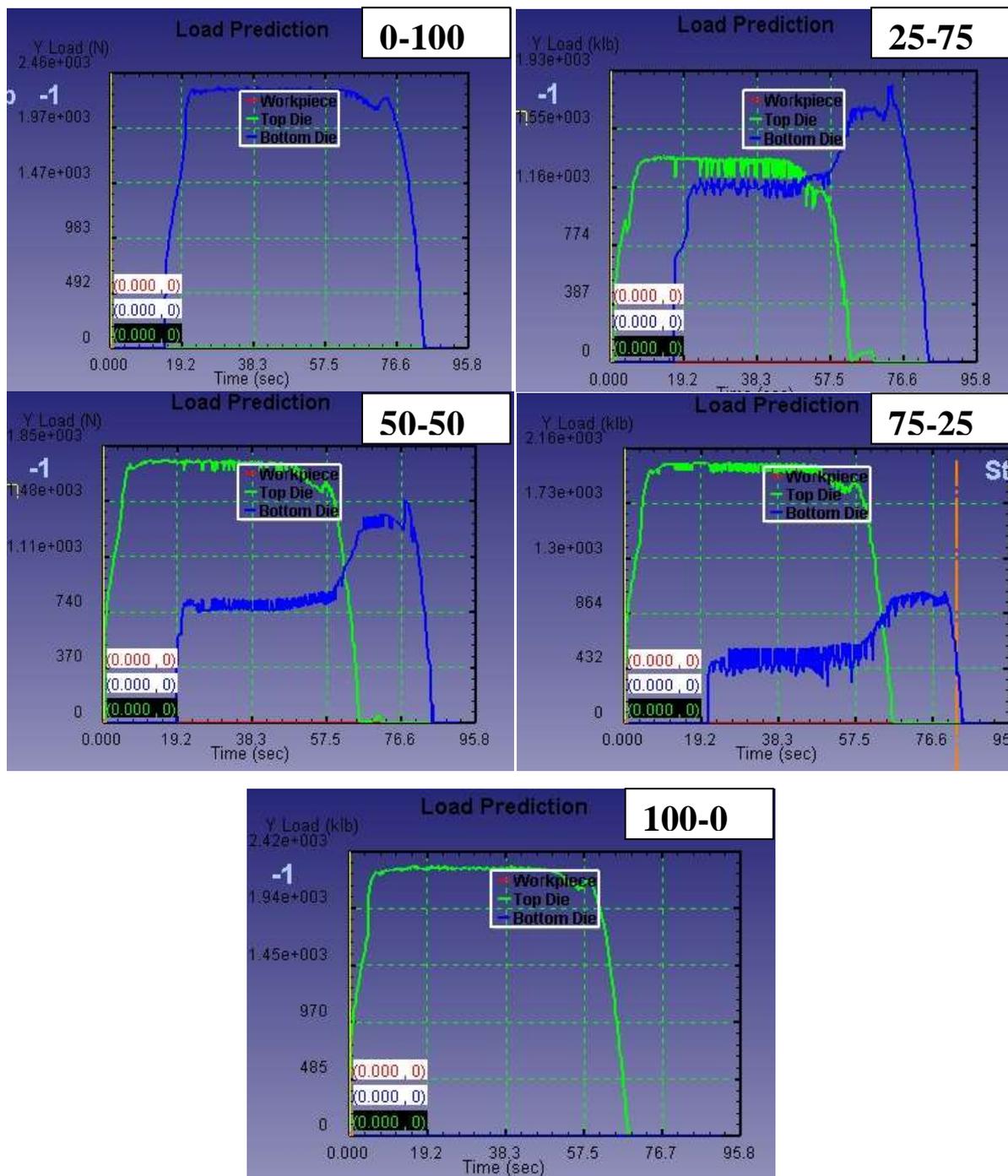


Рисунок 5.73 - Зависимость усилия волочения от времени для 5 случаев деформации

Для анализа характера изменения толщины стенки в каждом варианте обжатия трубы в волокнах необходимо измерить толщину стенки до деформации, после первой волокни, после второй волокни с помощью инструмента "Линейка" и сделать выводы.

Для изучения распределения нормального давления на границе деформируемый металл – волокна в каждом варианте осадки трубы постройте графики (рисунок 5.74) и сделайте выводы. Для этого необходимо ЛКМ вызвать команду Параметры  и выбрать тип переменной «NormalPressure», затем нажать Apply и Close. После этого ЛКМ вызвать команду Параметры между двумя точками , в появившемся окне выбрать закладку FollowingBoundary (по границе), в разделе SamplingPoints (ключевые точки) передвинуть ползунок на значение 20, указать конечную точку P1 и начальную P20 конусной части волокна. Для выполнения команды необходимо нажать ЛКМ команду Calculate  Calculate (расчет) и Заккрыть.

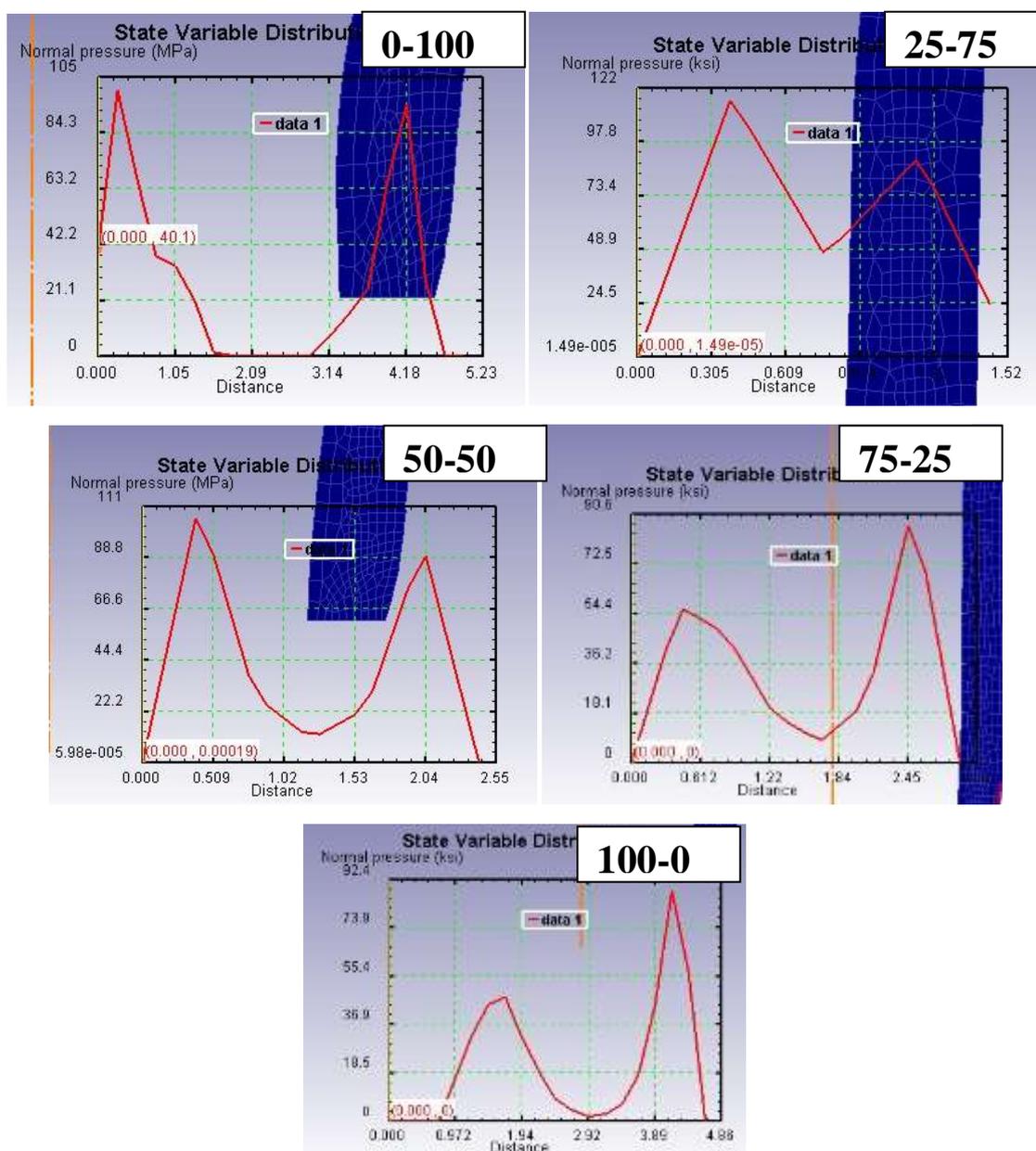


Рисунок 5.74 - Давление на границе металл-волокна для 5 различных случаев деформации

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
3. Схема волочения тонкостенной трубы в блок волокон
4. Графики изменения усилия волочения на волокнах
5. Эпюры распределения интенсивности напряжений и деформаций
6. Эпюры распределения давления на границе деформируемый металл-заготовка
7. Замеры толщин стенок
8. Анализ результатов моделирования
9. Выводы

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите особенности безправочного волочения труб
2. Какие трубы считаются тонкостенными?
3. Где используются трубы?
4. Из каких зон состоит очаг деформации?
5. Характер напряженного состояния при безправочном волочении тонкостенных труб
6. В каких случаях применяют волочение труб в блок волокон?
7. При каких условиях наблюдают утонение стенки трубы?
8. Опишите характер деформированного состояния при безправочном волочении тонкостенных труб.
9. Для каких труб предельная степень деформации определяется устойчивостью поперечного сечения трубы?
10. Перечислите все методы волочения труб.

## 5.4 Изучение влияния величины угла рабочей зоны волоки на процесс волочения круглого сплошного изделия

Цель работы: исследование процесса волочения круглого сплошного изделия из алюминия с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов в специализированном программном комплексе DEFORM-2D, анализ влияния величины рабочего угла волоки на протекание данного процесса.

### Краткие теоретические сведения

Волочение проволоки – это процесс обработки металла давлением, характеризующийся постепенным однократным или многократным протягиванием последнего через специальный волочильный инструмент, предназначенный для поэтапного уменьшения поперечного сечения исходной заготовки.

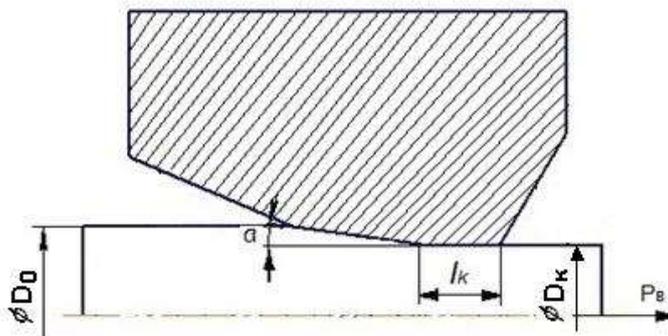


Рисунок 5.75 - Схема волочения круглого сплошного изделия

Одним из главных видов круглых изделий, получаемых волочением, является проволока, которая находит самое широкое применение во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве и других сферах жизни и деятельности человека. Проволоку изготавливают в широком ассортименте из самых различных чёрных и цветных металлов и сплавов, с разными механическими и физико-химическими свойствами. Для каждого вида и размера проволоки требуется определенная технология изготовления и соответствующее оборудование.

Волочение имеет разноименную схему главных напряжений и симметричную схему главных деформаций, которая характеризуется высоким к.п.д. деформации и пониженным расходом энергии. Растягивающее напряжение  $\sigma_z$  способствует охрупчиванию металла, а максимально допустимая величина предела текучести ограничивает степень деформации за переход. Таким образом, напряжение волочения  $\sigma_{\text{вол}}$  не должно превышать предела текучести  $\sigma_T$  материала изделия:  $\sigma_{\text{вол}} < \sigma_T$ . В противном случае пластическая деформация может происходить и после выхода металла из канала волокна, что приведёт к искажению формы поперечного сечения изделия после волочения и в конечном итоге может произойти его обрыв.

Сжимающие радиальные  $\sigma_r$  и окружные  $\sigma_\theta$  напряжения, равные между собой, вызывают внешнее трение в канале волокна. По условию пластичности при волочении сплошных круглых тел соотношение между главными напряжениями выражается зависимостью:

$$\sigma_z + \sigma_r = \sigma_T.$$

Главные линейные деформации связаны между собой условием несжимаемости:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0.$$

Для круглого профиля сплошного сечения из изотропного материала:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -0,5 \cdot \varepsilon_z.$$

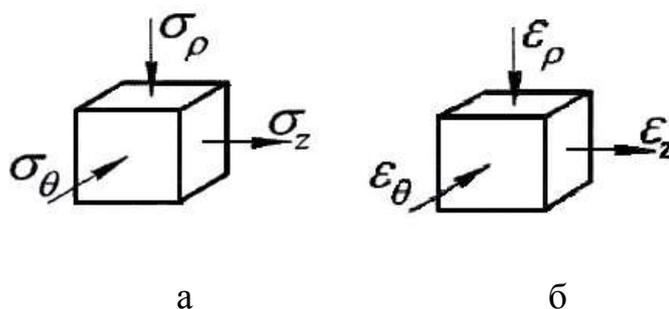


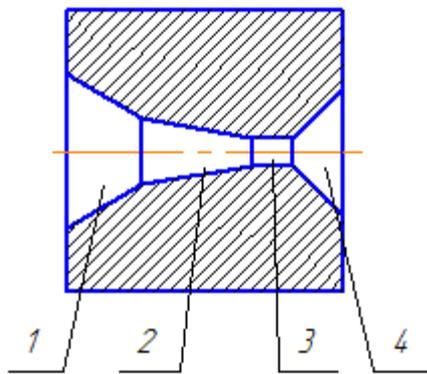
Рисунок 5.76 - Главные схемы напряжений (а) и деформаций (б) при волочении круглого сплошного изделия

На контактной поверхности металла с волокой действуют нормальное

напряжение сжатия –  $\sigma_n$  и напряжение трения –  $\tau$ , которое можно принять равным по закону Кулона-Амонтона -  $f\sigma_n$ .

Основным рабочим инструментом процесса волочения является волока, сечение канала которой плавно уменьшается от входа протягиваемой заготовки до выхода изделия из него.

Одним из основных факторов влияющих на напряжённо-деформированное состояние заготовки, её качество и энергосиловые параметры процесса является геометрия профиля волоки, который в общем случае можно разделить на следующие основные зоны (рисунок 5.77): входная, рабочая, калибрующая, выходная.



1-входная зона – наиболее широкая часть волоки, служащая для облегчения ввода в неё заготовки и подачи смазки в рабочую зону;

2-рабочая зона – предназначена для осуществления деформирования;

3-калибрующая зона – необходима для придания протягиваемому профилю окончательных размеров поперечного сечения;

4-выходная зона – служит для предотвращения повреждений при выходе протягиваемого изделия из волоки.

Рисунок 5.77 - Основные зоны волочильного канала

Наиболее распространенными формами входной зоны являются коническая и радиальная, а также комбинированная из этих форм.

Форма профиля рабочей зоны оказывает существенное влияние на энергосиловые параметры процесс волочения и производительность

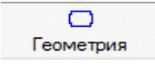


DRAWING. Затем нажимаем **Finish**.

После запуска препроцессора необходимо убедиться в том, что в качестве системы измерения выбрана система «СИ» и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (**Simulation controls** ).

## Построение геометрии инструмента и заготовки.

### Позиционирование объектов

Выполним компьютерное моделирование процесса волочения круглого сплошного профиля диаметром  $\varnothing 22$  мм на  $\varnothing 20$  мм через коническую волоку с углом  $12^\circ$ . Геометрию заготовки можно построить с помощью геометрических примитивов (пункт **Геометрия** , закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**). Задаем размеры: по высоте 100 мм, радиусом 11 мм (рисунок 5.79). Для этого в окне **Geometry Primitive** необходимо выбрать тип объекта **Cylinder** и ввести в строках **Width** (ширина) и **Height** (высота) значения соответственно 100 и 11 мм. Затем необходимо нажать ЛКМ команду **Create** (создать), а затем **Заккрыть**.

Для создания волоки необходимо добавить в **Дерево объектов** верхний инструмент **TopDie**. Для этого необходимо ЛКМ нажать команду **Добавить объект** . Для построения геометрии волоки необходимо перейти к закладке **Edit** в пункте геометрия. В появившееся **Поле ввода геометрии** последовательно введем значения, представленные на рисунке 5.80. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на команду **Применить**.

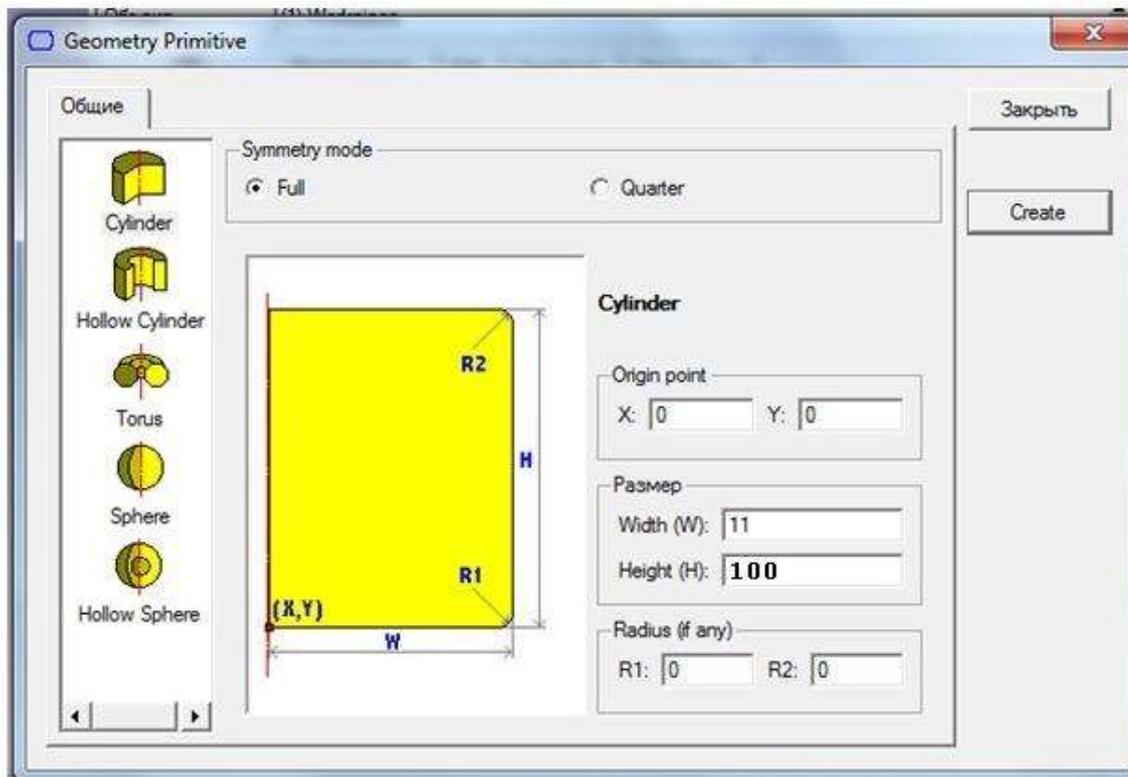


Рисунок 5.79 - Окно **GeometryPrimitive**

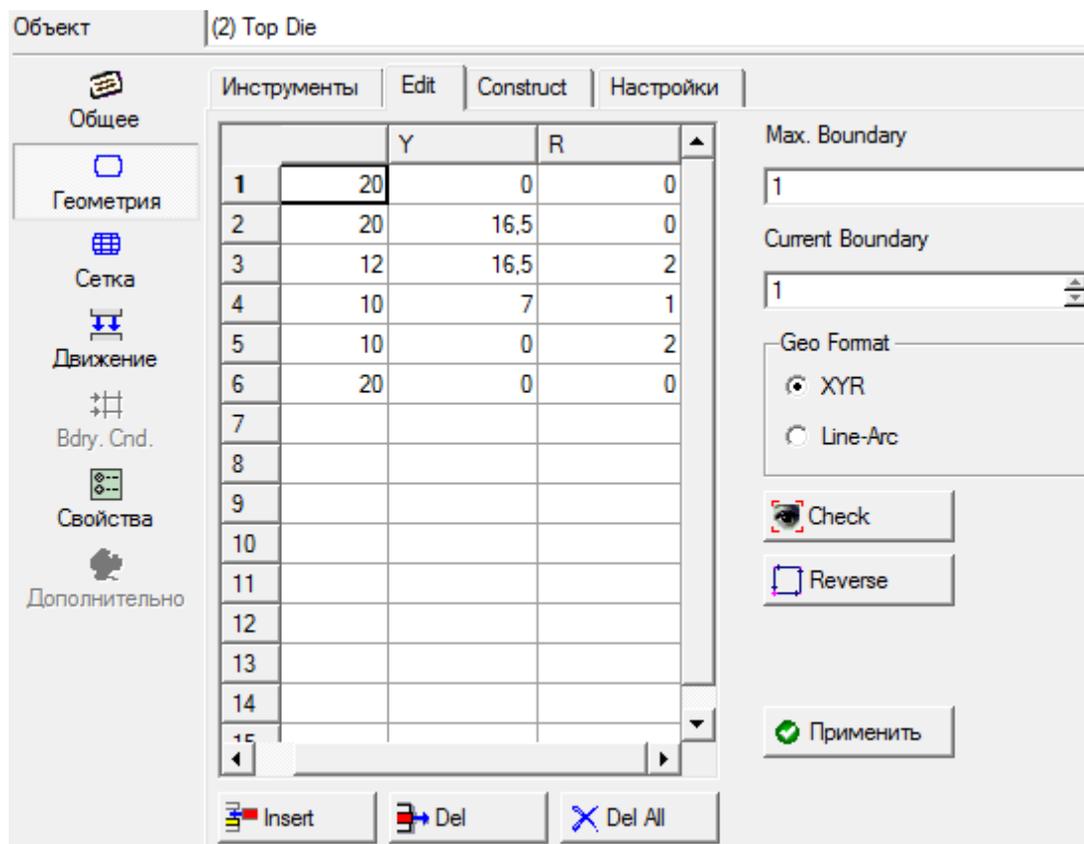
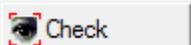


Рисунок 5.80 - Построение геометрии волокна

Проверяем полученную геометрию на наличие ошибок, для этого ЛКМ вызовем команду **Check&CorrectGeometry**, находящуюся в закладке **Check** . В случае верного построения появится сообщение «*Geometryislegal*». Конечная геометрия заготовки и волоки изображена на рисунке 5.81.

Для расположения заготовки и волоки относительно друг друга (рисунок 5.81) в окне **Object positioning**  вызовем ЛКМ команду **Позиционирование объектов** – метод **Интерференция** (рисунок 5.82). В строке **Позиционируемый объект** выбираем *Workpiece*, в строке **Относительно** – *Top Die*. Так как необходимо перемещение заготовки по оси Y в обратном направлении, в блоке **Approach direction** поставим флажок напротив надписи «-Y». Нажать ЛКМ команду **Применить** (рисунок 5.82).

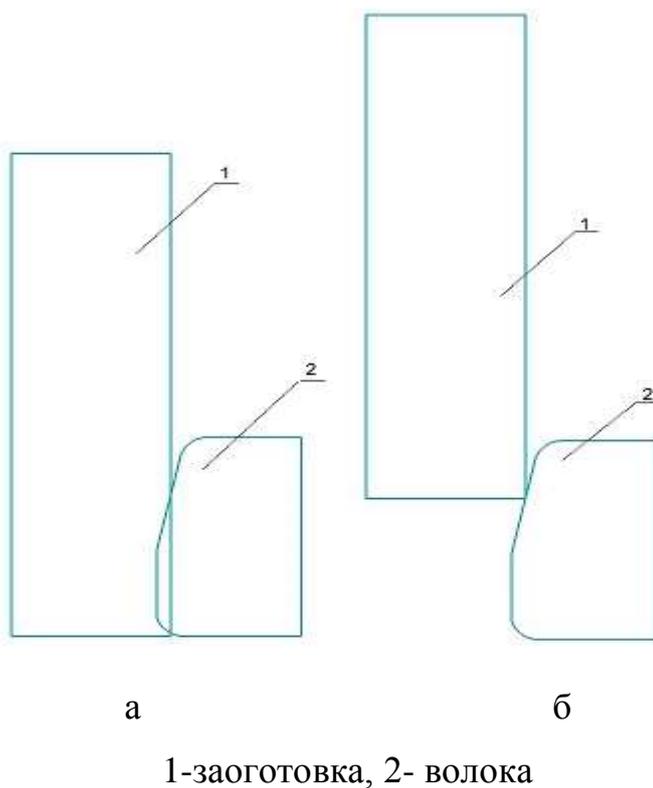


Рисунок 5.81 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а) и позиционирования (б)

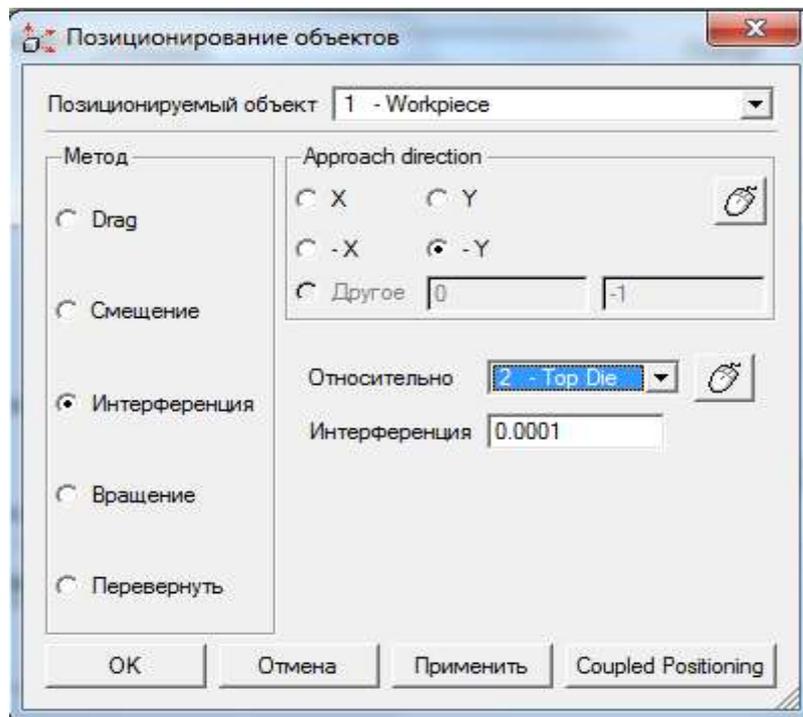


Рисунок 5.82 - Окно **Позиционирование объектов**

### Создание модели заготовки

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы необходимо перейти к закладке **Сетка** . Зададимся количеством конечных элементов равным 500 и нажмем команду **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки. Для этого в пункте **Общее** вызовем закладку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DIN-ALMgMn,GOLD[70-250F(20-120C)]* (АМг6) и выбираем команду **Загрузить**.

### Задание движения

Так как деформирующее усилие при волочении прикладывается к заготовке, то необходимо наложить перемещение по оси Y в отрицательном направлении на узлы конечно-элементной сетки, лежащие на нижнем торце заготовки (рисунок 5.83).

В **Дереве объектов** выделяем заготовку *Workpiece* и переходим к пункту

**Bdry.Cnd.**  (граничные условия). Тип граничного условия: *Velocity* (скорость), находящийся в блоке **В.С. Туре**. Зададим значение скорости равное -10мм/с. В блоке **Направление** поставим флажок напротив надписи «Y».

Выберем узлы, на которые будет наложено граничное условие, находящиеся на нижнем торце заготовки. Для этого в окне **Pick nodes** (выбор узлов), обычно расположенном в левом нижнем углу экрана, выбираем команду **By edge**  (по грани). Затем ЛКМ укажем нижнюю грань заготовки, при этом все узлы грани выделяются красными точками (рисунок 5.83, а).

Для применения указанного граничного условия на выбранные узлы вызываем ЛКМ команду **Добавить граничные условия**  в пункте **Bdry.Cnd.** При этом узлы с наложенным граничным условием обозначаются красными стрелками, направленными в сторону перемещения (рисунок 5.83, б) и в пункте **Bdry.Cnd.** появятся новое граничное условие «Y,-10» (рисунок 5.84)

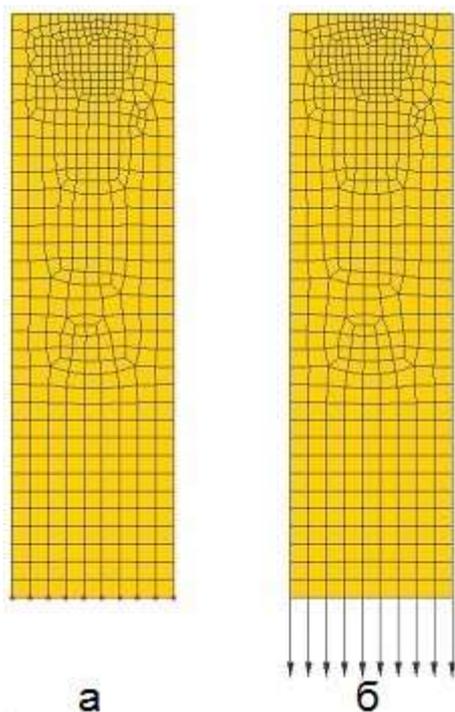


Рисунок 5.83 - Выбор узлов заготовки (а) и наложенное перемещение (б)

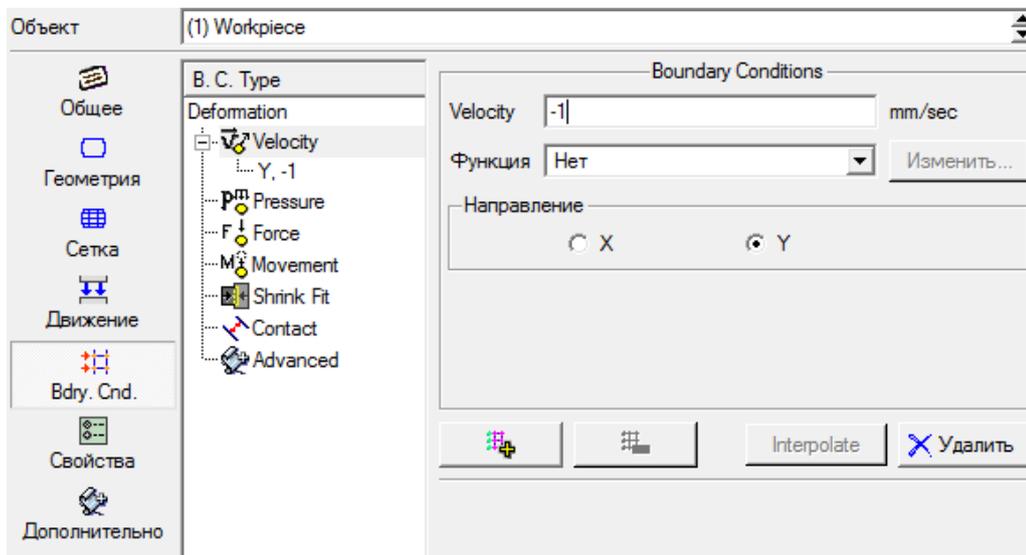


Рисунок 5.84 - Задание граничных условий

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии заготовки и инструмента

Для назначения контактных поверхностей необходимо ЛКМ вызвать команду **Inter-object** , в появившемся окне выбираем команду **Yes**. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определенными контактными парами (рисунок 5.85).

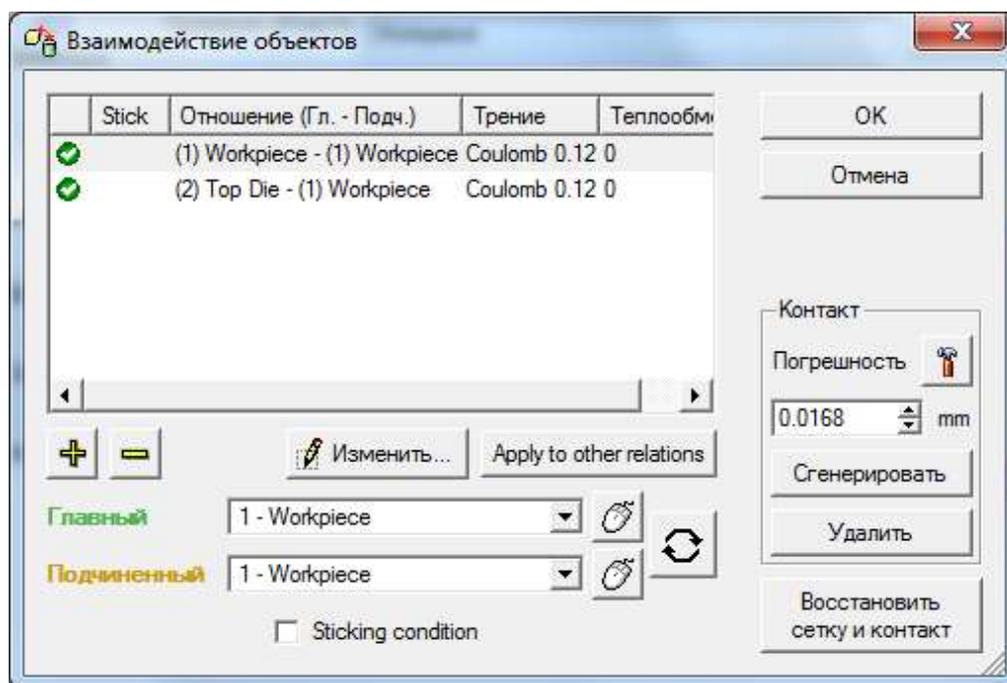
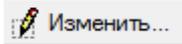


Рисунок 5.85 - Окно **Взаимодействие объектов** после задания исходных

данных

Для определения параметров контакта необходимо вызвать команду **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставить флажок напротив надписи «*Coulomb*» (трение по закону Кулона), и указать коэффициент трения равный 0,12. Нажать **Заккрыть** (рисунок 5.86).

Так как коэффициент трения между заготовкой и волокой одинаков, необходимо вызвать команду **Apply too the relations**, чтобы применить параметры первого контакта к остальным.

Для генерации точности, с которой компьютер создаст контактные пары, необходимо нажать кнопку **Погрешность** , после чего вызвать команду **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта. Для выхода из окна **Взаимодействие объектов** необходимо ЛКМ нажать **ОК**.

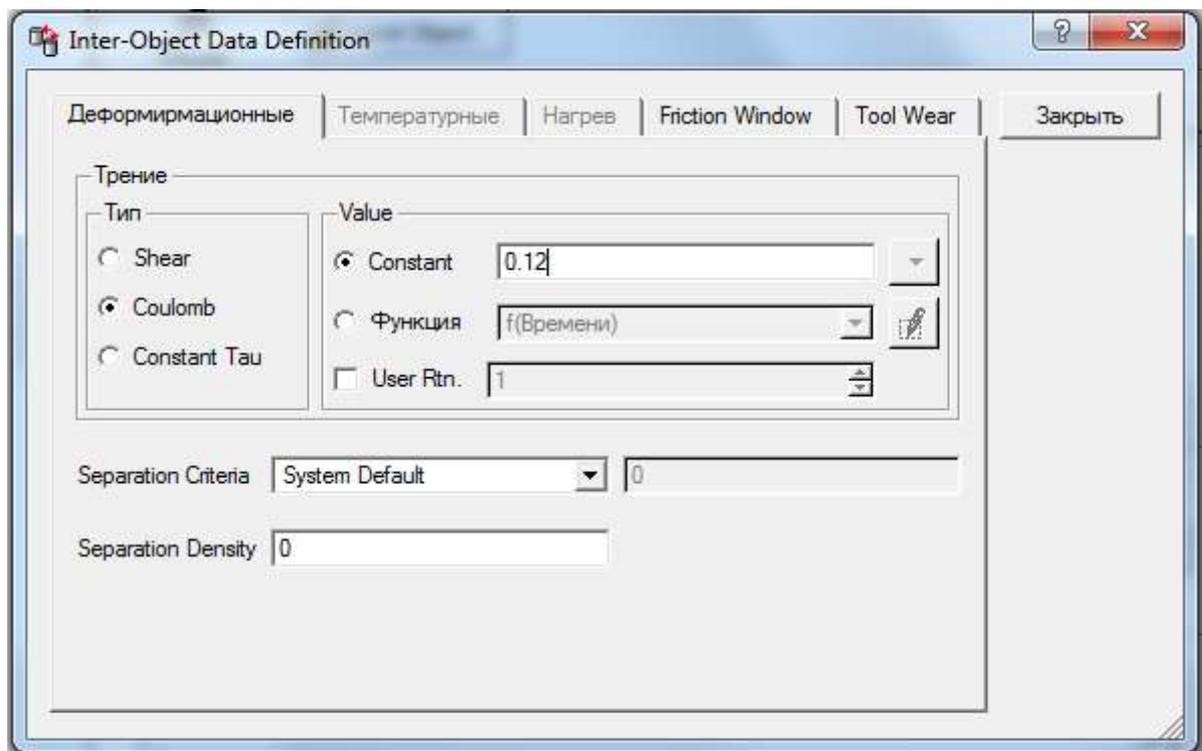


Рисунок 5.86 - Задание коэффициента трения

### Задание числа шагов расчёта

Так как движение накладывается на узлы заготовки, а не на инструмент,

то шаг решения задачи необходимо ограничить во времени. Для этого необходимо вызвать ЛКМ окно **Simulation controls**  и перейти к закладке

**Шаг** . В блоке **Задание шагов** установим флажок напротив надписи **With Equal Time Increment** (с равным приращением по времени), введем величину 0,25, т.е. при скорости волочения 10 мм/с за один шаг нижний торец заготовки переместится на 2,5 мм.

Количество шагов расчета примем равным 200 и введём данное значение в ячейку в строке **Число шагов расчёта** (рисунок 4.87). В строку **Через сколько шагов сохранять** вводим число 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, в строке **Главный инструмент** установим *Top Die*. Для подтверждения команды необходимо ЛКМ нажать **ОК**.

Данные необходимо сохранить нажав ЛКМ **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

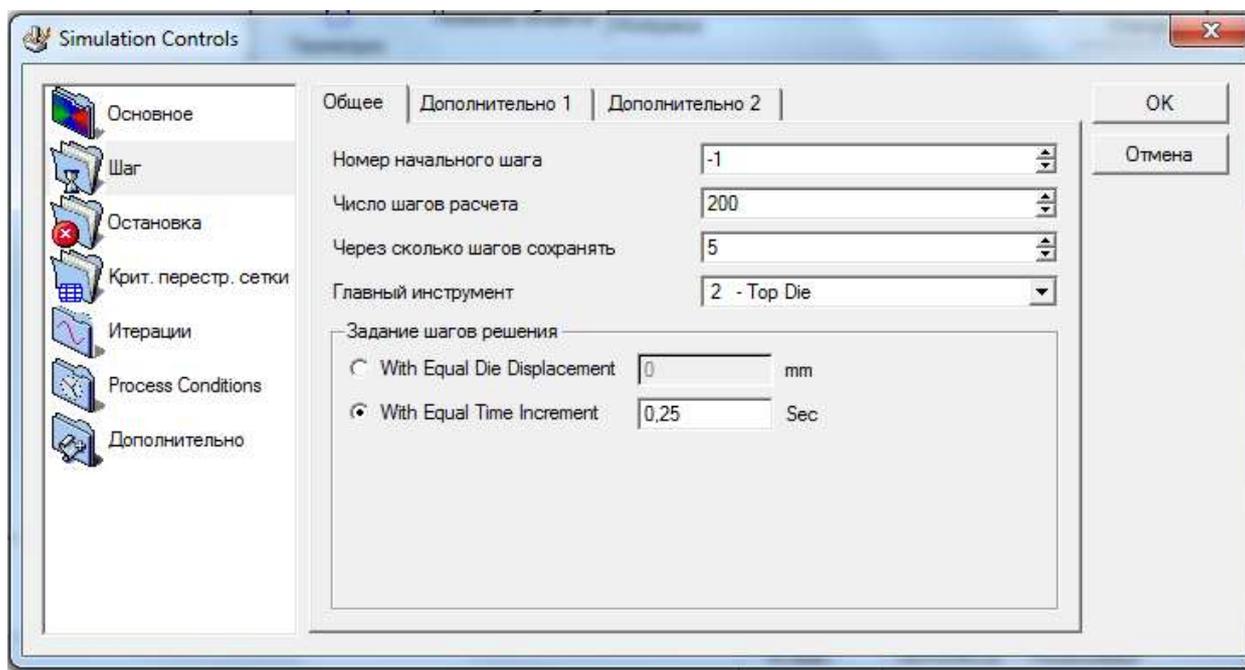


Рисунок 5.87 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

### Запись базы данных и проведение моделирования

Для проверки данных и создания базы необходимо вызвать ЛКМ команду **Data base generation** , затем в появившемся окне **Генерация базы данных**

вызвать команду **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 5.88). Для выхода из окна **Генерация базы** необходимо нажать ЛКМ кнопку **Заккрыть**.

Для проведения моделирования в пункте **Simulator** в **Главном окне** необходимо ЛКМ вызвать команду **Старт** или нажать на кнопку . Для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент необходимо вызвать закладку **Сообщения**. Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается.

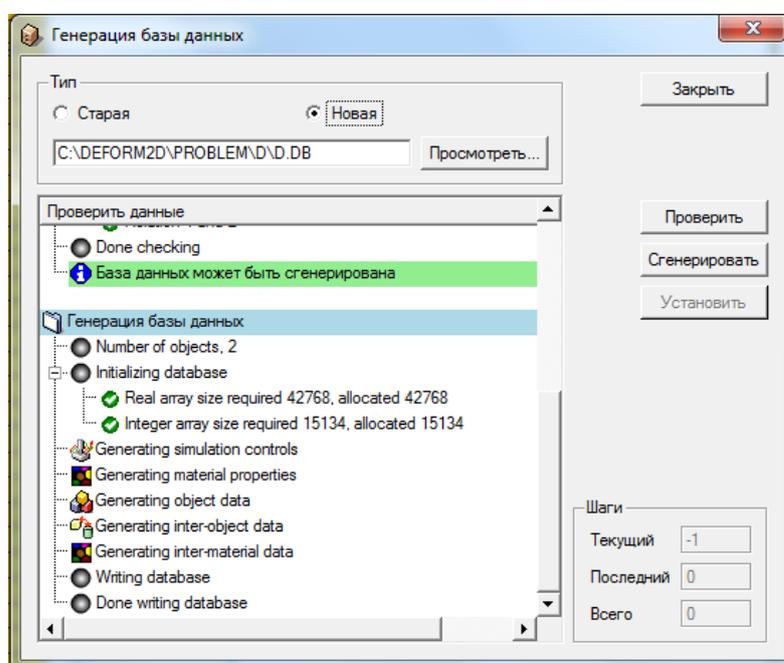


Рисунок 5.88 - Окно **Генерация базы данных**

### Анализ результатов моделирования

Для анализа результатов моделирования необходимо открыть решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «DEFORM-2DПостпроцессор». Для перемещения по шагам расчета используют кнопки **One step back**  и **One step forward** .

### Анализ характера изменения усилия волочения

Для анализа характера изменения усилия волочения по стадиям процесса необходимо построить график зависимости усилия волочения со временем. Для этого необходимо ЛКМ вызвать команду **График (Усилия-Перемещения)** . В появившемся окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 5.89) в разделе **Plot objects** указать верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение матрицы, для этого в разделе **X-axis** установим флажок напротив «Время». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установим флажок напротив «*First order*». Для выполнения команды необходимо нажать ЛКМ **ОК**.

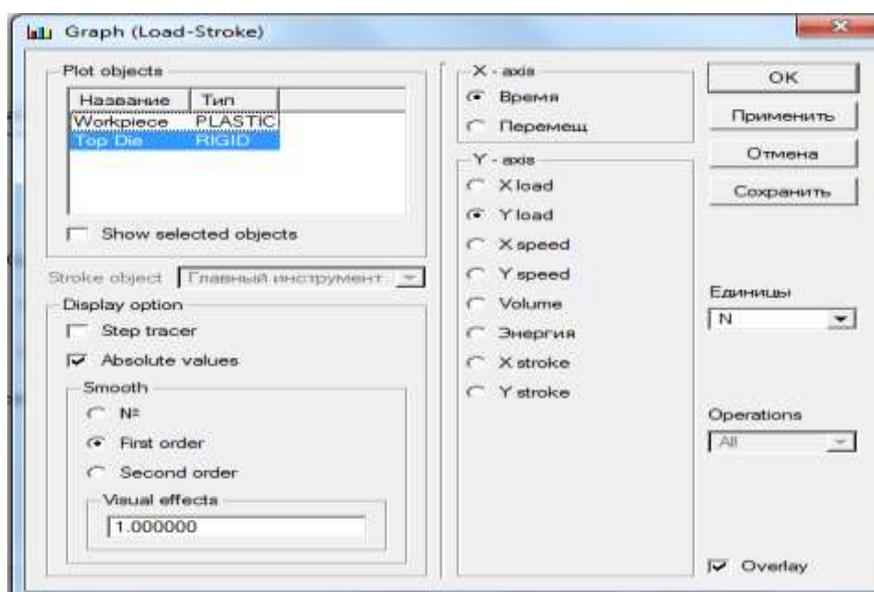


Рисунок 5.89 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

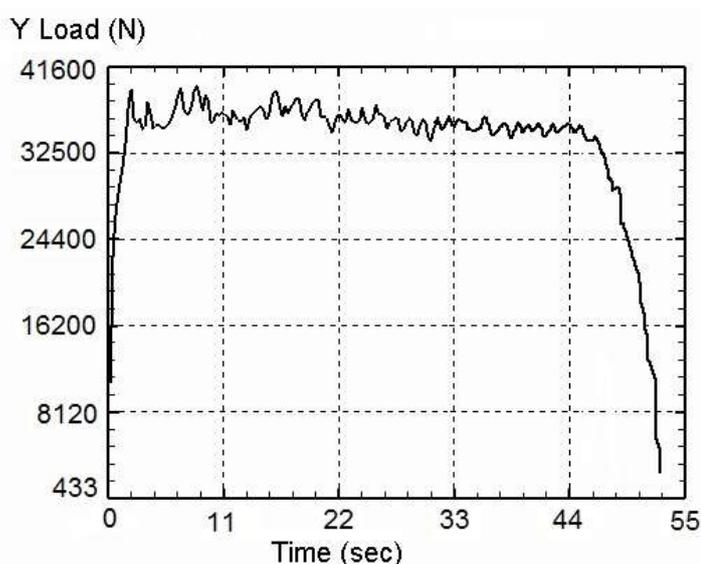


Рисунок 5.90 - Зависимость усилия волочения от времени для заготовки без

## заострения

Одним из резервов повышения качества выпускаемой продукции является изучение напряжённого состояния в очаге деформации. Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций необходимо ЛКМ вызвать команду **Параметры** , выбрать тип переменной «Stress» («Strain Total») и подтип «Effective» (рисунок 5.91). В разделе **Экран** необходимо установить флажок напротив «Solid», а в **Scaling** – «Local».

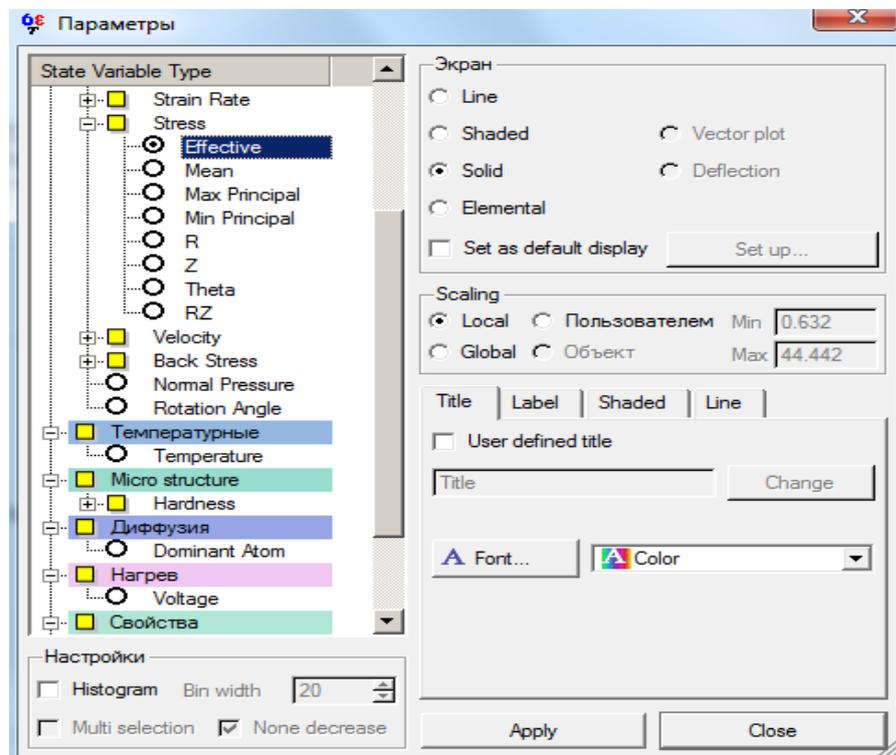
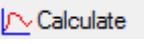


Рисунок 5.91 - Окно **Параметры**

Для выполнения команды необходимо ЛКМ нажать команду **Apply**, затем **Close**.

Для изучения распределения нормального давления на границе деформируемый металл – волокна следует построить график. Для этого необходимо ЛКМ вызвать команду **Параметры**  и выбрать тип переменной «Normal Pressure», затем нажать **Apply** и **Close**. После этого ЛКМ вызвать команду **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне выбрать

закладку **Following Boundary**(по границе), в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвинуть ползунок на значение 20, указать конечную точку P1 и начальную P20 конусной части волокна (рисунок 5.92). Для выполнения команды необходимо нажать ЛКМ команду **Calculate**  (расчёт) и **Заккрыть**.

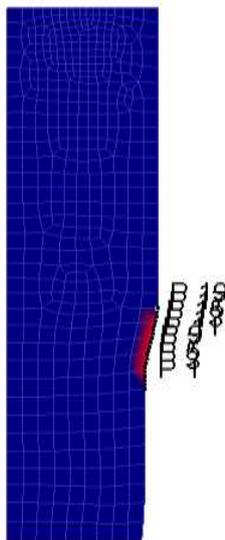


Рисунок 5.92 - Выбор точек для построения графика

На получившейся эпюре значение 0 по оси абсцисс соответствует точке P20, а 1 – точке P1.

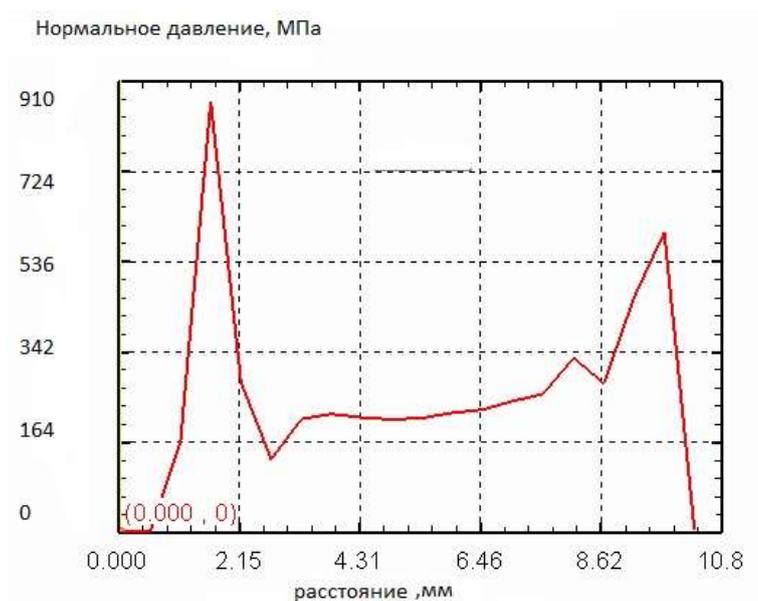


Рисунок 5.93 Эпюра распределения нормального давления на границе металл – волокна

Аналогично можно построить график распределения касательных напряжений на границе деформируемый металл – волокна (рисунок 20). На получившейся эпюре значения 0мм по оси абсцисс соответствует точке P1, а 10мм – точке P20.

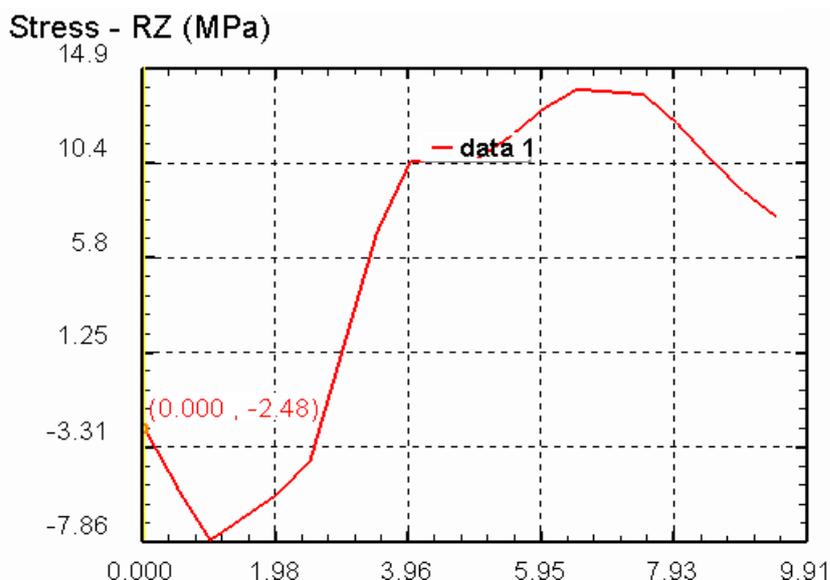


Рисунок 5.94 - Эпюра распределения касательных напряжений на границе металл – волокна

Аналогично можно изучить процесс волочения круглого изделия в коническую волоку с углами рабочей зоны 6°(таблица 5.2) и 15°(таблица 5.3), создав новые задачи командой  на панели управления [60].

Таблица 5.2 - Параметры волоки с рабочим углом 6°

X	Y	R
20	0	0
20	16,5	0
11	16,5	2
10	7	1

10	0	2
20	0	0

Таблица 5.3 - Параметры волокна с рабочим углом 15°

X	Y	R
20	0	0
20	16,5	0
12,5	16,5	2
10	7	1
10	0	2
20	0	0

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчёт по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MSWord* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса волочения;
  - схема процесса волочения;
  - схемы напряжённо-деформированного состояния при волочении;
  - схема рабочего канала волокна.
4. Результаты моделирования процесса волочения через коническую волоку:
  - компьютерная модель процесса;
  - график зависимости усилия волочения от угла рабочей зоны волокна ( $\alpha = 6^\circ, 12^\circ, 15^\circ$ );
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций при волочении в коническую волоку с углами рабочей зоны  $\alpha = 6^\circ, 12^\circ, 15^\circ$ ;

- эпюры распределения нормального давления и касательных напряжений при волочении в коническую волоку с углами рабочей зоны  $\alpha = 6^\circ, 12^\circ, 15^\circ$ .
5. Сравнение и анализ полученных результатов моделирования.
  6. Выводы по проведённым исследованиям.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение процесса волочения.
2. Сортамент изделий, получаемых волочением.
3. Опишите схемы главных деформаций и напряжений при волочении круглых сплошных изделий.
4. Напишите условие пластичности при волочении.
5. Напишите закон Кулона-Амонтона для определения напряжения трения при волочении.
6. Из каких частей состоит рабочий канал волоки?
7. Для чего служат отдельные части канала волоки?
8. Преобладающий вид износа волоки.
9. Причины образования кольца износа.
10. Как открыть задачу в пост- или препроцессоре программы *Deform – 2D*?
11. Как в программе *Deform – 2D* получить эпюры распределения контактных напряжений на границе металл - волока?

## 6 ГОРЯЧАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

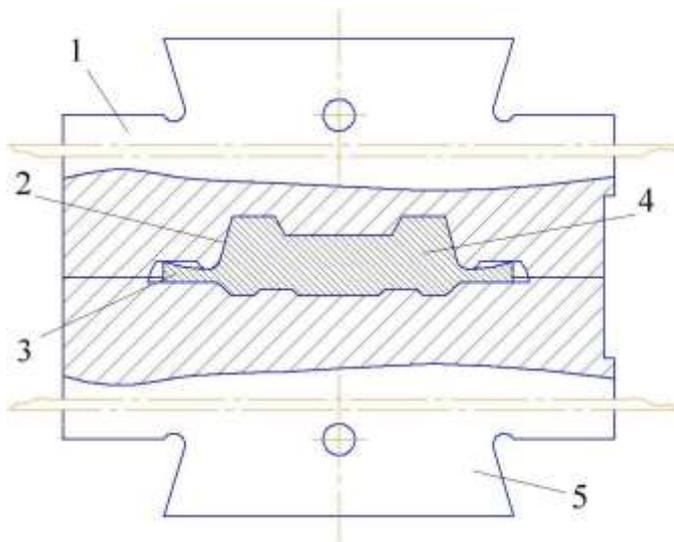
### 6.1 Штамповка поковки "шестерня"

Цель работы: компьютерное моделирование горячей объёмной штамповки поковки шестерни из стали 15Г в открытом штампе с помощью программного комплекса *DEFORM-2D* и анализ распределения напряжённо-деформированного состояния.

#### Краткие теоретические сведения

Объёмная штамповка – одна из разновидностей обработки металлов давлением. Объёмной штамповкой изготавливают заготовки для ответственных деталей автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин, железнодорожных вагонов, самолётов, станков, швейных машин, а также слесарного и медицинского инструмента и многих других деталей [61].

Объёмная штамповка заключается в формоизменении заготовки в штампах под действием внешних сил. Штамп представляет собой специальный инструмент с полостью, которая называется ручьём (рисунок 6.1).



- 1 – верхний штамп; 2 – стенка ручья (полости);  
3 – заусенец; 4 – поковка; 5 – нижний штамп

Рисунок 6.1 - Открытый молотовой штамп

В полости нижней части штампа устанавливают исходную заготовку, которая деформируется при движении верхнего штампа вниз. Течение металла заготовки в ручье штампа встречает сопротивление стенок и сил трения, в результате чего металл заполняет объём ручья. Излишек металла вытекает в разъём между штампами и образуется заусенец. Отштампованная заготовка называется просто поковкой. Поковка представляет собой точную копию ручья штампа. Удаление поковки из штампа облегчается, если боковые стенки полости сделаны с уклоном. После извлечения поковки из полости штампа, обрезают заусенец в специальном обрезном штампе.

Если исходная заготовка нагрета до ковочной температуры, то происходит объёмная горячая штамповка. Если заготовка не нагрета, то имеет место объёмная холодная штамповка.

В качестве машин-орудий для объёмной горячей штамповки применяют главным образом штамповочные молоты и прессы различной конструкции: гидравлические, фрикционные, кривошипные и т.д. В зависимости от применяемого оборудования объёмная штамповка подразделяется на следующие виды:

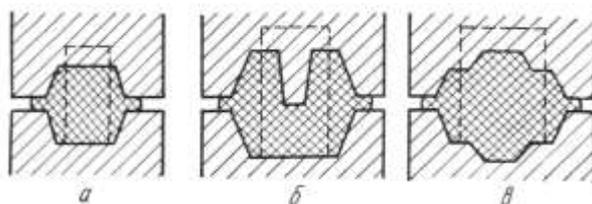
- штамповка на молотах; штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ);
- штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП);
- штамповка на фрикционных прессах; штамповка на гидравлических прессах;
- штамповка на специальных машинах (ковочные вальцы, горизонтально-гибочные машины, вертикально-ковочные машины, ротационно-обжимные и радиально-обжимные машины, электровысадочные машины и раскатные машины).

Схема главных нормальных напряжений при объёмной штамповке представляет схему всестороннего неравномерного сжатия. По схеме деформации объёмная штамповка представляет собой сжатие – деформация в

направлении активной силы  $P$  отрицательная, а две других деформации положительны.

В зависимости от типа штампа различают два основных вида объёмной штамповки – облойная (штамповка с заусенцем) и безоблойная (закрытая).

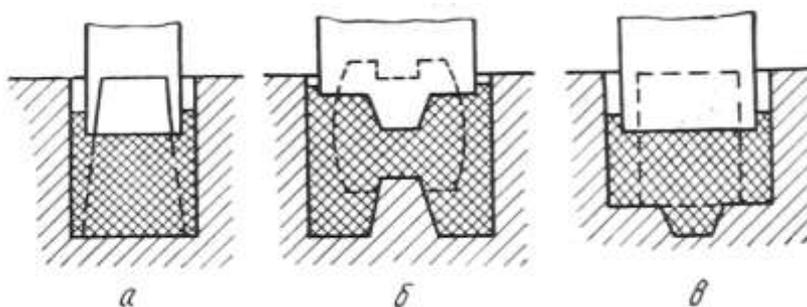
При штамповке с заусенцем деформируемый металл течёт не только в углубления штампа, но и в разъём между частями штампа, образуя заусенец (рисунок 6.2), высота которого в процессе деформирования меняется. Основные элементы объёмной штамповки с заусенцем: осадка, закрытая прошивка и выдавливание (рисунок 6.2).



а – осадкой; б – прошивкой; в – выдавливанием

Рисунок 6.2. Схема штамповки с заусенцем

При безоблойной штамповке металл деформируется в замкнутой полости штампа, в некоторых случаях на конечной стадии штамповки наблюдается небольшой заусенец, образующийся при затекании металла в разъём между частями штампа в направлении, параллельном верхней части штампа (рисунок 6.3).



а – осадкой; б – прошивкой; в – выдавливанием

Рисунок 6.3. Схемы безоблойной штамповки

Заполнение ручья штампа металлом можно условно разделить на несколько стадий (рисунок 6.4). В первой стадии происходит осадка заготовки на величину  $\Delta H_1$  до соприкосновения с боковыми стенками полости штампа, (рисунок 6.4, а).

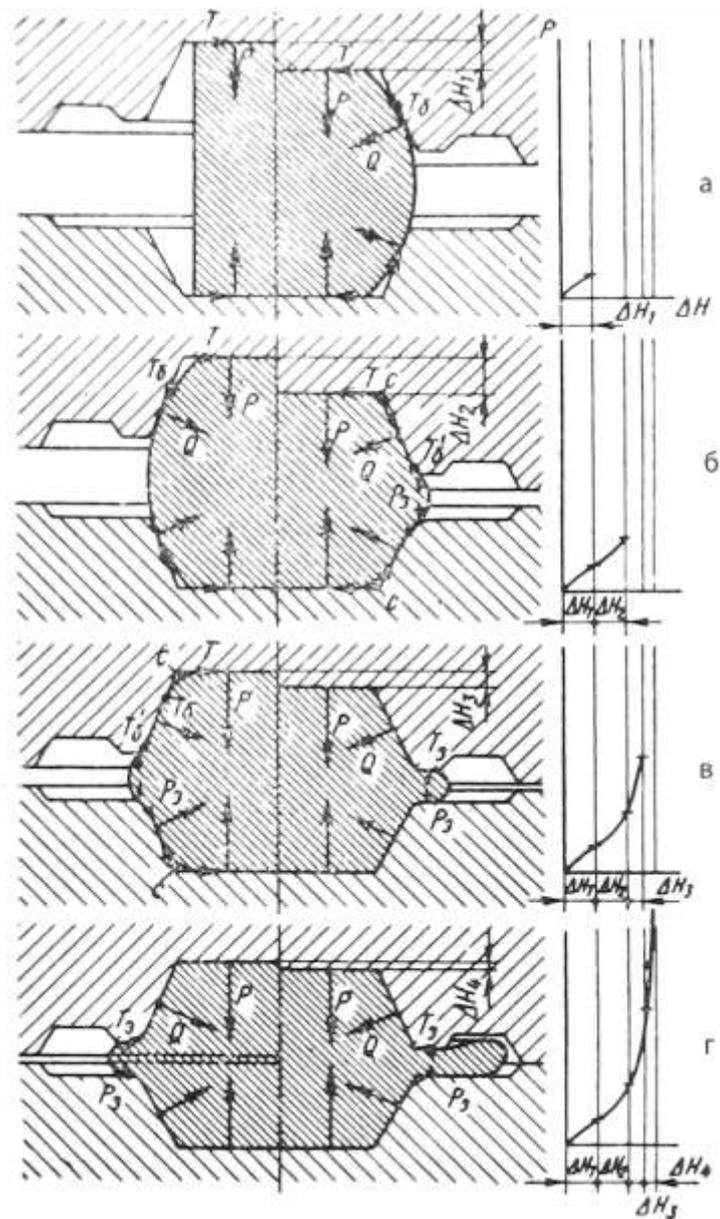
С момента соприкосновения заготовки с боковыми стенками штампа начинается вторая стадия штамповки (рисунок 6.4, б). Усилие на этой стадии процесса возрастает вследствие повышения среднего напряжения шарового тензора из-за подпирающего действия боковых стенок  $Q$  штампа. Появляются силы трения  $T_\sigma$  на боковой поверхности ручья. Эта стадия штамповки завершается при обжатии на  $\Delta H_2$  в момент начала образования заусенца.

На третьей стадии штамповки, при обжатии на  $\Delta H_2$  (рисунок 6.4, в) избыточный металл заготовки вытекает в канавку. Объёмное напряжённое состояние всестороннего сжатия в результате повышенного гидростатического давления становится более ярко выраженным, в связи, с чем интенсивнее возрастает усилие. Общее сопротивление деформации  $P$  возрастает ещё и потому, что теперь приходится деформировать и заусенец (сила  $P_3$  и её реакция). К началу этой стадии штамповки незаполненными остаются лишь углы полости  $C$ . Вследствие течения металла в заусенец, возникают силы трения  $T'_\sigma$  на боковой поверхности у входа в канавку, направленные против сил трения  $T_\sigma$  в области углов полости. Появляются также силы трения  $T$ , на заусенце.

Третья стадия штамповки характерна тем, что в это время заусенец выполняет свою основную технологическую функцию – закрывает полость штампа. При дальнейшей деформации сопротивление выходу металла в канавку возрастает вследствие уменьшения высоты заусенечной щели. Т.к. сопротивление течению металла в незаполненные углы полости теперь меньше, чем в канавку, то к концу этой стадии ручей штампа оказывается заполненным.

На практике всегда бывает четвёртая стадия штамповки, если к моменту заполнения ручья поковка недоштампована, т.е. имеет высоту большую, чем по чертежу, на величину  $\Delta H_4$  (рисунок 6.4, г) Эта стадия характеризуется

выдавливанием избыточного металла из уже заполненной полости штампа.



а, б, в, г – начальные (слева) и конечные (справа) положения стадий штамповки

Рисунок 6.4 - Стадии течения металла при заполнении открытого штампа

При штамповке усилие достигает максимального значения в конце четвёртой стадии и может быть представлено в виде двух составляющих: усилия, необходимого для осадки заусенца в перемычке, и усилия деформации металла в полости штампа.

При определении усилия деформирования металла в полости штампа исходят из установленного теоретически и экспериментально положения, что в

заключительной стадии штамповки пластическая деформация охватывает не весь объём металла в полости штампа; она сосредоточена в некоторой небольшой области по обе стороны плоскости разъёма штампа, принимая пластическую зону линзообразной формы (рисунок 6.5).

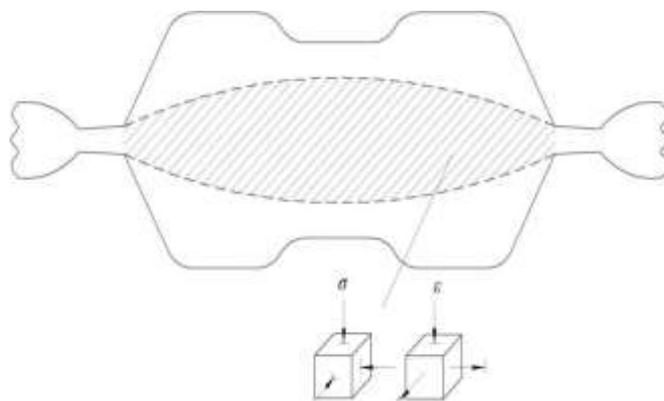


Рисунок 6.5 - Зона пластической деформации (заштрихована) при штамповке с заусенцем на заключительной стадии

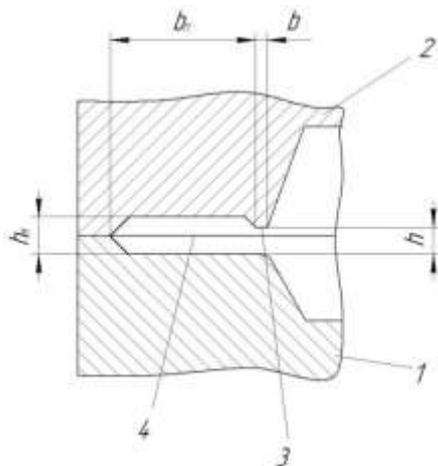
При безоблойной штамповке полость штампа замкнута со всех сторон и заполняется вследствие перераспределения объёма заготовки. При этом заусенец или отсутствует (при массе заготовки, равной массе поковки), или образуется в конце заключительной стадии в форме тонкого венчика на торце поковки.

При безоблойной штамповке резко выражена схема всестороннего сжатия и хорошо заполняются углубления полости металлом; отход в заусенец значительно меньше, чем при штамповке с заусенцем. Однако при этом процессе требуется большая точность массы заготовки.

Для гарантии заполнения всех углублений полостей штампа массу заготовки принимают несколько больше массы поковки. Излишек металла на третьей и четвёртой стадиях вытесняется в облой. Количество металла, вытесняемого в заусенец, при облойной штамповке составляет в среднем 15-20% массы поковки, а при штамповке мелких поковок сложной формы превосходит в несколько раз массу поковки.

Канавка для заусенца имеет перемычку (мостик) и магазин, где

скапливается металл, вытесняемый через перемычку из полости штампа (рисунок 6.6). Размеры магазина должны быть такими, чтобы деформации металла в нём не происходило.



1 – верхняя и 2 – нижняя части штампа, 3 – мостик, 4 – магазин

Рисунок 6.6 - Облойная канавка

Одним из главных параметров горячей объёмной штамповки является температурный интервал. Температурный интервал имеет верхний и нижний предел.

Верхний предел – это максимальная температура нагрева заготовки в печи перед штамповкой  $T_{н.}$ . Она не совпадает с температурой начала обработки  $T_{н.о.}$  и всегда выше последней. Это связано с тем, что при транспортировке металла из печи к кузнечному агрегату температура поверхностных слоёв нагретого тела снижается за счёт потерь тепла излучением, контактом с штампом и конвекционными потоками. Температура же внутренних слоёв (особенно массивных заготовок) практически не изменяется.

Нижний предел температурного интервала – это температура поверхности поковки в момент окончания деформации.

Основные закономерности установления оптимального температурного интервала штамповки сводятся к выполнению рекомендаций:

1. На основании диаграммы состояния сплава определяется температура, характеризующая пережог металла. Температура нагрева должна быть ниже температуры пережога и перегрева.

Перегретым называется металл, имеющий в результате нагрева крупное зерно. Перегрев может получиться при температуре выше критической, если выдержка при этой температуре будет весьма продолжительной. Перегретый металл имеет пониженные пластические свойства, и при его штамповке со значительными степенями деформации могут возникать трещины.

Пережог (неисправимый брак) выражается в том, что при длительной выдержке при высоких температурах происходит окисление границ крупных зёрен перегретого металла. Окислы нарушают связь между зёрнами, и при штамповке металл хрупко разрушается.

Диаграмма состояния помогает также выбрать нижний предел температур штамповки, который должен лежать выше температур фазовых превращений.

2. По диаграмме рекристаллизации определяется возможная температура перегрева, характеризующая резким ростом размера зёрен за счёт собирательной рекристаллизации. Соответственно температура нагрева должна быть ниже температуры нагрева.

3. Проводятся горячие механические испытания для выявления зависимости прочностных и пластических характеристик от температуры. При наличии подобных сведений в нормативно-справочной документации или литературных источниках используются эти данные. По установленной зависимости показателей прочности и пластичности от температуры строят диаграммы пластичности. С их помощью находят температуру наиболее высокой пластичности и относительно малого сопротивления деформации.

4. Путём сопоставления диаграмм пластичности и рекристаллизации выбирают температурную зону, в которой полностью прошли процессы рекристаллизации и структура которой состоит из однородных зёрен требуемого размера. Эти значения температур служат для определения температуры конца штамповки.

Значения температур начала и конца штамповки для сплавов, имеющих одну основу, резко колеблются в зависимости от содержания в них других компонентов; так, например, верхний предел температурного интервала штамповки для различных деформируемых алюминиевых сплавов находится между 470 и 500°C, нижний – между 350 и 400°C; у медных сплавов верхний предел – 700-900°C, нижний – 550-800°C; у магниевых сплавов верхний предел – 370-430°C, нижний – 300-350°C; у титановых сплавов верхний предел – 1000-1200°C, нижний – 700-950°C; у стали верхний предел – 1100-1300°C, нижний – 800-950°C.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *FORGING*. Нажмите кнопку **Finish**.

После запуска препроцессора, нажмите кнопку **Simulation controls** . Убедитесь в том, что в окне **Simulation controls** в качестве системы измерения установлена система «СИ», выбран режим расчета «Деформирование» и «Теплопередача», а тип геометрии – «Осесимметричная» (рисунок 6.7). Нажмите кнопку **OK**.

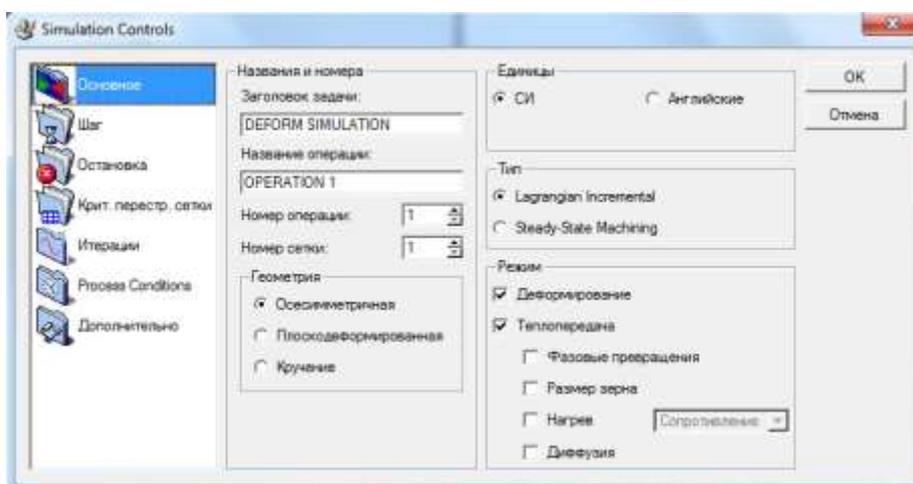
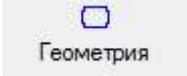


Рисунок 6.7 - Окно **Simulation controls**

## Построение геометрии инструмента и заготовки

Выполним компьютерное моделирование горячей объёмной штамповки поковки шестерни из стали 15Г в открытом штампе.

С помощью геометрических примитивов (пункт **Геометрия** , закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**) постройте цилиндрическую заготовку с размерами по высоте 110 мм и радиусом 50 мм (рисунок 8, а). Для этого в окне **Geometry Primitive** (геометрические примитивы) необходимо выбрать тип объекта «*Cylinder*» и ввести при помощи клавиатуры в области **Размер** в строках **Width** (ширина) и **Height** (высота) значения, соответственно, 50 и 110 мм (рисунок 2.16 9). Нажать ЛКМ на кнопку **Create** (создать), а затем **Заккрыть**.

Добавьте в **Дерево объектов** верхний штамп *Top Die* и нижний штамп *Bottom Die*, нажимая кнопку **Добавить объект** .

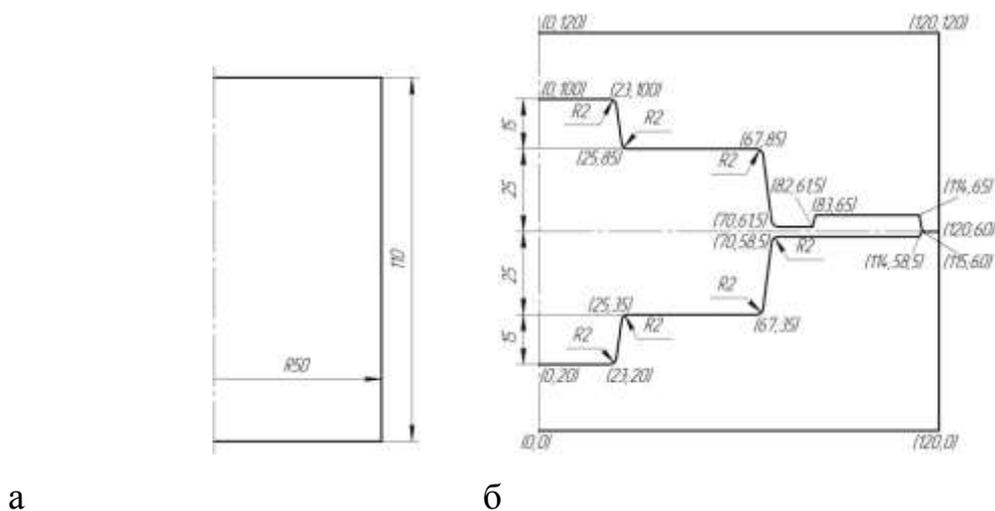


Рисунок 6.8 - Геометрия заготовки (а) и штампа (б)

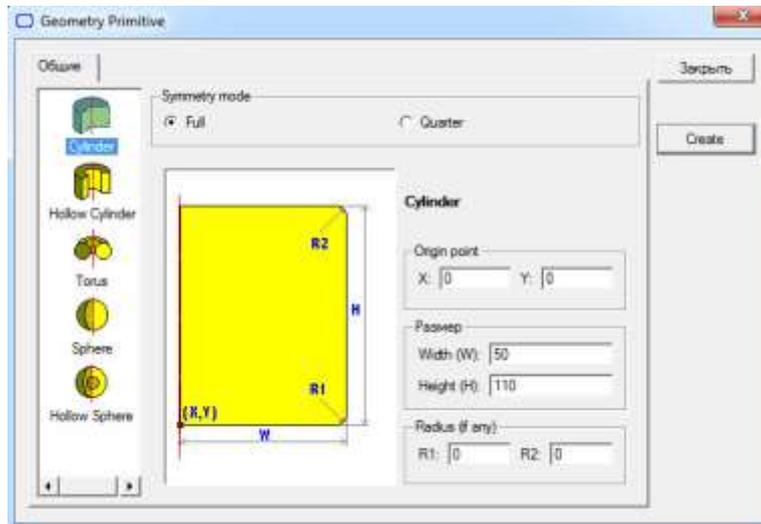


Рисунок 6.9 - Окно **Geometry Primitive**

Сделайте активным нижнюю половину штампа *Bottom Die* (укажите ЛКМ *Bottom Die* в **Дереве объектов**). Перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия**. В появившееся **Поле ввода геометрии** последовательно введите значения, представленные в таблице 6.1 (рисунок 6.8, б). После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить**  **Применить**.

Таблица 6.1 - Координаты точек для построения нижней половины штампа

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	120	0	0
3	120	60	0
4	115	60	0
5	114	58,5	0
6	70	58,5	2
7	67	35	2
8	25	35	2
9	23	20	2
10	0	20	0

Таблица 6.2 - Координаты точек для построения верхней половины штампа

№	X	Y	R
1	0	100	0
2	23	100	2
3	25	85	2
4	67	85	2
5	70	61,5	2
6	82	61,5	0
7	83	65	0
8	114	65	0
9	115	60	0
10	120	60	0
11	120	120	0
12	0	120	0

Проверьте полученную геометрию на наличие ошибок, для этого нажмите кнопку **Check**  **Check**, а затем кнопку **Check&Correct Geometry**. В случае верного построения должно появиться сообщение «*Geometry is legal*».

Действуя аналогичным образом, постройте геометрию верхней половины штампа *Top Die*. Координаты точек приведены в таблице 6.2 (рисунок 6.8, б).

Конечная геометрия заготовки, верхней и нижней половины штампа изображена на рисунок 6.10, а.

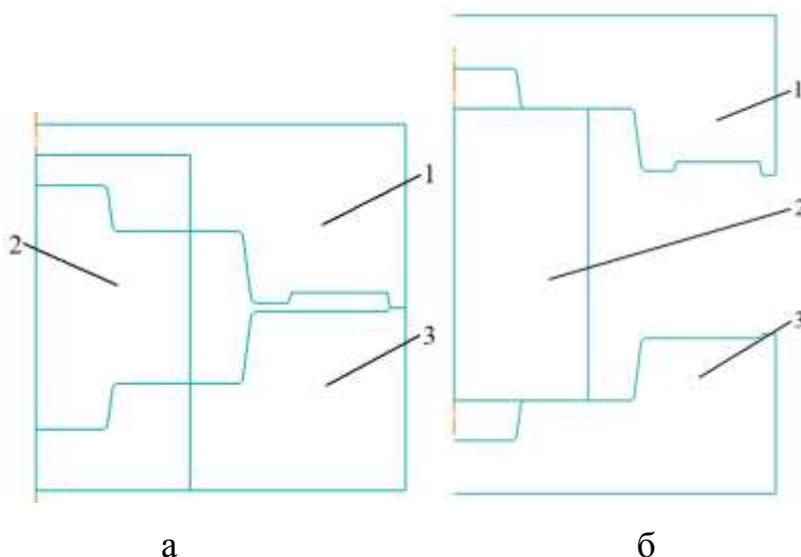
### Позиционирование объектов

Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 6.11), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения объектов относительно друг друга (рисунок 10, б) воспользуйтесь методом **Интерференция**.

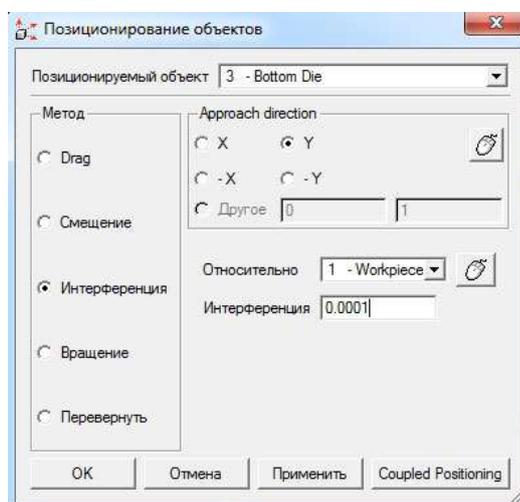
Сначала расположим заготовку и нижнюю половину штампа по отношению друг к другу. В строке **Позиционируемый объект** выберите *Bottom*

Die, а в строке **Относительно** – *Workpiece*(рисунок 6.11). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «Y». Для позиционирования нажмите кнопку **Применить**.

По аналогии осуществите позиционирование верхней половины штампа. За направление сближения выберите «-Y», в качестве позиционируемого объекта установите *Top Die*, а в строке **Относительно** – *Workpiece*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунок 6.10, б.

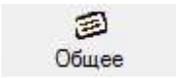


1, 3 – верхняя и нижняя половина штампа; 2 – заготовка  
Рисунок 6.10 - Изображение после задания геометрии (а) и позиционирования (б)



## Рисунок 6.11 - Окно **Позиционирование объектов**

### Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный». Установите температуру заготовки, для этого там же нажмите кнопку **Задать температуру** и в появившемся окне **Object Temperature** (температура объекта) введите 1100°C (рисунок 6.12). Нажмите **ОК**.

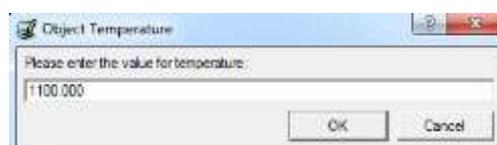
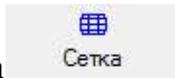


Рисунок 6.12 - Окно **Object Temperature**

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка**  на **Панели инструментов**, задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. Появится окно **Material Library**, в котором выберите группу материалов «*Steel*» (стали) и марку «*AISI-1016[1650-2200F(900-1200C)]*» (сталь 15Г), после этого нажмите ЛКМ на кнопку **Загрузить** (рисунок 13, а).

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

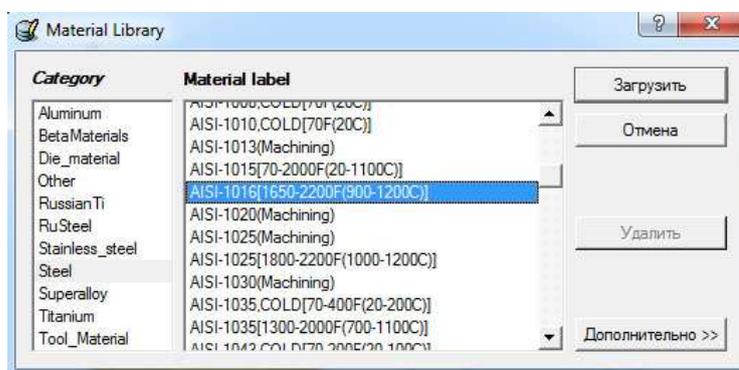
### Создание модели инструмента

Выделите в **Дереве объектов** нижнюю половину штампа *Bottom Die* и убедитесь в том, что в пункте **Общее** стоит тип объекта «Жесткий». Установите температуру штампа, для этого там же нажмите кнопку **Задать температуру** и

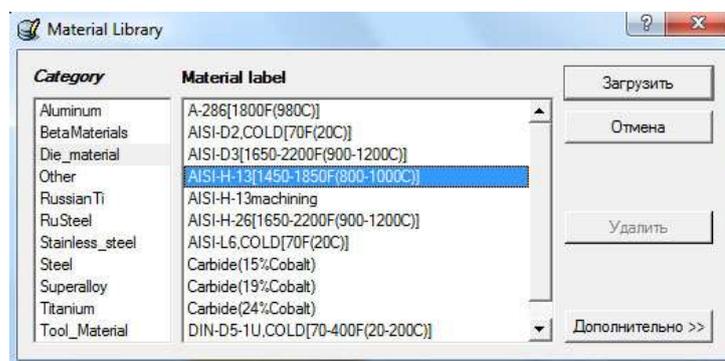
в появившемся окне введите 400°C. Нажмите **ОК**.

Чтобы разбить модель штампа на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** на **Панели инструментов**, задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала штампа, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите группу материалов «*Die\_material*» (инструментальные материалы) и марку стали «*AISI-H-13[450-1850F(800-1000C)]*» (сталь 4X5MΦ1С), после этого нажмите кнопку **Загрузить** (рисунок 6.13, б).



а



б

Рисунок 6.13 - Окно **Material Library**

Выделите в **Дереве объектов** верхнюю половину штампа *Top Die* и аналогичным образом установите температуру объекта (400°C), сгенерируйте конечно-элементную сетку (1000 элементов) и задайте материал (*AISI-H-13[450-1850F(800-1000C)]*).

## Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 14).

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «*Shear*». Затем в блоке **Value** (значение) выберите «*Hot forging (lubricated)*» (горячая штамповка со смазкой), нажав на кнопку  (рисунок 6.15). Коэффициент трения станет равным 0,3.

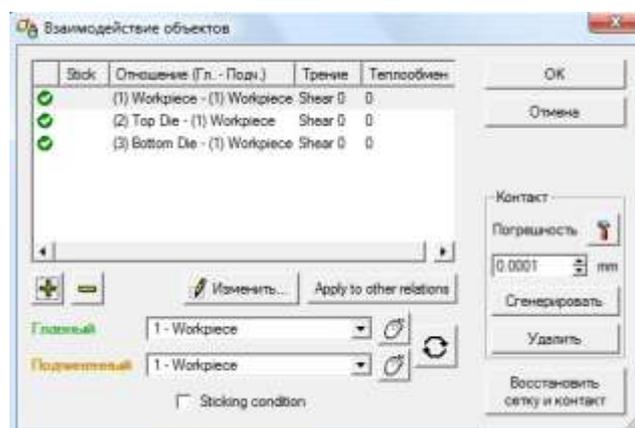


Рисунок 6.14 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

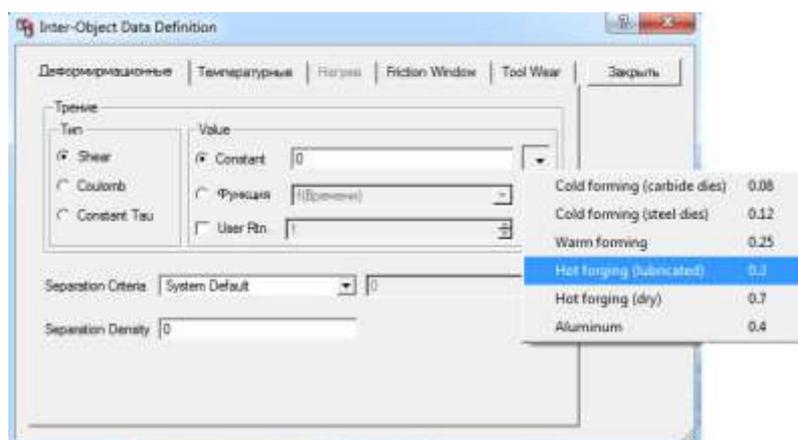


Рисунок 6.15 - Вкладка **Деформационные** окна **Inter-Object Data Definition**

Затем перейдите на вкладку **Температурные** и в блоке **Heat Transfer**

**Coefficient** (коэффициент теплопередачи) выберите «*Forming*» (формоизменение), нажав на кнопку  (рисунок 6.16). Автоматически установится значение равное 11. Нажмите кнопку **Заккрыть**.

Т.к. коэффициенты трения и теплопередачи между заготовкой и обоими инструментами одинаковы, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к остальным (рисунок 6.14).

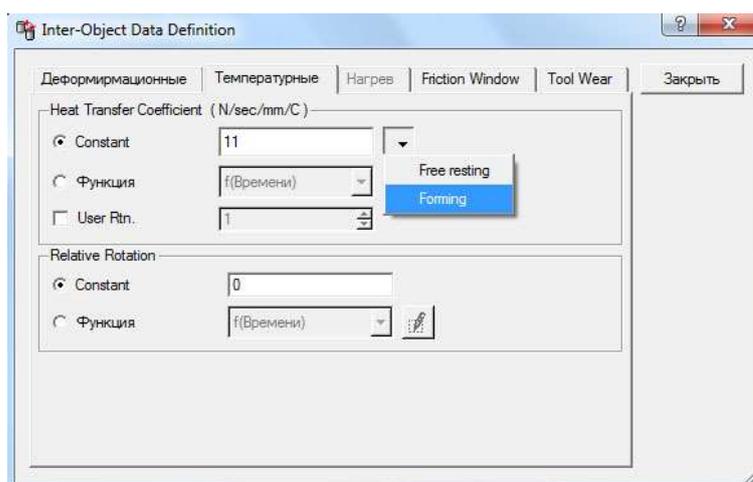


Рисунок 6.16 Вкладка **Температурные** окна **Inter-Object Data Definition**

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта (рисунок 6.17). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

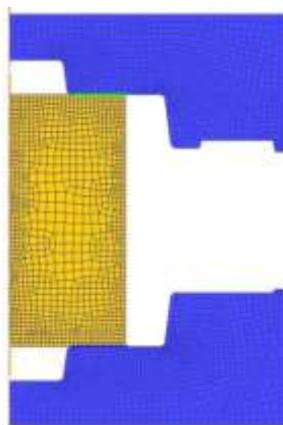


Рисунок 6.17 - Контактные поверхности между заготовкой и половинами штампа

### Задание движения верхнего инструмента

Укажите ЛКМ верхнюю половину штампа *Top Die* в Дереве объектов для приложения движения. Затем нажмите кнопку **Движение**  и, убедившись, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в строку **Constant value**, расположенную в самом низу, значение 1 мм/с (рисунок 6.18).

В соответствии с заданными условиями нагружения верхняя половина штампа будет перемещаться вниз (-Y) с постоянной скоростью 1 мм/с.

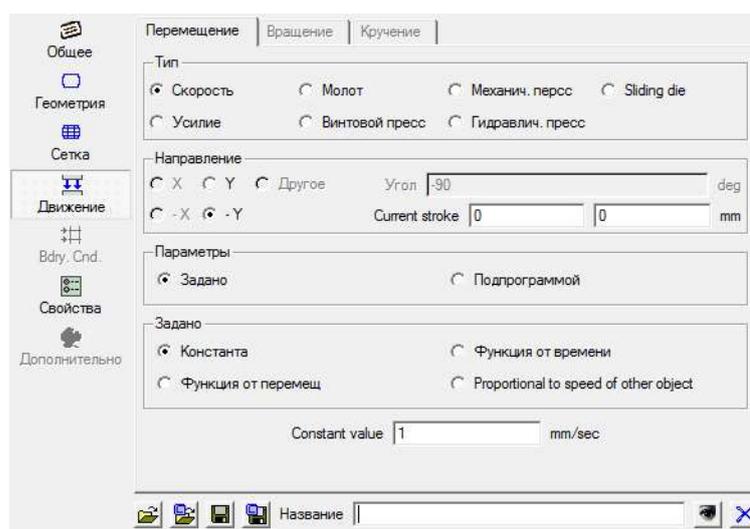


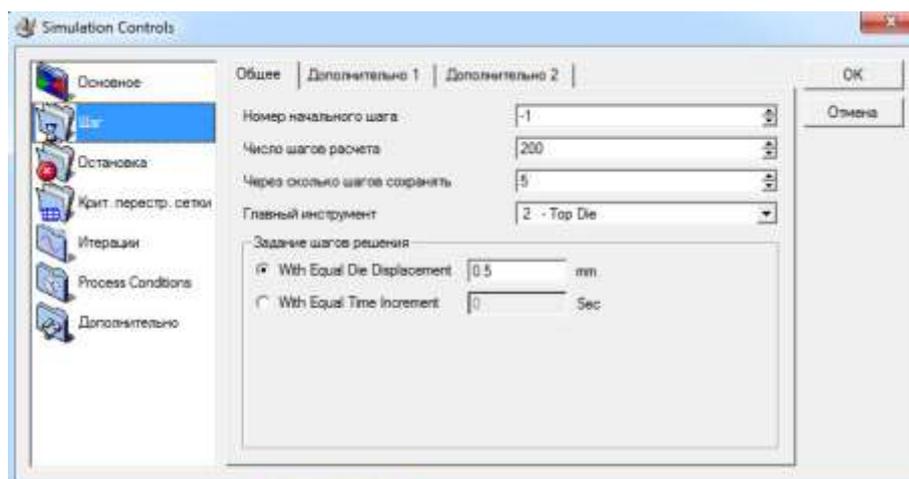
Рисунок 6.18 - Пункт Движение из Панели инструментов

### Задание числа шагов расчета

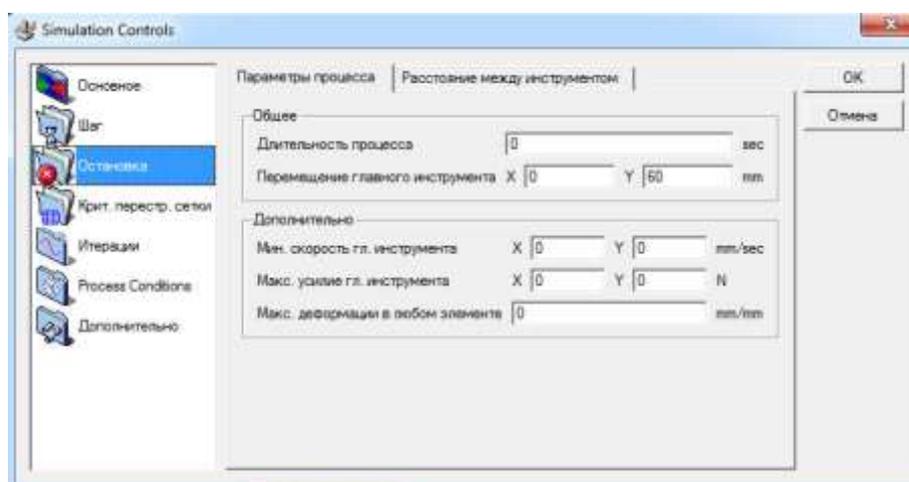
Для определения величины шага необходимо произвести замер ребра любого конечного элемента заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , а затем данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем введите величину шага 0,5 мм

(результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 6.19, а).



а



б

Рисунок 6.19 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг** (а) и **Остановка** (б)

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. В ячейку в строке **Число шагов расчета** введем заведомо большее число шагов равное 200 (рисунок 6.19, а).

Установим критерий остановки расчета по достижению заданного перемещения главного инструмента. Для этого в окне **Simulation controls**

перейдите на закладку **Остановка** . Затем в блоке **Общее** введите в ячейку **Y** строки **Перемещение главного инструмента** значение 60 мм (рисунок 6.19,

б). Это приведет к остановке расчета при перемещении верхней половины штампа на 60 мм по оси Y, т.е. при полном смыкании штампа. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 6.20). Для закрытия окна нажмите кнопку **Закрыть**.

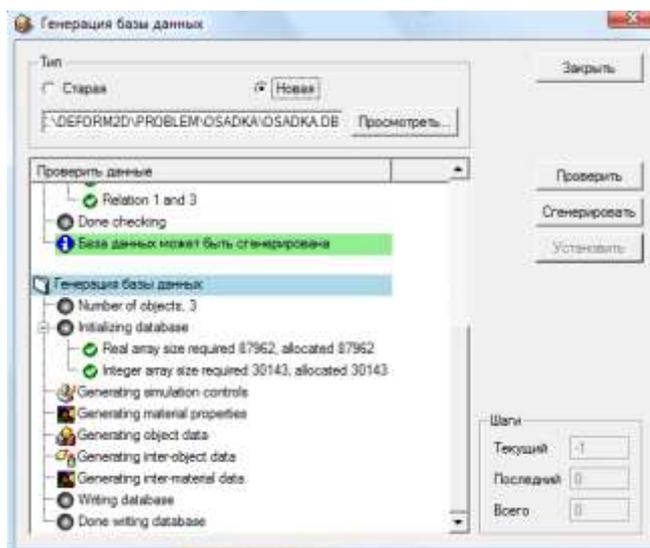


Рисунок 6.20 - Окно Генерация базы данных

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку .

Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл

базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается, или полосой **Remeshing**, что говорит о перестроении конечно-элементной сетки.

### Анализ результатов моделирования

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** .

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от стадии заполнения открытого штампа (рисунок 22). Для отображения распределения интенсивности напряжений (деформаций) нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*») (рисунок 21). В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

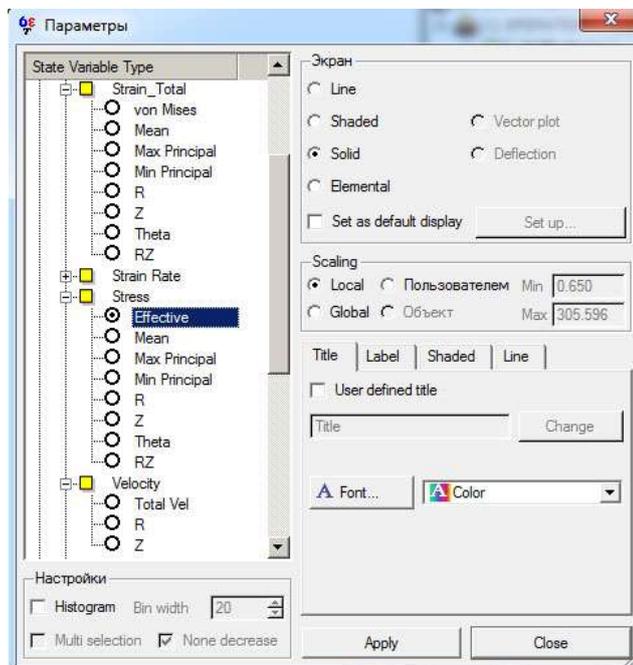


Рисунок 6.21 - Окно **Параметры**

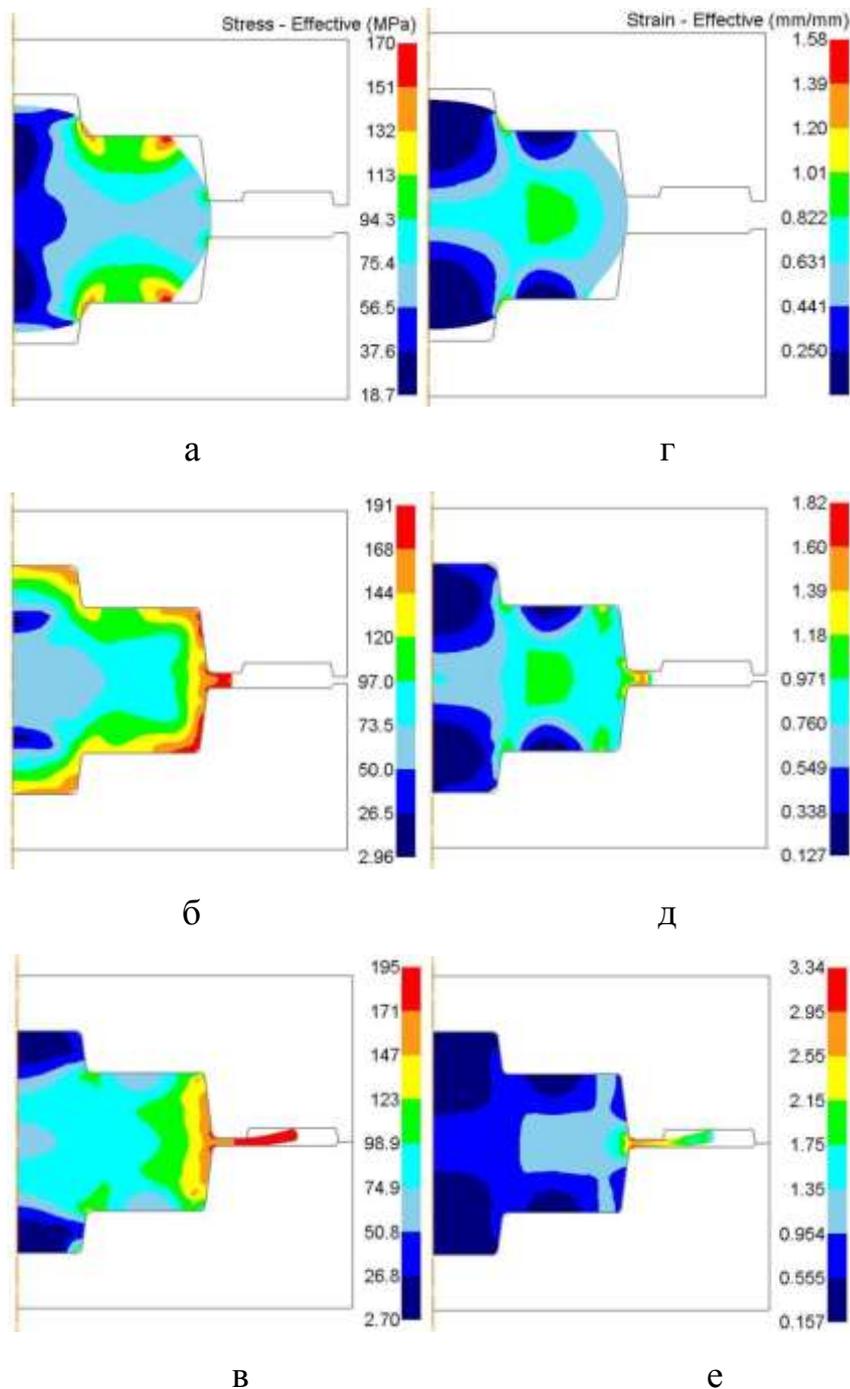


Рисунок 6.22 - Распределение интенсивности напряжений (а-в) и деформаций (г-е)

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 6.24) и векторному полю скоростей (рисунок 6.23).

Для отображения скоростей (рисунок 6.23) нажмите кнопку **Параметры** , выберите тип переменной «Velocity» и подтип «Total Vel» (рисунок 6.21). В разделе **Экран** установите «Vector plot». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

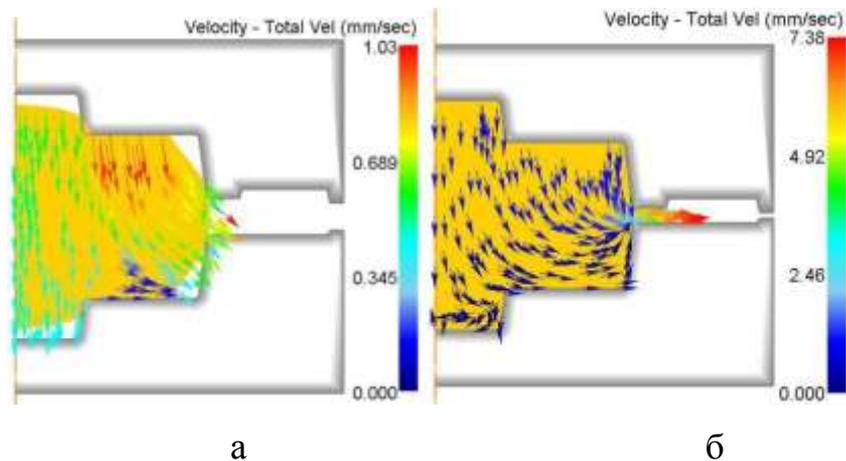


Рисунок 6.23 - Поле скоростей на различных стадиях заполнения открытого штампа

Для построения координатной сетки (рисунок 6.24) нажмите кнопку **Flow Net**  и в окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* и снова нажмите **Next**. В новом окне введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 5 и 11. Нажмите кнопку **Next**, а затем **Finish**.

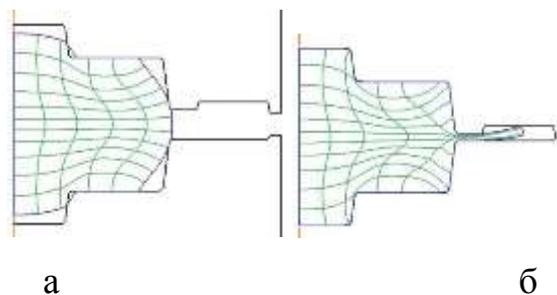


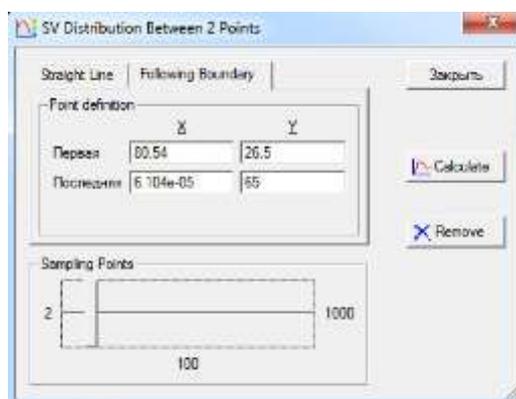
Рисунок 6.24 - Координатная сетка на различных стадиях заполнения открытого штампа

Перед построением графика изменения давления на верхнюю половину штампа (рисунок 6.26) необходимо перейти на последний шаг расчета (кнопка **Last step** ) и отобразить распределение этой характеристики в деформируемой заготовке. Для этого нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Normal Pressure*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**

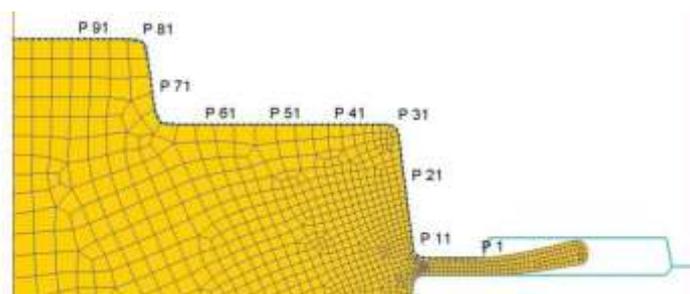
(рисунок 6.21).

Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Following Boundary** (по границе) и в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 100 (рисунок 6.25, а).

В окне **Display**, предварительно увеличив верхнюю половину штампа кнопкой **Увеличить** , щелчком ЛКМ укажите точку P1, а затем P100 (рисунок 6.25, б). Нажмите на кнопку **Calculate**  (расчет), при этом в графическом окне автоматически отобразиться график. Нажмите кнопку **Заккрыть**.



а



б

Рисунок 6.25 - Построение графика по точкам

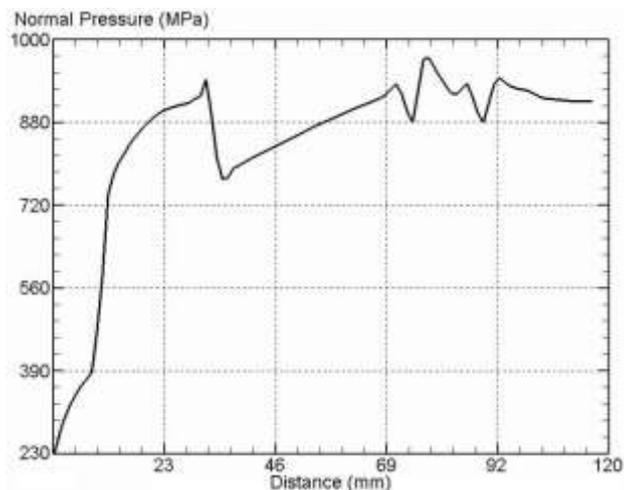


Рисунок 6.26 - Эпюра давления на верхнюю половину штампа

На графике, изображенном на рисунок 26, значение 120 мм по оси абсцисс соответствует точке P100, лежащей на оси изделия, а 0 мм – точке P1, лежащей на краю облойного мостика (рисунок 6.25, б).

Дайте анализ изменения температуры заготовки, верхней и нижней половины штампа при горячей штамповке (рисунок 27). Для отображения распределения температуры нажмите на кнопку **Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «Температурные» и подтип «Temperature» (рисунок 21). В разделе **Экран** установите «Solid», а в **Scaling** – «Local». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

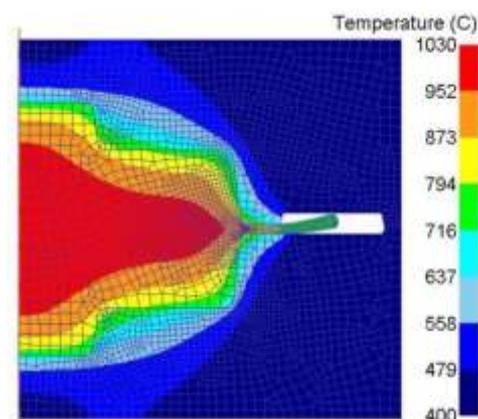


Рисунок 6.27 - Распределение температуры при горячем прессовании

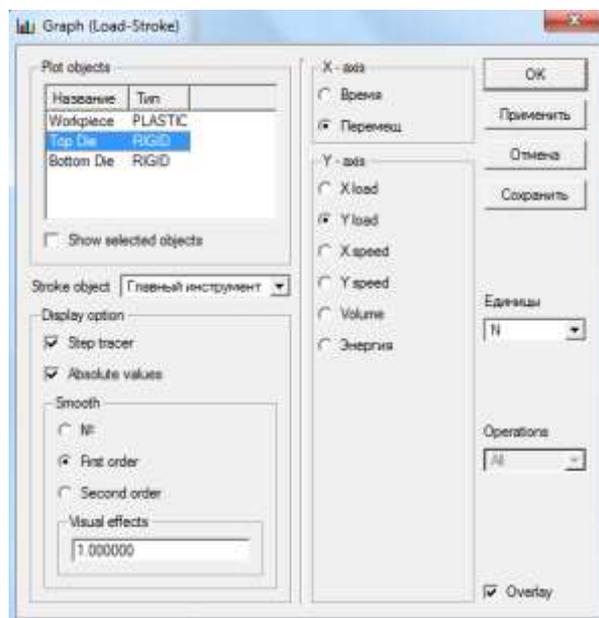


Рисунок 6.28 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

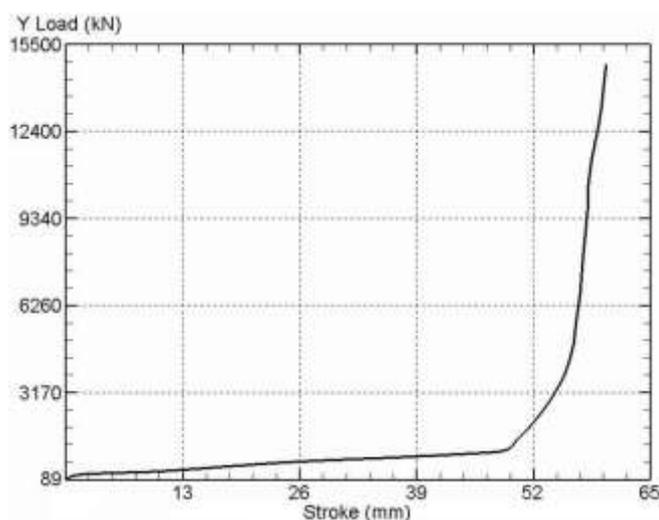


Рисунок 6.29 - Изменение усилия штамповки в зависимости от перемещения верхней половины штампа

Опишите характер изменения усилия штамповки по стадиям процесса (рисунок 29). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 28) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим перемещение верхней половины штампа, поэтому в разделе **X-axis** установите «Перемещ». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность горячей объемной штамповки;
  - схема штамповки с заусенцем;
  - стадии течения металла при заполнении штампа.
4. Результаты моделирования горячей объемной штамповки:
  - компьютерная модель горячей штамповки поковки шестерни;
  - искажение координатной сетки и векторное поле скоростей при открытой штамповке;
  - график усилия штамповки в зависимости от перемещения;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций по стадиям штамповки;
  - распределение тепла в заготовке и инструменте;
  - график изменения давления на верхнюю половину штампа.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение ручьев в штампах.
2. Перечислите основные виды объемной штамповки.
3. Перечислите основные элементы объемной штамповки.
4. Какую штамповку называют безоблойной?
5. Назовите основные стадии объемной штамповки.
6. Какую функцию выполняет облойные канавки?
7. Из каких элементов состоит облойная канавка?
8. Какие схемы напряжений и деформаций характерны для объемной

штамповки?

9. Как выглядит очаг пластичной деформации на заключительной стадии объёмной штамповки?

10. Какое оборудование применяют при объёмной штамповке?

11. Дайте определение объёмной штамповки.

12. Сортамент деталей, получаемых объёмной штамповкой.

13. Из чего складывается объём заготовки при открытой объёмной штамповке?

14. Как называется инструмент при объёмной штамповке?

15. В чём сущность процесса объёмной штамповки?

16. Что происходит на стадии доштамповки?

17. Как по диаграмме пластичности выбрать температурный интервал штамповки?

18. Что представляет собой перегрев и пережог?

19. Как на диаграмме состояния определить нижний предел температур штамповки?

20. Как в программе DEFORM-2D построить график по точкам?

21. Когда используется команда «Измерить»?

22. Как установить температуру штампа и заготовки?

23. Как задать материал штампа и заготовки?

## 6.2 Влияние объема заготовки на качество заполнения ручья штампа при открытой штамповки

Цель работы: компьютерное моделирование процесса штамповки шестерни из стали 45, изучение влияния объема заготовки на заполнение ручья штампа, изучение напряженно-деформированного состояния и привитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-2D.

### Краткие теоретические сведения

Штамповка в открытом штампе характеризуется образованием заусенца, выполняющего некоторые технологические функции. Типичными машинами-орудиями для этого способа штамповки являются молоты и прессы.

Сущность данного процесса легко уяснить на примере штамповки цилиндра. В простейшем случае (рисунок 6.30, а) цилиндрическая полость штампа выполнена в одной части штампа 2, вторая часть штампа представляет собой плоский боек 1. Если объем заготовки  $V_{\text{заг}}$  равен объему полости штампа  $V_{\text{ш}}$ , то штамповку можно было бы представить оконченной при соприкосновении частей инструмента 1 и 2. Однако этого соприкосновения не произойдет. Вследствие появления контактных сил  $T$  на боковой стенке полости  $P = R + T$  и  $R < P$ , в результате удельная нормальная сила в нижней части полости будет меньше, чем в верхней. Это приводит к вытеканию части металла в заусенец толщиной между частями штампа 1 и 2, а нижние углы полости при высоте поковки будут незаполненными (рисунок 6.30, а, левая часть). Если продолжить штамповку до толщины заусенца и высоты поковки, то все равно углы не смогут заполниться, так как часть металла уже вытекла за пределы полости [62].

Если увеличить объем заготовки до  $V_{\text{заг}} > V_{\text{ш}}$ , то можно добиться заполнения полости при толщине заусенца и высоте поковки  $H_{\text{нок}}$  (рисунок 6.30, а, правая часть). Это произойдет вследствие того, что тонкий заусенец в конце концов создаст достаточное противодействие, металл прекратит

дальнейшее вытекание за пределы полости и вынужден будет затечь в углы. Следующие трудности составит извлечение поковки, поскольку она удерживается в цилиндрической полости силами трения. Удаление поковки из штампа облегчается, если боковые стенки полости сделаны с уклоном, а поковка с напуском, что приводит к дополнительным отходам металла в стружку. Кроме того, при данной схеме штамповки на машинах со свободным перемещением рабочих органов (молоты и гидравлические прессы) нельзя гарантировать точности размера  $H_{\text{пок}}$ . В связи с этим применяют штамп по схеме на рисунке 6.30, б (правая часть). При этом на машинах со свободным ходом штампуют до соприкосновения частей штампа между собой; высота поковки  $H_{\text{пок}}$  и их объем  $V_{\text{пок}}$  — заданные величины, даже если объем различных заготовок  $V_{\text{заг}}$  неодинаков из-за наличия допусков на прокатку и резку. Колебание объемов различных заготовок приводит к неодинаковому объему заусенца и примерно к одинаковым по объему поковкам. Это и составляет основное достоинство открытых штампов.

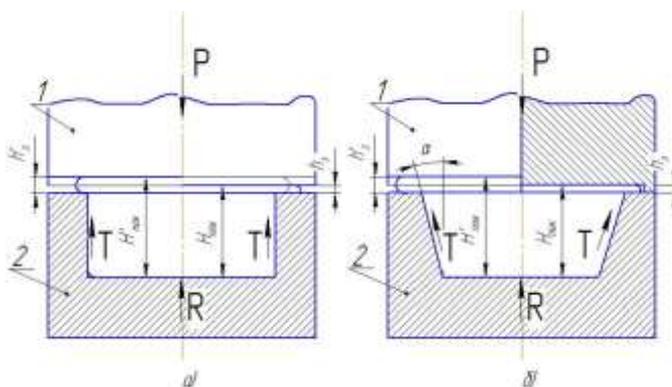
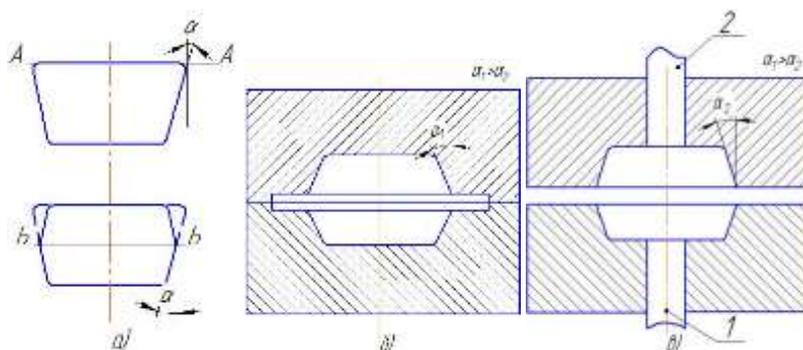


Рисунок 6.30 - Схемы, поясняющие процесс штамповки в открытом штампе

Для уменьшения отходов металла в напуски  $V_{\text{нап}}$ , вызываемые наличием штамповочных уклонов  $\alpha$  (рисунок 6.31), плоскость разъема штампа АА (рисунок 6.31, а) смещают к средней плоскости ББ поковки, форма которой становится в виде формы двух усеченных конусов, сопряженных большими основаниями. При этом штамп изготавливают по схеме, показанной на рисунке 6.31, б, которая характерна для открытых штампов. Для уменьшения уклонов

применяют штампы с выталкивателями 1 и 2 поковок из полости (рисунок 6.31, в). Открытые штампы с выталкивателями применяют, например, на кривошипных прессах. После извлечения поковки из полости основного штампа обрезают заусенец в специальном обрезном штампе, обычно на вспомогательном обрезном прессе.

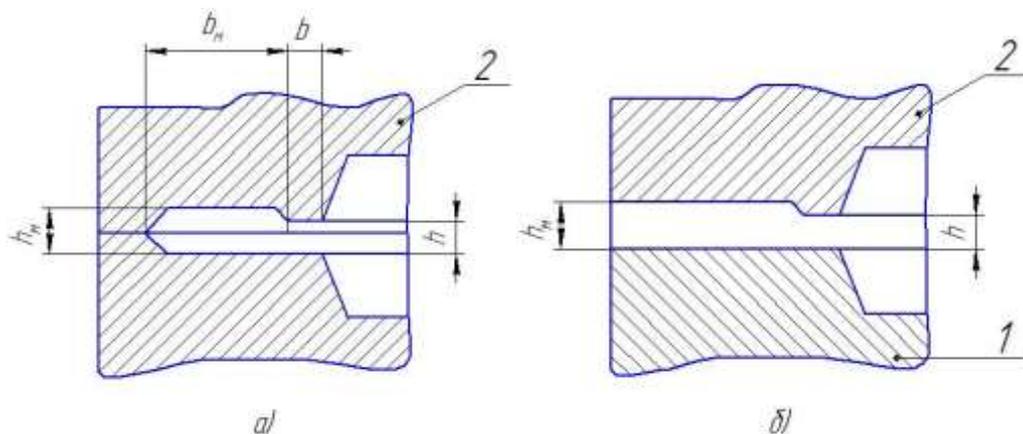


1 и 2 – выталкиватели;

$\alpha_1$  – уклон штампа без выталкивателя;  $\alpha_2$  – то же с выталкивателем

Рисунок 6.31 - Схемы штамповки в открытых штампах

Поскольку заусенец выполняет определенную технологическую задачу— тормозит вытекание излишков металла из полости и этим самым обеспечивает заполнение ее углов, заусенцу придают некоторую целесообразную форму. С этой целью заусенечную щель между частями штампов выполняют в виде специальной канавки (рисунок 6.32). Если машина-орудие для штамповки имеет свободный ход (молот, гидравлические и винтовые фрикционные прессы), то окончание штамповки соответствует соприкосновению частей 1 и 2 штампов (рисунок 6.32, а) и поковка получает окончательные размеры по высоте. Заусенечная канавка состоит из рабочей пороговой части (высотой в конце штамповки  $h$  и шириной  $b$ ) и накопителя-магазина (высотой  $h_m$  и шириной  $b_m$ ). Канавка штампов машин-орудий с регламентированным ходом (кривошипные, кривошипно-коленные прессы) имеет магазин открытого типа высотой  $h_m$  в конце штамповки (рисунок 6.32, б).



а – для машин со свободным ходом;

б – для машин с регламентированным ходом;

1 – верхняя и 2 – нижняя части штампов

Рисунок 6.32 - Две основные разновидности заусенечных канавок

Размеры магазина устанавливаются такими, чтобы он заполнялся металлом в конце штамповки не более чем на  $2/3$  (при наибольшем избытке металла в заготовке).

Штамповка в открытых штампах характеризуется следующими основными признаками.

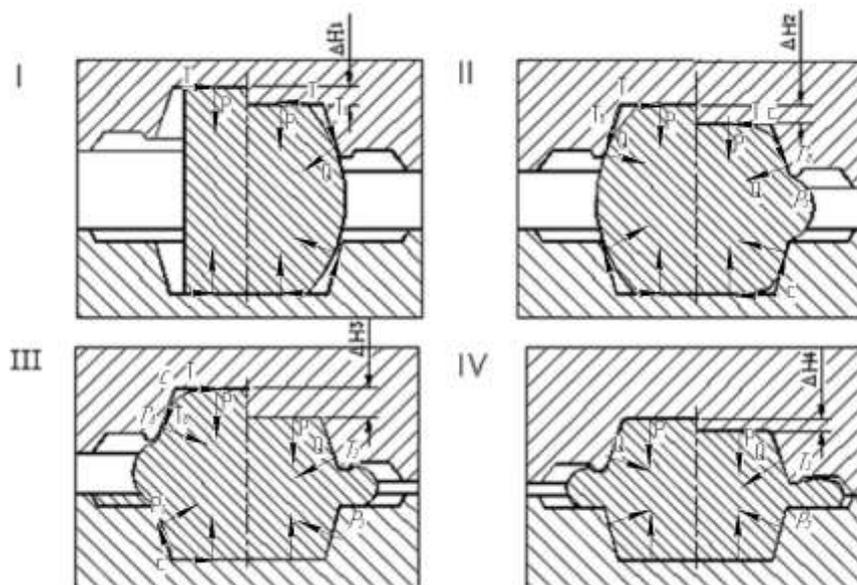
1. Объем металла, находящегося в ручье, в процессе штамповки непостоянен  $V \neq \text{const}$ , при штамповке предусматривается вытеснение части металла в виде заусенца, который обеспечивает заполнение углов полости штампа, этот металл поступает в отход.

2. Направление вытеснения металла в заусенечную щель (поперечное) перпендикулярно направлению движения штампа, толщина заусенца в процессе штамповки уменьшается.

3. По месту обрезки заусенца волокна металла у поковки оказываются перерезанными.

4. Из заготовок с размерами низкой точности получают поковки с размерами более высокой точности за счет различного для каждой заготовки объема металла, вытесняемого в заусенец.

Заполнение ручья металлом можно разделить на несколько (например, четыре) стадий. Рассмотрим простейший случай (рисунок 6.33).



1, 2, 3, 4 – начальные (слева) и конечные (справа) положения стадий штамповки

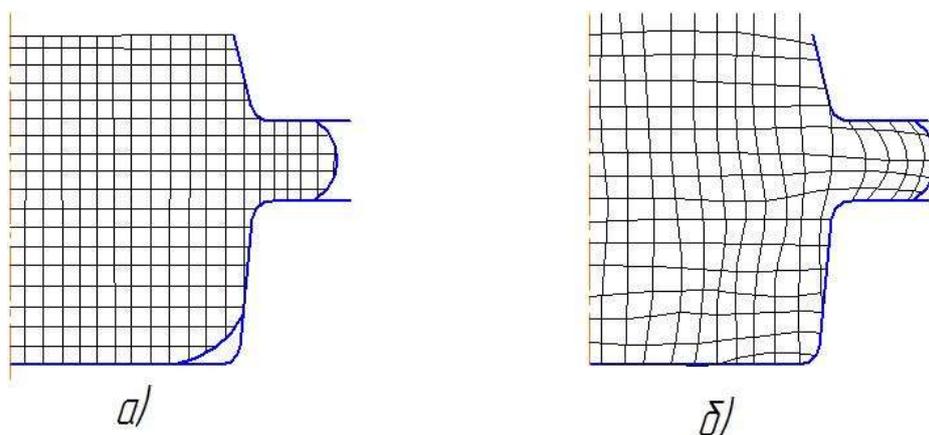
Рисунок 6.33 - стадии течения металла при заполнении открытого штампа

В первой стадии происходит свободная осадка заготовки на величину  $\Delta H_1$  (рисунок 6.33, 1). В более сложных случаях свободная осадка сопровождается частичным выдавливанием в дополнительные углубления полости или прошивкой металла с образованием выемок в поковке. На этой стадии штамповки усилие на деформацию относительно невелико. На заготовку действуют внешняя сила  $P$ , ее реакция и силы трения  $T$  по торцам заготовки.

С момента соприкосновения заготовки с боковыми стенками штампа начинается вторая стадия штамповки (рисунок 6.33, 2). Усилие на деформацию на этой стадии процесса возрастает (рисунок 6.33, 2) вследствие повышения среднего напряжения шарового тензора из-за подпирающего действия боковых стенок  $Q$  штампа. Появляются силы трения  $T_b$  на боковой поверхности ручья. Эта стадия штамповки завершается при обжатии на  $\Delta H_2$  в момент начала образования заусенца.

На третьей стадии штамповки при обжатии на  $\Delta H_3$  (рисунок 6.33, 3) избыточный металл заготовки вытекает в канавку. Объемное напряженное состояние металла в результате повышенного гидростатического давления становится более ярко выраженным, в связи с чем интенсивнее возрастает усилие на деформацию (рисунок 6.33, 3). Общее сопротивление деформации  $P$  возрастает еще и потому, что теперь приходится деформировать и заусенец (сила  $P_3$  и ее реакция). К началу этой стадии штамповки незаполненными остаются лишь углы полости  $c$ . Вследствие течения металла в заусенец возникают силы трения  $T'_6$  на боковой поверхности у входа в канавку, направленные против сил трения  $T_6$  в области углов полости. Появляются также силы трения  $T_3$  на заусенце. Третья стадия штамповки характерна тем, что в это время заусенец выполняет свою основную технологическую функцию — закрывает полость штампа. При дальнейшей деформации сопротивление выходу металла в канавку возрастает вследствие уменьшения высоты заусенечной щели. Так как сопротивление течению металла в незаполненные углы полости теперь меньше, чем в канавку, то к концу этой стадии ручей штампа оказывается заполненным. О деформациях в третьей стадии штамповки можно судить по изменению координатной сетки (рисунок 6.34, б), нанесенной на сечение заготовки по окончании второй стадии штамповки (рисунок 6.34, а).

На практике всегда бывает четвертая стадия штамповки, если к моменту заполнения ручья поковка недоштампована, то есть имеет высоту большую, чем по чертежу, на величину  $\Delta H_4$  (рисунок 6.33, 4).



### Рисунок 6.34 - Деформация заготовки на третьей стадии штамповки в открытом штампе

Для вытеснения из полости штампа избыточного металла приходится дополнительно затрачивать энергию за счет нанесения еще нескольких ударов. На этой стадии штамповки силы трения движения ТЗ остаются лишь на заусенце. Увеличенная четвертая стадия штамповки наблюдается при чрезмерно большом объеме заготовки, при малой толщине перемычки заусенца  $h$  или при большой ширине порога  $b$  канавки (рисунок 6.32). Сопротивление деформации на этой стадии штамповки быстро возрастает до наибольших величин. Для правильного представления о механизме заполнения полости штампа следует иметь в виду, что стадии штамповки следуют друг за другом не одновременно по всему периметру поковки. Исключение составляют поковки типа тел вращения, штампуемые в торец, для которых в большинстве случаев наблюдается одновременное по периметру возникновение и смена стадий штамповки. Для поволок сложной формы неодинаковое развитие третьей и четвертой стадий штамповки на разных участках по периметру легко обнаруживается при штамповке на молоте путем их рассмотрения перед последними ударами. Углы штампа заполняются вначале только в отдельных местах полости.

Для эксперимента были взяты одинаковые заготовки. Среднее число ударов определялось по десяти поковкам. На четвертую стадию штамповки затрачивается 30—50% общей энергии, причем абсолютная деформация поковки совсем незначительна — менее 2 мм.

Минимальный расход металла в заусенец определяют в связи с основным его назначением — тормозить вытекание металла за пределы ручья штампа до начала четвертой стадии штамповки.

Минимально необходимый заусенец определяют в зависимости от формы фасонной заготовки, положения плоскости разреза штампа и размеров порога канавки. Объем минимального заусенца для данной поковки неодинаков и

зависит от конструктивного оформления-штампа (рисунок 6.35). Меньший его объем относится к случаю тонкого  $h$  и узкого  $b'$  заусенца, расположенного у торца поковки в том месте, где течение металла наиболее затруднено (рисунок 6.37, а). Однако, исходя из условий уменьшения потерь металла с напусками и удобств обрезки заусенца получила распространение штамповка с разъемом посредине поковки; в этом случае наблюдается увеличенный объем минимального заусенца, характеризуемый размерами  $h$  и  $b''$  (рисунок 6.37, в). Промежуточная величина минимального заусенца относится к штампу с разъемом согласно рисунокб, б; при этом  $b' < b'' < b'''$ .

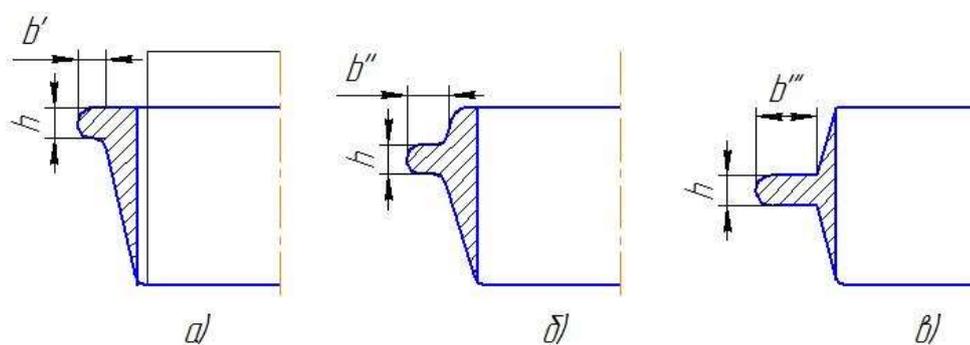


Рисунок 6.35 - Схемы, поясняющие зависимость минимального объема заусенца штампа

На рисунке 6.36 приведены результаты количественного сопоставления потерь металла в заусенец  $V_{з}$  и от напусков  $V_{нап}$  вследствие штамповых уклонов. Данные относятся к круглой поковке, штампуемой из заготовки  $H_0 = D_0 = 100$  мм при 30%-ной высотной деформации, угле уклона  $\alpha = 7^\circ$  и при расположении плоскости разъема по торцу поковки (а) на  $\frac{1}{4}$  (б) и  $\frac{1}{4}$  ее высоты (в). Общие потери на минимальный заусенец и от напусков, принятые для схемы на рисунке 6.36, а за 100%, составляют для схемы на рисунок 6.36, б — 93% и для схемы на рисунке 6.36, в — 87,5%. Потери металла от напусков при этом уменьшаются и составляют соответственно 86; 69 и 55%, а потери на минимальный для каждой схемы заусенец возрастают соответственно в последовательности 14; 24 и 32,5% от общих потерь металла.

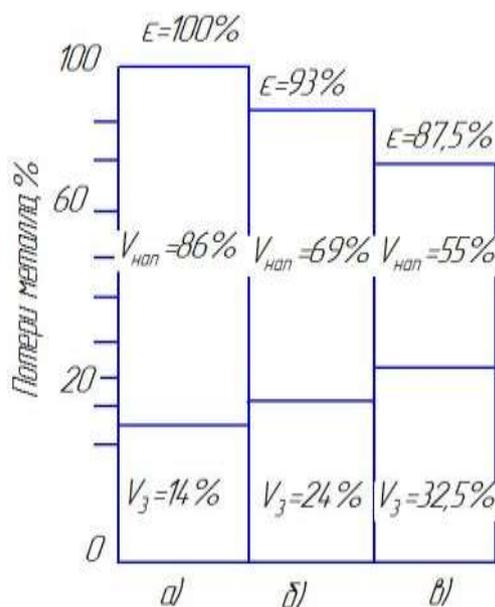


Рисунок 6.36 - Сопоставление потерь металла на заусенцы и с напусками по схемам на рисунке 6.35 (ε – суммарные потери металла) [8]

Фактический объем заусенца значительно больше минимально необходимого и определяется исходя из следующих условий.

1. Колебания объемов исходных заготовок вследствие допусков на прокатку и резку приводят к увеличению объема заусенца на величину  $V_I$ . Например, для цилиндрических заготовок эти колебания составляют

$$V_I = \frac{\pi}{4} (D_{\max}^2 L_{\max} - D_{\min}^2 L_{\min}) ,$$

где  $D$  и  $L$  — соответствуют наибольшим и наименьшим размерам заготовок с учетом допусков на прокатку (по  $D_0$ ) и резку (по  $L_0$ ).

При расчете заготовок из проката нормальной точности, например диаметром  $60 \pm 1$ ;  $90 \pm 1,5$  и  $120 \pm 2,0$  мм, и в случае изменения  $D_0:L_0$  в пределах 1—2 величина  $V_I$  достигает 6—9% от объема заготовок. В среднем на каждую заготовку эти потери металла составят 3—4,5%, что больше потерь металла на окалину. С уменьшением объема заготовок относительная величина колебания их объема увеличивается. С увеличением длины при одновременном уменьшении диаметра заготовки колебания фактического объема вследствие допусков на прокатку и резку также возрастают. Так, например, заготовка

диаметром  $120 \pm 2,0$  мм и длиной  $120 \pm 2,0$  мм имеет средние отклонения по объему около 3%, тогда как равновеликая по объему заготовка диаметром  $90 \pm 1,5$  мм и длиной  $205 \pm 3,0$  мм имеет средние отклонения по объему 4,5%. Величина угара металла колеблется в небольших пределах и приводит к неодинаковому уменьшению объема поступающей в штамп заготовки.

2. Увеличение объема заусенца против минимально необходимого объясняется также неравномерностью его образования. Это может быть вызвано следующим: а) несоответствием профилей заготовки и поковки в плоскости разъема штампа, приводящим к неодинаковому поступлению металла в канавку в разных ее частях по периметру, например при штамповке круглых в плане поковок из квадратных заготовок. Этот вид неравномерности заусенца отсутствует при штамповке в торец поковок типа тел вращения, если цилиндрическую заготовку устанавливают точно в середине ручья; б) при штамповке длинноосных поковок сложной формы заготовка получает в разных частях полости штампа неодинаковую степень деформации по высоте, что обуславливает различные поперечные деформации и, как следствие, неодинаковый заусенец по периметру; в) неравномерным заусенцем, образующимся вследствие неравномерного распределения температуры по длине заготовки; г) неправильной (неточной) установкой круглой заготовки в ручей, приводящей к неравномерному заусенцу при штамповке в торец даже таких простых по форме поковок, как ступицы, фланцы и др.

При неравномерном заусенце размеры минимально необходимого заусенца будут только на отдельных участках периметра, а на остальной его части эти размеры получаются большей величины. Общий объем заусенца при этом возрастает на величину  $V_2$ , которая колеблется от нескольких процентов для простых форм и до десятков процентов (от объема поковки) для сложных форм поковок. В качестве объема  $V_2$  не может быть использован объем  $V_1$ , так как достаточный для этого избыточный объем  $V_u$  имеется не у всех заготовок данной партии.

3. В процессе штамповки полость штампа изнашивается, что приводит к увеличению объема поковок (в пределах допусков). Так как при разделке прутков на заготовки нельзя учесть степень износа штампа к моменту штамповки каждой заготовки, то в объеме всех заготовок содержится дополнительное количество металла  $V_3$ , компенсирующее наибольший износ штампа. Этот дополнительный объем также не может быть заменен избыточным объемом заготовки  $V_1$ , так как у многих заготовок  $V_1 < V_3$ , а у некоторых  $V_1 = 0$ . В среднем величина  $V_3$  составляет 3—5% от объема заготовки.

4. На практике вследствие несовершенной технологии заполнение полости штампа происходит несколько раньше, чем штампы сходятся между собой. При этом на последней стадии штамповки в заусенец вытесняется некоторый объем металла  $V_4$ . При расчете объема заусенца объем  $V_4$  не предусматривается в качестве дополнительного, так как он может быть заменен уже имеющимся в заготовке избыточным металлом. Когда штамп изношен, объем  $V_3$  остается в поковке, и если  $V_1 > 0$ , то  $V_4 \leq V_1$ , так что на последней стадии штамповки в заусенец поступает металл за счет его избытка в заготовке из-за неточности ее размеров. Если штамп выполнен с допусками по нижнему пределу и не изношен, то объем  $V_3$  частично или полностью вытесняется в заусенец. В этом случае, если  $V_1 > 0$ , то  $V_4 \leq (V_1 + V_3)$ . Если же объем  $V_4$  не вытесняется полностью в канавку, то имеет место недоштамповка поковки по высоте, наличие которой, как и других допусков (на смещение штампов, перекося их и т. д.), обычно не вызывает увеличения объема заготовки, но приводит к увеличению объема поковки и соответственно механической обработки. Если объем  $V_4$  очень большой, то для доштамповки поковки требуется затратить много энергии вследствие увеличения числа ударов молота или значительного повышения усилия при штамповке на прессе. При этом износ порогов канавок значительно ускоряется.

5. Увеличение объема заусенца против минимально необходимого происходит также в тех случаях, когда он образуется в процессе штамповки

раньше, чем это предусмотрено в соответствии с основным его назначением. Металл, попадающий преждевременно в магазин, пропадает. Кроме того, этот металл, имеющий объем  $V_5$ , создает повышенное сопротивление нормально вытекающему в канавку металлу и приводит к увеличению расхода энергии на штамповку. Чем ближе форма заготовки к форме поковки, тем при меньшей деформации заполняется ручей, тем ближе к концу процесса штамповки образуется заусенец и тем менее вероятно преждевременное его появление. При тщательном фасонировании заготовки заусенец преждевременно не образуется ( $V_5 = 0$ ) и соответствующий объем его в заготовке не предусматривается. Если форма заготовки, поступающей в окончательный ручей штампа, значительно отличается от формы поковки, то объем  $V_5$  приходится предусматривать в объеме заготовки, так как другим объемом он не может быть компенсирован.

В общем случае фактический объем заусенца

$$V_{\phi} = V_{\min} + V_1 + V_2 + V_3 + V_5.$$

Тщательно отработанный технологический процесс штамповки может быть практически осуществлен при  $V_2 = 0$  и  $V_5 = 0$ ; тогда

$$V_{\phi} = V_{\min} + V_1 + V_3.$$

На практике величина заусенца иногда составляет десятки процентов от массы поковок вместо нескольких процентов, достаточных для образования минимально необходимого заусенца.

При пробной штамповке заготовок разного объема и с различным соотношением размеров можно установить достаточен ли объем заусенца. При малом объеме заготовок определенный объем металла вытекает в канавку для заусенца, в то время как полость ручья оказывается незаполненной. При слишком большом объеме заготовок приходится вытеснять в канавку (кроме необходимого) большое количество избыточного металла, после того как полость ручья уже целиком заполнена (объем  $V_4$ ). В общем случае объем

заусенца можно разделить на две части: полезную (объем  $V_{min}$ ) и бесполезную или даже вредную ( $V_{ф} - V_{min}$ ).

Рассмотрение стадий штамповки и условий превышения объема фактических заусенцев по сравнению с их минимально необходимым объемом имеет не только познавательный интерес. Соответствующим анализом возможно установить источники экономии металла и рационализации штамповки в открытых штампах. Как следует из рисунка 6.10, чем меньше масса поковки, тем больше доля объема заготовки  $\Delta V$ , расходуемая на заусенец, причем она относительно увеличивается для поковок сложных форм, штампуемых чаще перпендикулярно оси заготовки (кривая 2), по сравнению с поковками простой формы, штампуемых обычно в торец (кривая 1).

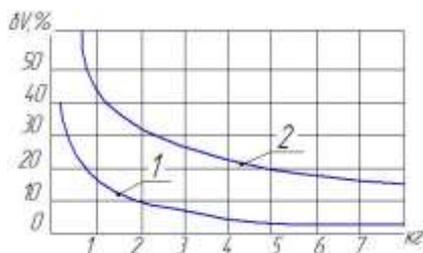
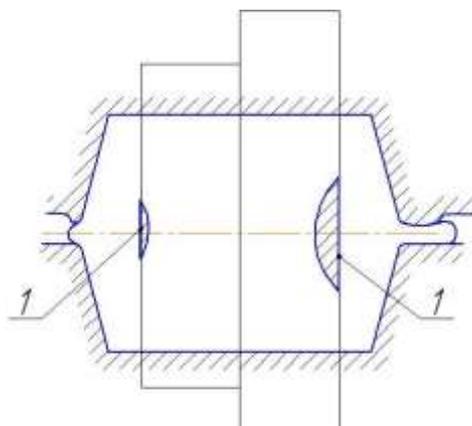


Рисунок 6.37 - Потери металла на заусенцы в зависимости от массы поковок простой (1) и сложной (2) форм

Идеализированная схема штамповки в открытых штампах отличается от реальной отсутствием четвертой бесполезной стадии штамповки (доштамповки) и образованием минимального заусенца в пределах порога заусенечной канавки (рисунок 6.38, левая часть).



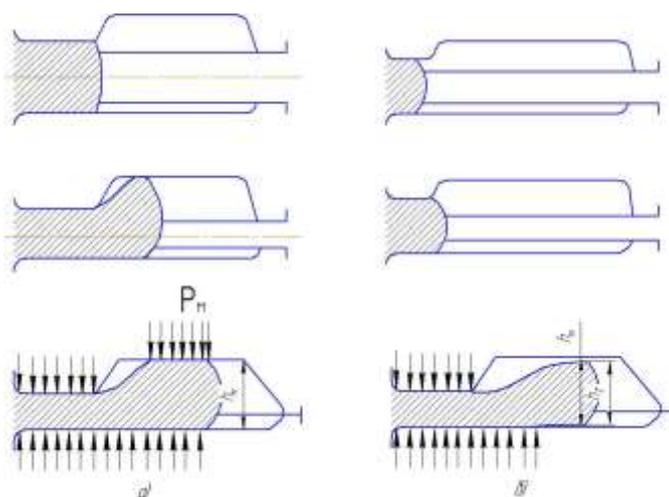
1 – объем металла, поступающий в заусенечную канавку; заготовка показана тонкой линией

Рисунок 6.38 - Штамповка с минимальным (левая часть) и увеличенным (правая часть) объемами заусенцев

При этом штамповка сопровождается: осадкой (обжатием) заготовки до ее соприкосновения с боковыми стенками полости, дальнейшей деформацией заготовки при ее подпоре боковыми стенками полости без образования заусенца и, наконец, деформацией затекания металла в углы полости при одновременном образовании заусенца, высота которого уменьшается, а ширина увеличивается в пределах размеров порога канавки к концу процесса штамповки.

В реальном процессе по ряду причин (низкая точность объема заготовки, недостаточная предварительная фасонировка заготовки, большой допустимый износ ручья и т. д.) штампуют с увеличенным заусенцем (рисунок 9, правая часть) и с доштамповкой (в четвертой стадии). Однако, чем меньше стадия доштамповки, тем совершеннее процесс и тем лучше он отработан. Обычно стадия доштамповки не превышает нескольких миллиметров.

На рисунке 10 для иллюстрации эффекта, получаемого от своевременного образования заусенца, приведены две схемы. При нерациональном фасонировании металл вытекает в заусенец преждевременно (рисунок 6.39, а), что увеличивает его объем (десятки процентов от объема поковки). В этом случае часть заусенца, попадающая в магазин, обжимается (сила  $P_m$ ), что приводит к увеличению работы деформации. При рациональном фасонировании (рисунок 6.39, б) заусенец появляется ближе к концу штамповки, при этом его объем не превышает 5—10% от объема поковки. Тщательным фасонированием можно добиться еще меньшего объема заусенца (малозаусенечная штамповка). При нормальной схеме образования заусенца в момент поступления металла в магазин толщина его должна быть равна или меньше высоты магазина в сомкнутом положении штампа, т. е.  $hT \leq hm$ .



а – с обжатием в магазине; б – без обжатия в магазине канавки

Рисунок 6.39 - Образование заусенца

Дальнейшее перемещение заусенца в магазине сопровождается увеличением его наружного периметра и уменьшением его толщины; поэтому при  $hT = hm$  заусенец не обжимается горизонтальными плоскостями магазина. Высоту магазина следует принимать наибольшей исходя из стойкости кромки порога канавки. Использование обжатия заусенца в магазине для увеличения тормозящего действия заусенца нерационально. С этой целью уменьшают толщину заусенца или увеличивают ширину порога канавки, что не связано с увеличением объема заусенца. Вследствие того, что внешняя сила, деформирующая заусенец в перемычке, действует на меньшую площадь, чем реакция этой силы со стороны нижнего штампа (рисунок 6.39, б), заусенец в процессе штамповки искривляется.

Перечислим возможности экономии металла на заусенцы. Средние потери металла на заусенец составляют, например, в автотракторной промышленности 16—18% от массы металла, используемого на поковки. По всей промышленности России отходы в заусенцы составляют сотни тысяч тонн металла. Несколько процентов от всей штампуемой стали можно сэкономить, если сократить избыток металла  $V_I$  в заготовке за счет повышения точности ее объема.

Для этого необходимо применять способы безотходной и точной разделки прутков на заготовки с учетом допусков при прокатке. Разделка заготовок на установке с ограничителем, действующим от вычислителя объема, обеспечивает получение достаточно точных по объему заготовок из проката обычной точности. Такую разделку прутков, как правило, рекомендуют при точной штамповке. Однако точная дозировка металла не менее эффективна и при штамповке обычной точности.

Сокращения объема металла на заусенцы можно добиться уменьшением объема металла  $V_3$ , компенсирующего износ штампов. Для этого объем, характеризующий износ штампа, делится на несколько частей, соответственно которым применяют заготовки с различной величиной избытка металла — вначале небольшой, а затем все возрастающей. Экономии металла можно получить уменьшением избытка металла  $V_2$ , вызываемого неравномерностью образования заусенца, за счет использования канавок с переменной шириной порога  $b$  и лучшего фасонирования заготовок. В процессе штамповки нельзя уменьшать объем заусенца, так как это приводит к утяжелению поковок и к увеличению объема их механической обработки. Всякое уменьшение объема заусенца должно сопровождаться уменьшением объема заготовки, только в этом случае можно получить экономию металла.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Запустите Deform-2D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой `newproblem` , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей задачи (фамилия\_группа\_4) и затем нажмите .

## Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов.

Выделите в дереве объектов BottomDie, это будет нижняя часть молота.

Нажмите , выберите закладку редактировать (Edit). Появится пустая таблица.

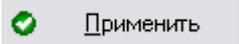
Введите указанные ниже XYR координаты в таблицу 6.3 и нажмите кнопку .

Таблица 6.3 - Координаты для построения нижней части молота

x	y	R
0	-85	0
210	-85	0
210	0	0
190	0	0
187	-2	7
108	-2	7
105	-14	7
80	-14	7
75	-9	7
45	-14	7
30	-14	7
25	0	7
0	0	0

Щелкните  чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Окно проверки геометрии показано на рисунке 6.40.

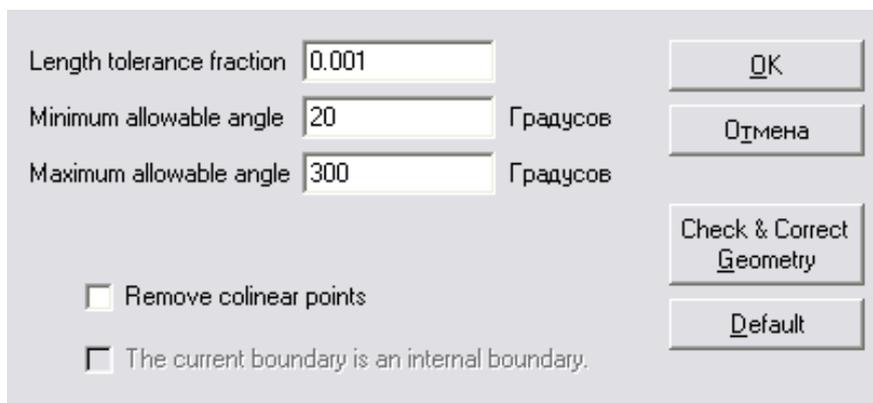


Рисунок 6.40 - Окно проверки геометрии

Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку



Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

Выделите в дереве объектов Top Die, это будет верхняя часть молота.

Ввод геометрии осуществляется также как и ранее. Координаты для построения указаны в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Координаты для построения верхней части молота

x	y	R
14	14	0
25	14	0
30	40	7
45	40	7
50	9	7
75	9	7
80	14	7
105	14	7
108	0,5	7
146	0,5	5
148	3	0
148	3	0

150	6	5
188	6	7
190	0,5	0
210	0	0
210	84	0
15	84	0

Вводим геометрию заготовки. Координаты указаны в таблице 6.5.

Таблица 6.5 - Координаты для построения заготовки

x	y	R
0	0	0
45	0	5
45	150	5
0	150	0

Проверьте геометрию объектов.

### Позиционирование

Откройте окно «позиционирование объектов» нажав кнопку , и используйте перемещение интерференцией верхней части молота кнопкой



Интерференция, относительно заготовки (рисунок 6.41).

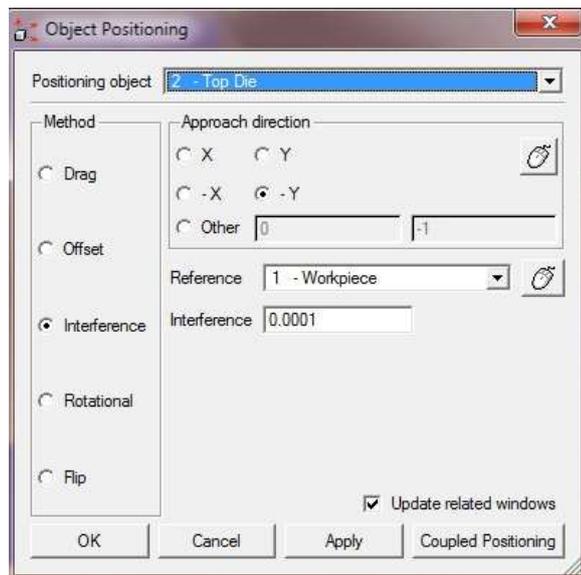
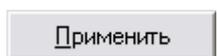


Рисунок 6.41 - Окно «Позиционирование объектов»

Нажмите



Аналогичным образом сместите верхнюю часть молота, относительно заготовки.

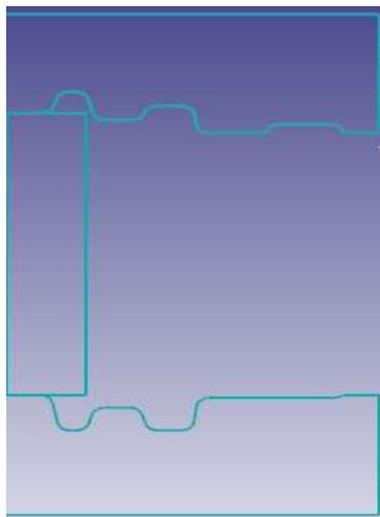


Рисунок 6.42 - Позиционирование объектов

### Настройка задачи

Нажмите кнопку  чтобы открыть окно Настройки задачи, изображенное на рисунке 6.43.

Нажмите  Основное и убедитесь, что единицы измерения установлены в СИ, а режим расчета учитывает деформирование и теплоотдачу.

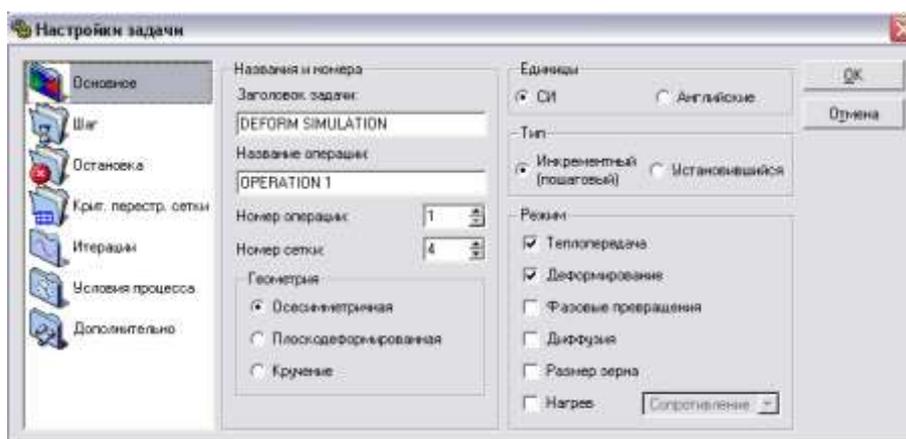
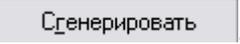


Рисунок 6.43 - Окно «Настройки задачи»

Нажмите  для просмотра управления временными шагами. Убедитесь, что номер начального шага установлен как -1. Отрицательный знак говорит о том, что это шаг, записанный препроцессором (шаги решения записанные в базу данных в процессе расчета будут положительны). Для определения величины шага по перемещению необходимо произвести замер наименьшего размера сетки конечных элементов (для определения этого значения может быть использован инструмент Измерить (Measure)) и разделить его на три – это значение будет величиной шага. Для того, чтобы задать число шагов расчета нужно перемещение главного инструмента разделить на размер шага. Давайте установим размер шага как 0,43 мм/шаг. Таким образом, установите число шагов расчета 279. Установите приращение шага при сохранении 10 («через сколько шагов сохранять»). Каждый десятый шаг решения будет записан в базу данных. Установите главный инструмент Top Die. Обычно главным инструментом является тот, который перемещается при расчете, и он используется для контроля шага и остановки. Нажмите кнопку  когда закончите, чтобы закрыть окно управления расчётом.

### Создание сетки конечных элементов

Для создания сетки разбиения заготовки, выберите в дереве объектов

заготовку (Workpiece) и нажмите  Сетка, выберите количество конечных элементов 700 и нажмите .

Аналогичным образом задайте сетку для верхней части и нижней части молота по 1000 элементов соответственно (рисунок 6.44).

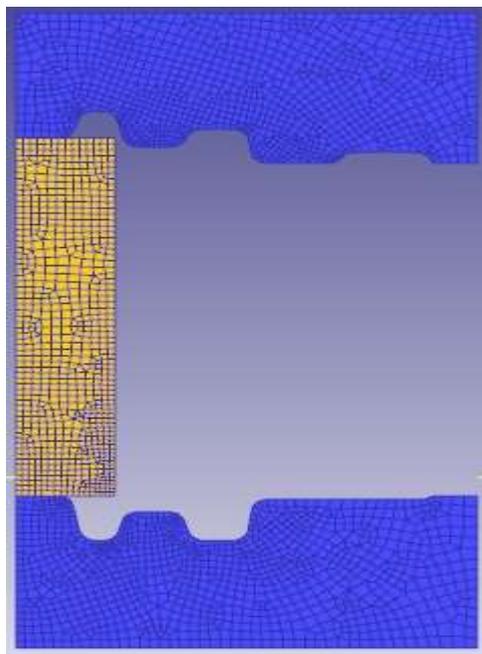


Рисунок 6.44 -Создание сетки конечных элементов

### Задание материала заготовки

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку



, откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 6.45.

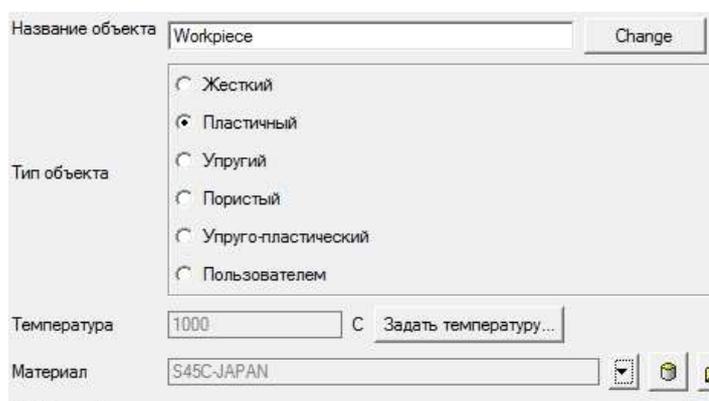


Рисунок 6.45 - Основное окно объекта

Убедитесь, что для заготовки установлены свойства пластического объекта показанное на рисунке 6.45.

Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку



откроется окно «материал» показанное на рисунке 6.46.

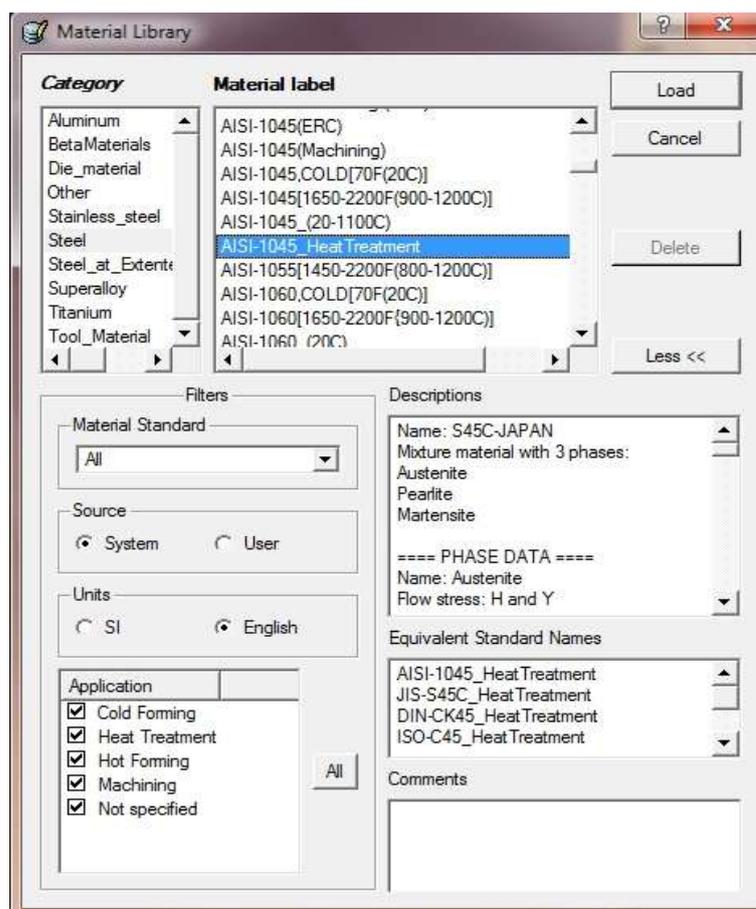


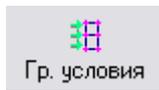
Рисунок 6.46 - Окно «Материал»

В том Steel выберите AISI-1045\_Heat Treatment (сталь 45) и задайте материал кнопкой  Задание материала.

Для инструмента задайте сталь AISI-H-13 – 3X2B8Ф.

### Задание граничных условий

Для точного моделирования процесса, как осесимметричный, вы должны закрепить узлы заготовки по средней линии. Выберите её, и нажмите кнопку



, выберите настройку скорость (Velocity). Чтобы закрепить узлы по средней линии нужно установить  $V_x$  скорость узлов средней линии в ноль. Убедитесь, что направление установлено в X, и что поле содержит скорость 0.

Граничные условия, точно так же как геометрия, должны всегда определяться в направлении против часовой стрелки. Чтобы определить узлы на средней линии, сначала щёлкните на узле в верхнем левом углу, и затем щёлкните на узле в нижнем левом углу. Когда узлы выбраны нажмите кнопку  для применения граничного условия.

Граничное условие X, Fixed появится в списке «Тип гр. Условий», и затем выбранные, центральные узлы будут подсвечены в окне Экран (Display), изображенном на рисунке 6.47.

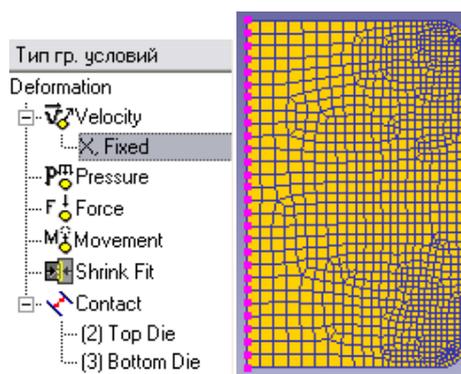


Рисунок 6.47 - Окно «Граничные условия»

Также необходимо задать граничное условие теплопередачи (см. рисунок 10), для этого в термальных взаимодействиях выделите Heat exchange with environment, и укажите область граничного условия (левый нижний и затем левый верхний углы). Нажмите  .

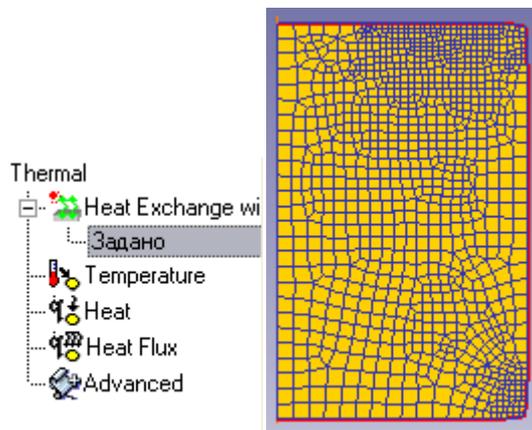
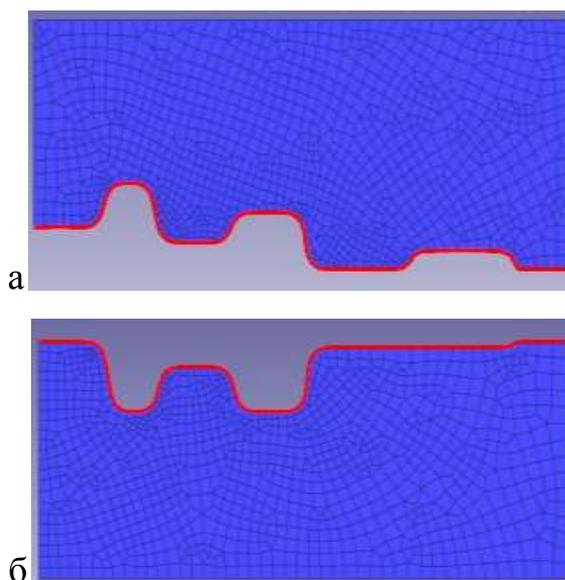


Рисунок 6.48 - Граничное условие при теплопередаче

Таким же образом задайте температурные граничные условия для инструментов. Температурные граничные условия представлены на рисунке 6.49.

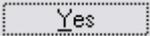


а – верхняя часть штампа; б – нижняя часть штампа

Рисунок 6.49 - Температурные граничные условия

### Назначение связи между объектами

Для определения связи между объектами нажмите кнопку . Так как никакие отношения в настоящее время не определены, появится сообщение, спрашивающее, хотите ли вы, чтобы система добавила отношения по умолчанию за вас.

Нажмите кнопку 

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными двумя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется между двумя жёсткими инструментами. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как Подчинённый объект.

Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений.

В секции трения экрана, есть выпадающее меню, показанное на рисунке 6.50, которое позволяет пользователю выбирать соответствующее условие трения обычных процессов деформирования. Выберите коэффициент трения 0.15.

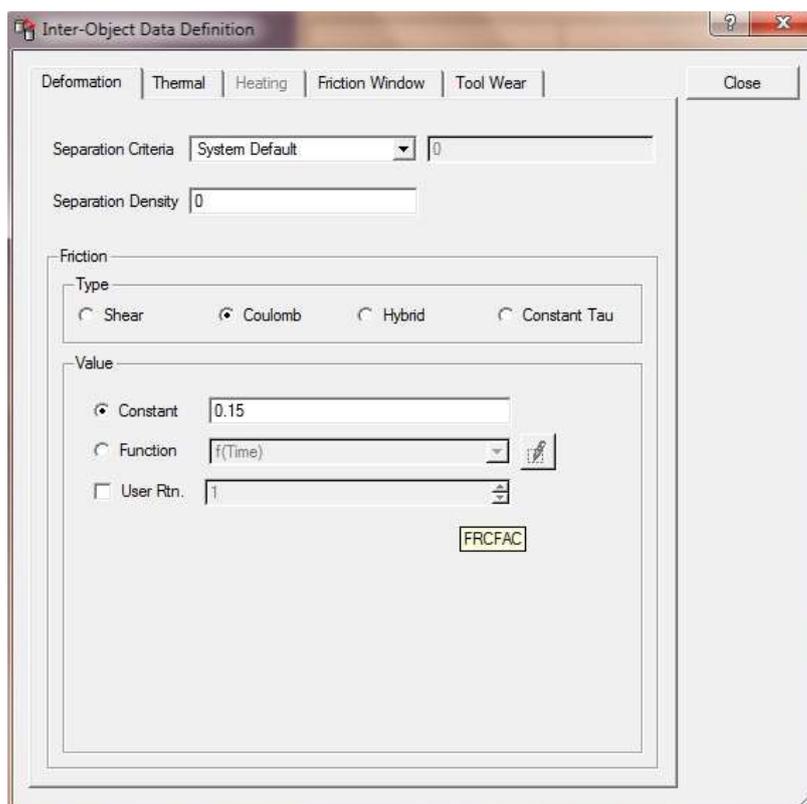


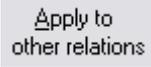
Рисунок 6.50 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Теперь задайте закон трения по Зибелю (Constant Tau).

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна INTER-OBJECT.

Также необходимо задать температурный коэффициент, во вкладке температурных взаимоотношений выберите коэффициент теплоотдачи постоянным, а в выпадающем меню выберите Forming, тогда система автоматически задаст коэффициент 11.

Теперь, когда отношения между верхним инструментом и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой и нижним инструментом.

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, кнопкой  можно скопировать свойства первого отношения во все остальные. После этого, оба отношения будут иметь коэффициент трения 0,15, а температурный коэффициент 11.

Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом (подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом, переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы находящиеся на линии контакта не попадут в контакт и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан в окне Экран как цветные точки на верхней и нижней

поверхностях заготовки. Взаимодействие объектов показано на рисунке 6.51.

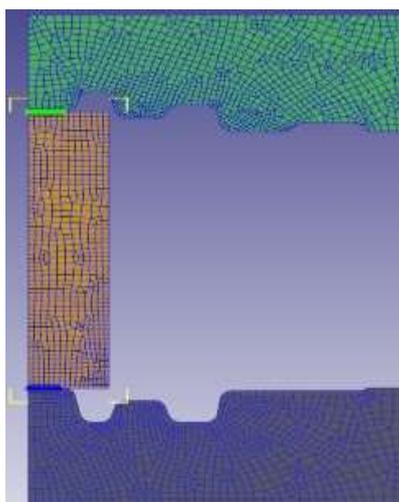


Рисунок 6.51 - Окно взаимодействия объектов

### Установка параметров расчета

Выберите верхнюю часть молота в дереве объектов и нажмите на кнопку



Движение . В появившемся окне (рисунок 6.52) установите направление движения вниз (-Y), и постоянную скорость 4000 мм/сек.

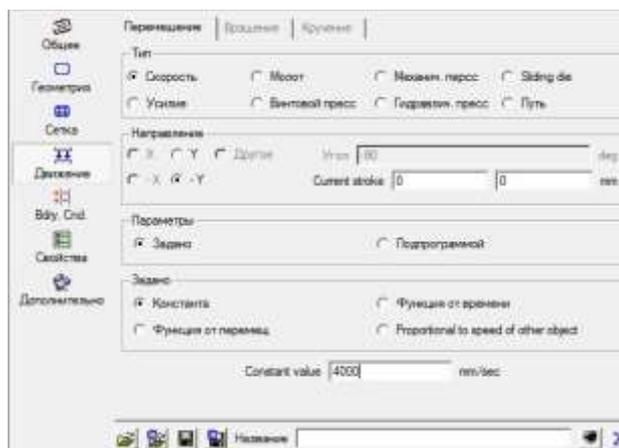


Рисунок 6.52 - Окно «движение»

Таким образом мы задаём направление и скорость движения инструмента.

## Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных, нажав кнопку , нажмите кнопку **Проверить**, когда появится сообщение **База данных может быть сгенерирована**, нажмите кнопку **Сгенерировать** и начнется генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на рисунке 6.53.

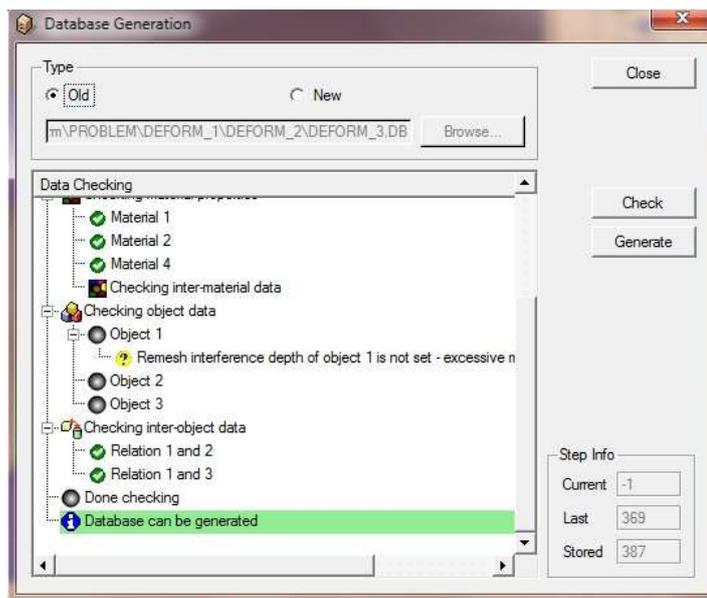


Рисунок 6.53 - Окно генерации базы данных

При появлении сообщения  **Запись базы данных завершена**, можете закрыть Deform2D – Preprocessor.

## Запуск расчета

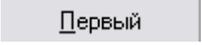
Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой **Старт** или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
*****Message*****  
Simulation is completed and stopped at the user specified time step .
```

После расчета выделяем свой Keyword файл в дереве объектов, и запускаем препроцессор кнопкой **DEFORM-2D Постпроцессор** в правом верхнем углу окна.

Система предложит вам выбрать, с какого шага процесса вы начнете

работу. Выберите шаг -1, или нажмите кнопку .

Аналогичные действия проделайте с заготовками размером  $W=90$ ,  $H=160$ ;  $H=330$ .

Остальные условия не изменились, поэтому можно приступить к проверке базы данных. Однако перед генерацией необходимо создать новое имя, отличное от старого, для этого в окне генерации установите тип базы данных как «новая» (рисунок 6.54), и введите новое название для неё в адресной строке.

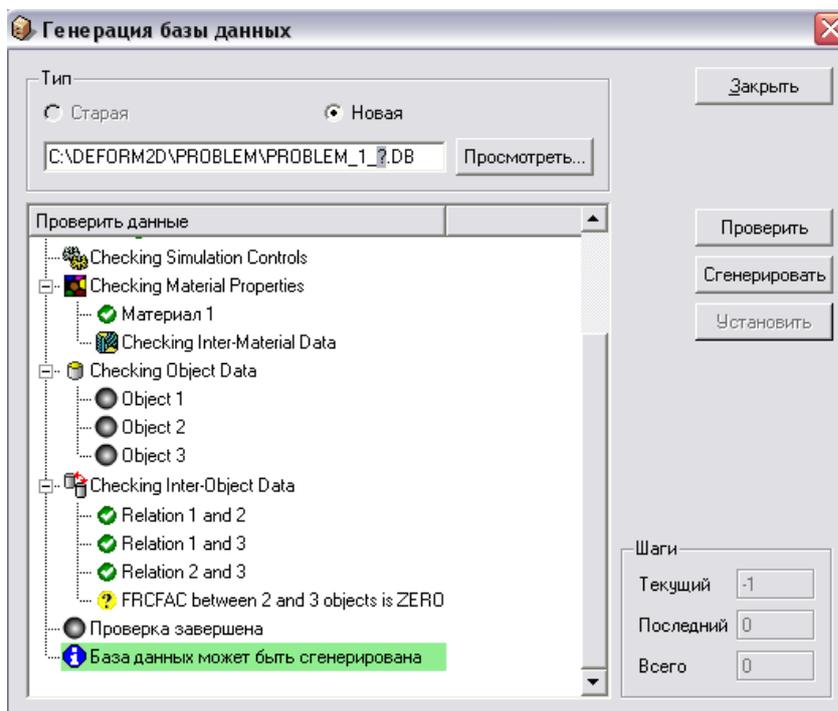


Рисунок 6.54 - Окно генерации новой базы данных

Сгенерируйте базу данных и запустите расчёт.

После расчета выделяем свою первую базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой [DEFORM-2D Постпроцессор](#) в правом нижнем углу окна. Аналогично запустите вторую базу данных.

### 6.3 Анализ результатов.

Стадии процесса штамповки показаны на рисунке 6.55.

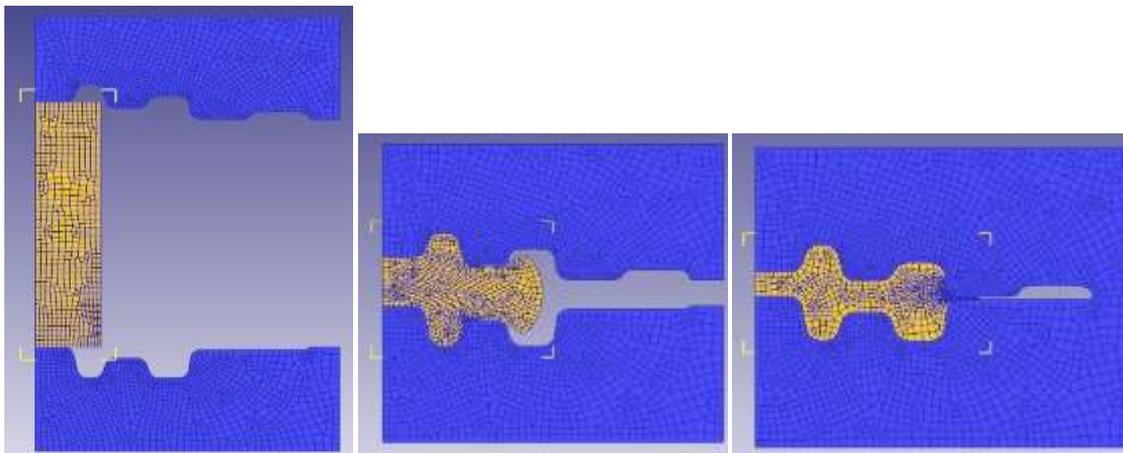
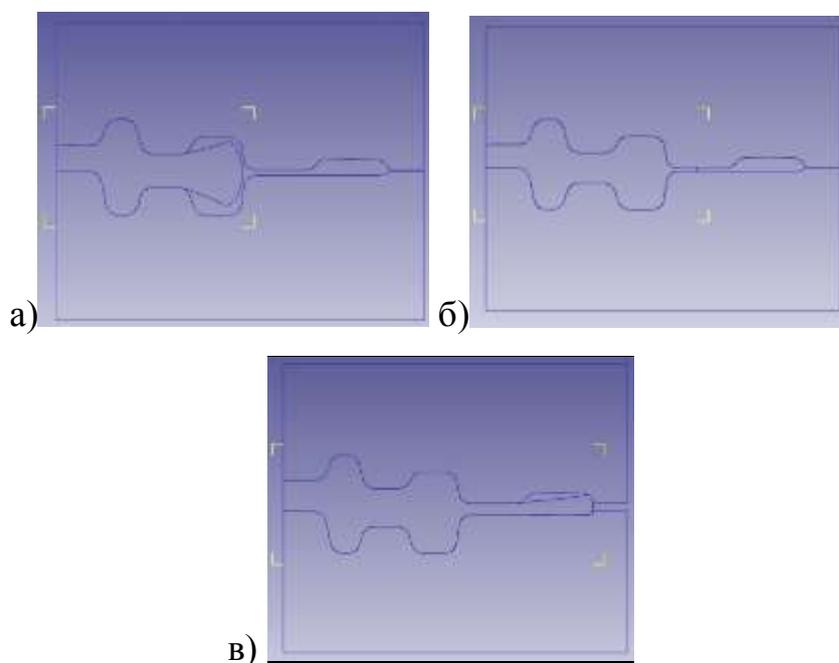


Рисунок 6.55 - Стадии процесса штамповки

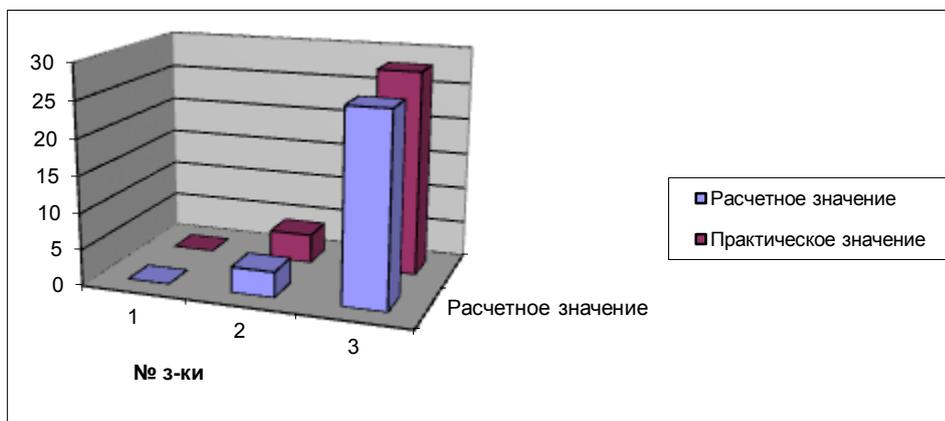
Влияние размера заготовки на заполняемость ручья штампа показаны на рисунке 6.56.



а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

Рисунок 6.56 – Влияние размера заготовки на заполняемость штампа

Диаграмма зависимости количества облоя от высоты заготовки показана на рисунке 6.57.



1 – 150 мм; 2 – 160 мм; 3 – 330 мм

Рисунок 6.57 - Диаграмма зависимости количества облоя, %, от высоты заготовки

Таблица 6.6 - Зависимость количества облоя, %, от высоты заготовки:

1 – 150 мм; 2 – 160 мм; 3 – 330 мм

№ з-ки	Расчетное значение	Практическое значение
1	0	0
2	3,45	4
3	26,1	28

В таблице 6.6 указаны точные значения отходов металла в облой, %.

Постройте индикаторную диаграмму процесса.

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке 29. Выберите только верхний инструмент Top Die.

По оси X (X – Axis) откладывается перемещение верхней части молота (Stroke), а по оси Y (Y – Axis) усилие (Y - Load), необходимое для деформации заготовки. Нажмите .

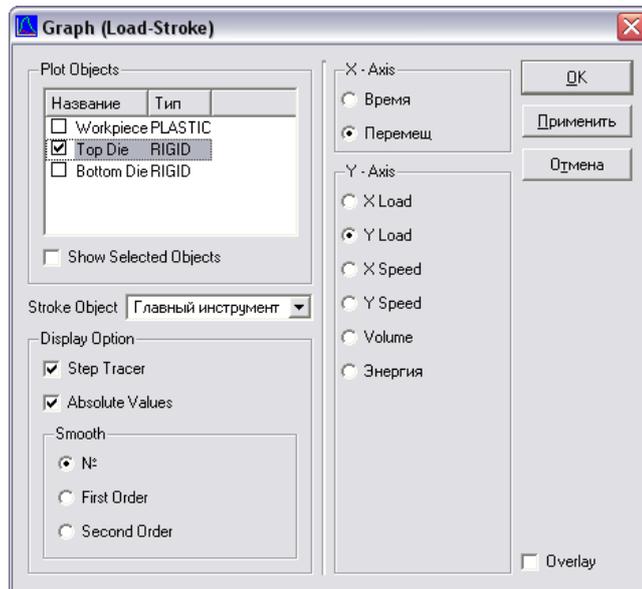
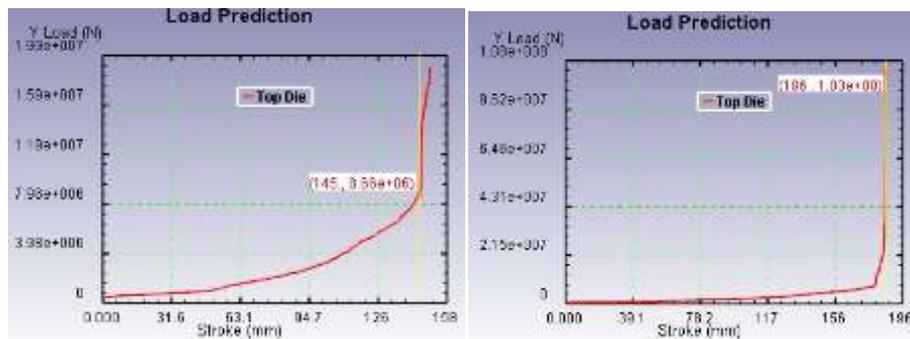


Рисунок 6.58 - Окно построения графиков «Graph(Load-Stroke)»

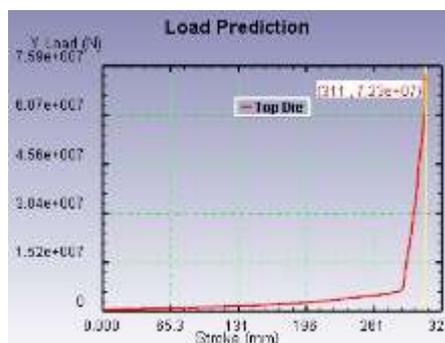
В основном окне появится индикаторная диаграмма.

Индикаторные диаграммы представлены на рисунке 6.59.



а

б

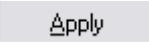
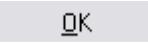


в

а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

Рисунок 6.59 - Индикаторные диаграммы

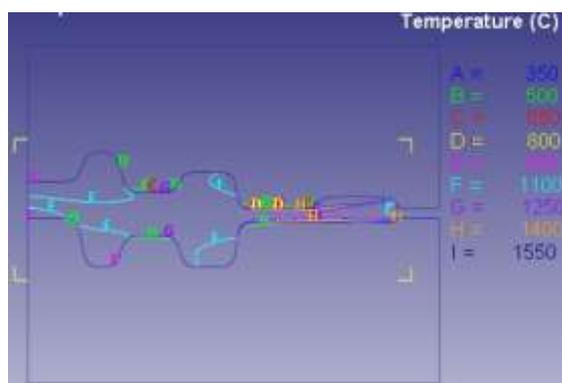
Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого в дереве объектов наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide graph), таким же способом его можно опять вывести напоказ (show graph). Аналогичным образом можно скрывать другие объекты графики.

Чтобы оценить влияние температуры металла в процессе деформации, необходимо построить температурные диаграммы для обоих случаев. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и выберите раздел Температурных зависимостей (Temperature). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив линейного контура (Linecontour). Нажмите  и . Эпюры распределения температурных полей показаны на рисунке 6.60.



а

б



в

а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

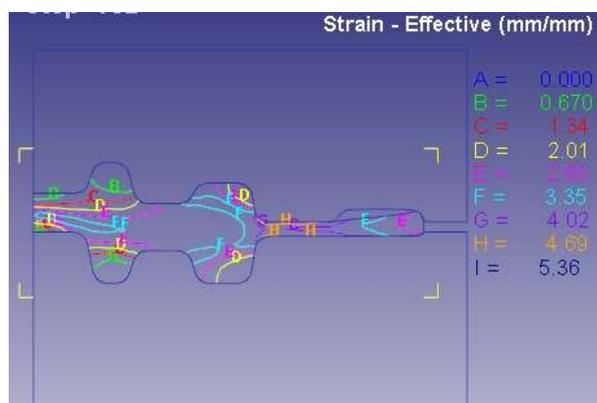
Рисунок 6.60 - Эпюры распределения температурных полей

Для определения качественного изменения интенсивности деформации вы должны построить эпюры интенсивности деформации (рисунок 6.61). Откройте окно построения диаграмм, и в разделе Деформации (Strain) поставьте галочку напротив эффективных деформаций (Effective). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив линейного контура (Line contour). Нажмите **Apply** и **OK**. Посмотрите поэтапно как накапливается деформация в заготовке.



а

б

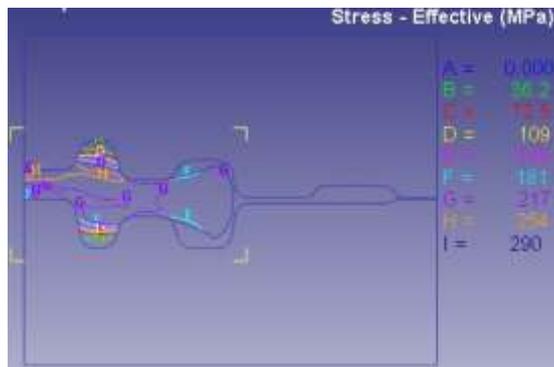


в

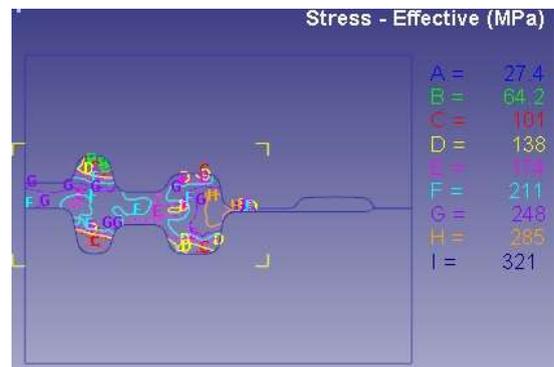
а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

Рисунок 6.61 - Эпюры распределения интенсивности деформаций

Аналогично построению эпюр интенсивности деформаций, постройте эпюры для интенсивности напряжений (Stress – Effective). Эпюры интенсивности напряжений представлены на рисунке 6.62.



а



б



в

а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

Рисунок 6.62 - Эпюры распределения интенсивности напряжений

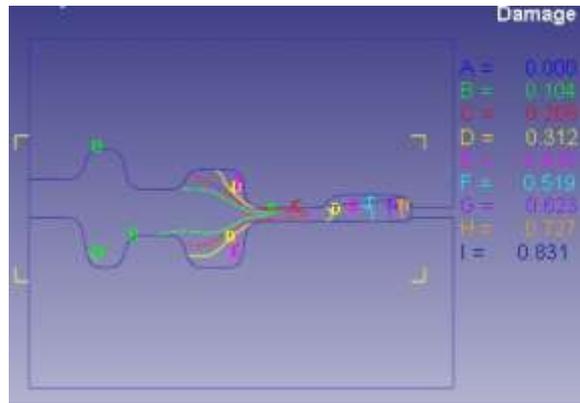
Постройте диаграммы, показывающие области возможного разрушения изделия. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и выберите раздел Разрушение (Damage). Нажмите  и . Диаграммы областей возможного разрушения показаны на рисунке 6.63.



а



б

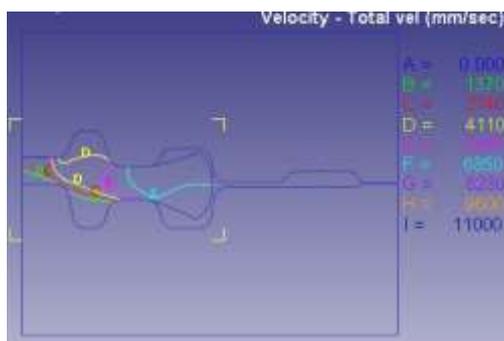


В

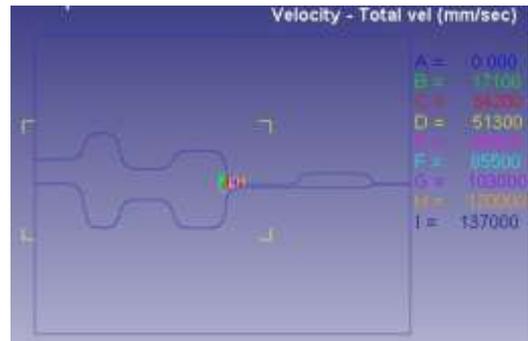
а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

Рисунок 6.63 - Диаграмма областей возможного разрушения

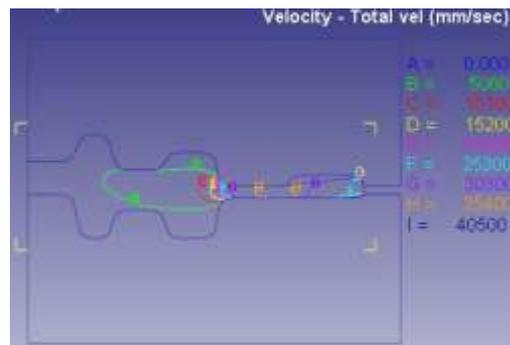
Поля распределения скоростей показаны на рисунке 6.64.



а



б



В

а – 150 мм; б – 160 мм; в – 330 мм

Рисунок 6.64 - Поля распределения скоростей

На рисунке 6.65 показано 3D – изображение штампованной заготовки.



Рисунок 6.65 - 3D - изображение

### **Содержание отчёта**

1. Стадии процесса открытой штамповки.
2. Влияние размера заготовки на заполняемость ручья штампа.
3. Индикаторная диаграмма.
4. Эпюры распределения температурных полей
5. Поле распределения скоростей.
6. Распределение интенсивности деформаций.
7. Распределение интенсивностей напряжений.
8. Диаграмма областей возможного разрушения.
9. Анализ графических результатов.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем сущность процесса открытой штамповки?
2. Для чего нужны штамповочные уклоны?
3. Назначение заусенечных канавок.
4. Какова роль смазки в открытой штамповке? Как целесообразно ее применять?
5. Как выбрать размеры заготовки?
6. Как задать геометрию инструмента?
7. Как задаётся контакт между инструментом и заготовкой?
8. Для чего используют координатные сетки?
9. Какой закон трения используется в расчете процесса?
10. Как задать граничные условия?

11. Как задать перемещение верхнего инструмента?

### 6.3 Штамповка в открытых и закрытых штампах

Цель работы: компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе штамповки в открытых и закрытых штампах цилиндрической заготовки из стали 45 и привитие практических навыков работы в средах твердотельного моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-2D.

#### Краткие теоретические сведения

Процесс штамповки заключается в деформировании металла, находящегося в пластическом, состоянии между двумя штампами; в результате принудительного истечения металл заполняет полости штампов определенной формы.

При штамповке в открытых штампах (рисунок 6.6б) плоскость их разъема конструируется таким образом, что ручей штампа в течение всего процесса штамповки имеет открытую полость, из которой вытекает металл и образует облой переменной толщины. Заусенец в этом процессе играет двойную роль: затрудняет течение металла из полости штампа через кольцевую поверхность высотой  $h$  и, поглощая все излишки металла в заготовке, способствует получению поковок постоянных размеров.

Величина зазора между штампами — толщина мостика заусенца — технологически связана с протеканием всего процесса штамповки; определяет расход энергии на штамповку, мощность агрегата (усилие штамповки), качество поковки и стойкость штампов.

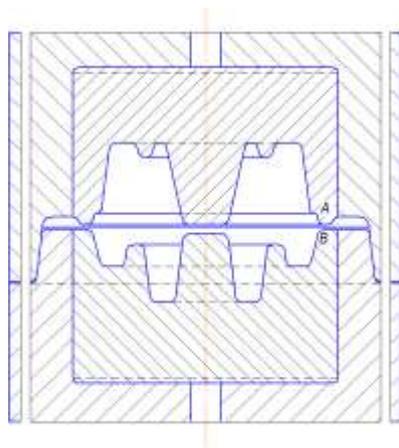


Рисунок 6.66 – Открытый штамп для штамповки шестерни

Конструкция закрытых штампов иная. Плоскость разъема штампов выбирается так, чтобы полость штампа в течение всего процесса штамповки оставалась закрытой. Конструктивное оформление штампов при этом может быть различным. Так, на рисунке 6.67 представлена конструкция штампа для штамповки поковок, представляющих собой тела вращения. Замыкание полости штампа при этом осуществляется кольцевым замком верхнего штампа; нижний штамп оформляет нижнюю часть поковки и служит направляющей для верхнего штампа.

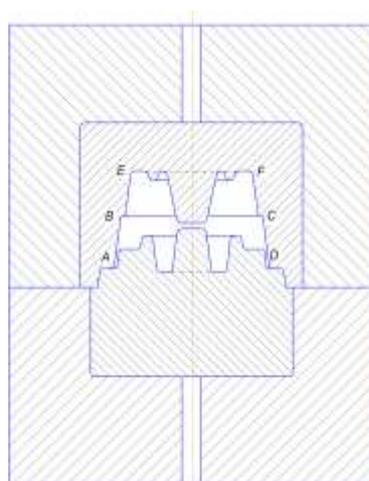


Рисунок 6.67 – Закрытый штамп для штамповки шестерни

Истечение металла из полостей закрытых штампов исключено. Образующийся по линии разъема штампов торцовый заусенец является результатом необходимости иметь некоторый зазор между верхним и нижним

штампами при их смыкании во избежание поломок и больших потерь на трение. Величина этого зазора определяется конструкцией штампов и механическими характеристиками машины, на которой производится штамповка. В этом случае заусенец не является технологически неизбежным, а представляет собой отход, величина которого должна быть сведена до минимума.

Для того чтобы произвести сравнительный анализ процессов штамповки в открытых и закрытых штампах, установить черты общие для этих процессов, выявить различия между ними, установить преимущества и недостатки каждого из них, рассмотрим на примере штамповки простейшей детали последовательные стадии протекания этих процессов [63].

Интерес в этом случае представит деталь, штампуемая выдавливанием в отличие от деталей, штампуемых осаживанием или расплющиванием. Такой деталью может служить кольцо подшипника или кольцевая втулка. Соотношение в размерах поковки при этом может быть различным.

При штамповке кольцевых деталей, как и в большинстве процессов штамповки, связанных с заполнением формы штампа выдавливанием, могут быть выделены четыре последовательные стадии (рисунок 6.68).

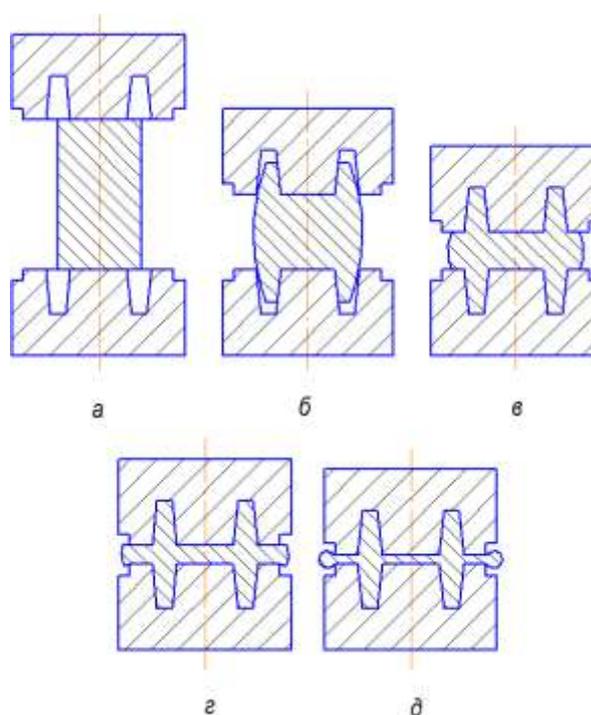


Рисунок 6.68 – Стадии процесса штамповки кольца в открытом штампе

Первая стадия процесса — открытая прошивка начинается с момента соприкосновения центральных выступов штампа (прошивней) с заготовкой (рисунок 6.68, а). Под воздействием прошивней происходит открытая двусторонняя прошивка. Заготовка принимает бочкообразную форму и, увеличиваясь в диаметре, приходит в соприкосновение с наружными стенками полости штампа (рисунок 6.68, б). На этом первая стадия процесса заканчивается.

Во второй стадии процесса происходит вытекание металла на мостик облойной канавки. Характер деформирования заготовки изменяется. Боковое давление, создаваемое обломом, затрудняет течение металла в направлении диаметра и создает более благоприятные условия для течения металла в направлении высоты полости. Вторая стадия заканчивается в момент соприкосновения металла поковки с дном полости штампов. Незаполненными остаются лишь узкие круговые пояски по радиусам переходов стенок штампа в дно (рисунок 6.68, в).

Третья стадия процесса заканчивается в момент полного, отчетливого заполнения полости штампов (рисунок 6.68, г). Процесс штамповки на этом может быть закончен, если высота поковки  $h_n$  будет соответствовать требуемой по чертежу. Если же высота поковки превышает заданную по чертежу, то необходима еще четвертая стадия процесса — доштамповка, то есть доведение высоты поковки до требуемой (рисунок 6.68, д). Это может быть достигнуто только выдавливанием избытка металла в облой, что потребует дополнительной работы молота или прессы, часто во много раз превышающей работу, затрачиваемую на заполнение полости штампа.

Понятно, что уменьшение удельного веса четвертой стадии в процессе штамповки является желательным, так как при этом уменьшается расход металла, энергии, износ штампов и повышается производительность труда.

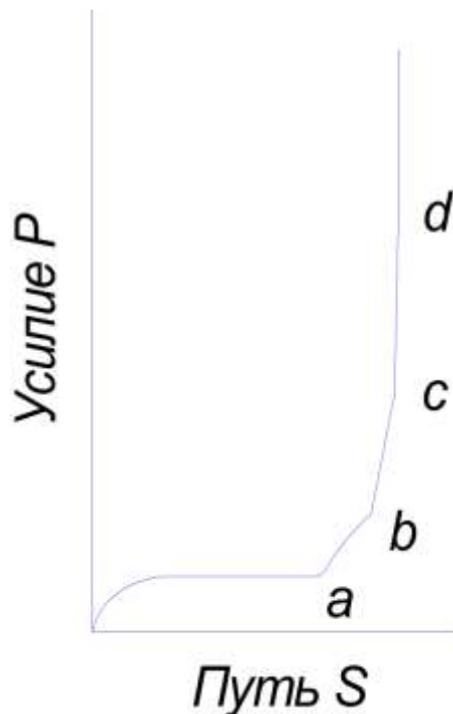


Рисунок 6.69 – График усилий при штамповке кольцевых поковок в открытом штампе

На рисунке 6.69 приведен график усилий при штамповке кольцевых поковок в открытом штампе в координатах усилие — путь, снятый при штамповке поковок под гидравлическим прессом. При рассмотрении кривых усилий штамповки кольцевых поковок были установлены закономерно повторяющиеся переломы кривых в определенных точках *a*, *b*, *c*, *d*. В этих точках резко изменяются силовые условия деформации при переходе из одной стадии процесса в другую. В точке *a* открытая прошивка переходит в объемную штамповку с облоем, точка *b* соответствует моменту касания металлом дна полости штампов, точка *d* — отчетливому заполнению полости штампов металлом. Слабо выраженная точка *c* - соответствует заполнению полости штампа металлом, за исключением фасок — узких круговых поясков по радиусам переходов стенок штампа в дно.

При штамповке кольцевых поковок в закрытых штампах можно выделить три последовательные стадии процесса (рисунок 6.70).

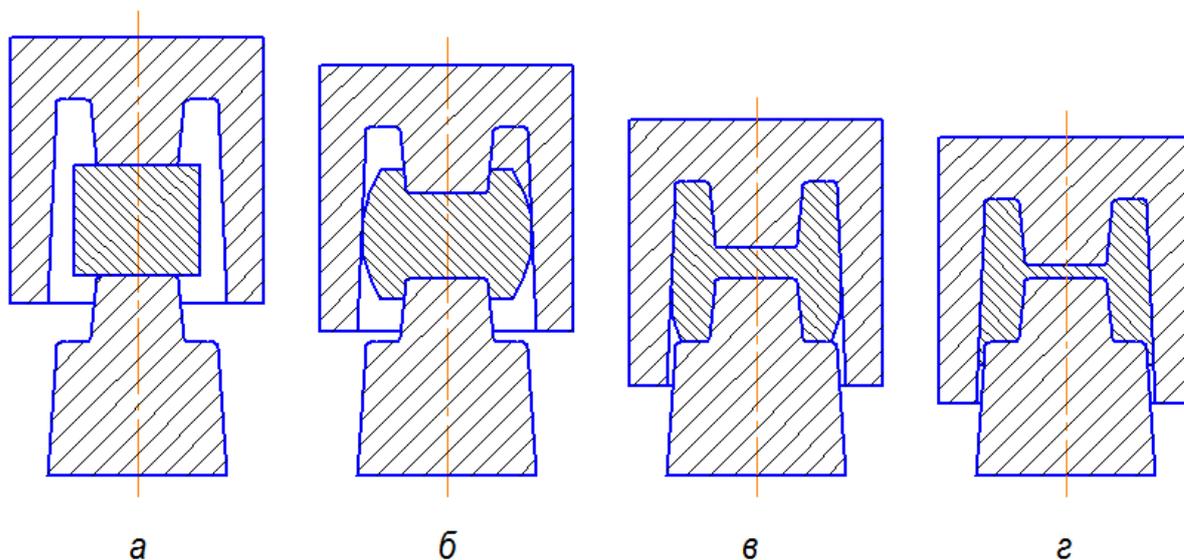


Рисунок 6.70 – Стадии процесса штамповки кольца в закрытом штампе

В первой стадии (рисунок 6.70, *а*) происходит открытая двусторонняя прошивка заготовки. Процесс закрытой штамповки в этой стадии аналогичен таковому при открытой штамповке, за исключением того обстоятельства, что объем заготовки в последнем случае несколько больше, чем при закрытой штамповке. Вследствие этого при открытой штамповке металл заготовки (если соотношение в размерах заготовки то же самое) несколько раньше приходит в соприкосновение со стенками штампа, чем при закрытой штамповке.

Вторая стадия процесса начинается с момента соприкосновения металла с наружными стенками полости штампа (рисунок 6.70, *б*). Характер деформирования поковки в этой стадии изменяется по сравнению с первой стадией процесса. Наружные стенки полости штампа препятствуют истечению металла в направлении диаметра; весь металл, вытесняемый из-под центральных выступов штампа (прошивней), смещается в направлении высоты полости. Вторая стадия процесса заканчивается в момент соприкосновения металла поковки с дном полостей штампов (рисунок 6.70, *в*). Незаполненными остаются лишь круговые пояски по радиусам переходов стенок штампа в дно.

В третьей стадии происходит полное, отчетливое заполнение полости штампов металлом (рисунок 6.70, *г*). Стадия доштамповки в этом процессе отсутствует.

В дальнейшем полость штампа  $ABCD$  (рисунок 2), примыкающую к его замку, будем называть открытой, а полость штампа  $BEFC$  — закрытой.

При штамповке под прессом в закрытых штампах, в отличие от штамповки в открытых штампах, заполнение полостей штампа металлом происходит неодинаково: заполнение открытой полости штампа происходит более интенсивно, чем заполнение закрытой полости.

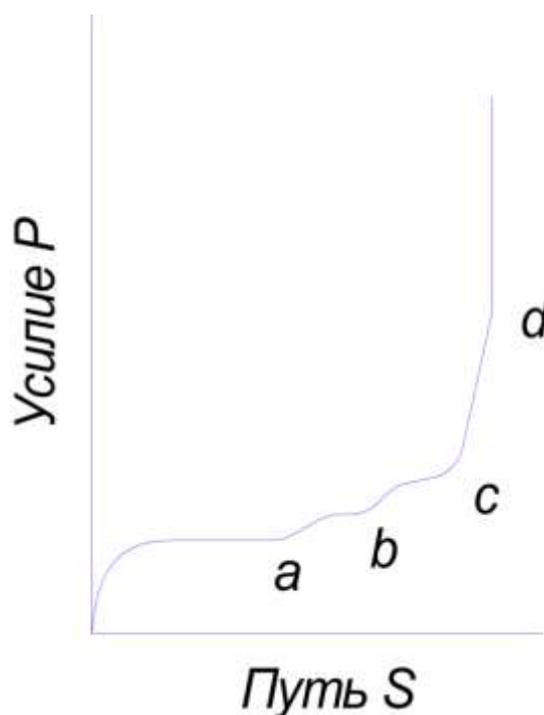


Рисунок 6.71 – График усилий при штамповке кольцевых поковок в закрытом штампе

На рисунке 6.71 представлен график в координатах усилие — путь при штамповке поковок в закрытых штампах с одинаковой высотой верхней и нижней полостей. На графике можно выделить характерные точки.

Точка  $a$  соответствует моменту соприкосновения металла с наружными стенками полости штампа, то есть концу первой стадии процесса штамповки; точка  $b$  — моменту соприкосновения с дном открытой полости и точка  $c$  — моменту соприкосновения металла с дном закрытой полости штампа — концу второй стадии процесса. На участке кривой от точки  $c$  до точки  $d$  происходит

заполнение фасок поковки; точка  $d$  соответствует концу третьей стадии и всего процесса штамповки.

Кривые усилий штамповки в открытых и закрытых штампах являются типовыми для процессов объемной штамповки, связанных с заполнением формы штампа выдавливанием (истечением). Сравнение соответствующих стадий процессов открытой и закрытой штамповки позволяет сделать следующие выводы:

1. Протекание первой стадии в обоих процессах совершенно одинаково.
2. Течение металла во второй и последующих стадиях различно для процессов открытой и закрытой штамповки.
3. Наблюдается значительное различие в течении металла в открытой и закрытой полостях штампа, в процессе закрытой штамповки под прессом. При штамповке под молотом эта неравномерность будет иной.
4. Несмотря на различие второй и последующих стадий процессов штамповки, графики усилий процессов открытой и закрытой штамповки имеют общий характер.

Способы штамповки на молотах в открытых и закрытых штампах имеют свои преимущества и недостатки.

Важнейшим преимуществом открытой штамповки является ее большая универсальность. В открытых штампах штампуются детали различной конфигурации (коленчатые валы, шатуны, шестерни и др.). Наличие в штампе открытой полости облойной канавки, в которую может вытекать металл, компенсирует неточность в размерах заготовок (допуски на диаметр прокатанного прутка, допуски на резку заготовок), износ штампов, большее или меньшее окалинообразование.

Существенный недостаток этого процесса — наличие технологически неизбежного отхода в виде облоя, вес которого составляет значительную долю от веса поковки.

При штамповке в закрытых штампах заусенец не является технологически неизбежным отходом, поэтому объем заготовки может быть уменьшен на объем облоя. В этом заключается одно из главных преимуществ метода штамповки в закрытых штампах перед методом штамповки в открытых штампах. Вследствие отсутствия истечения металла в облой уменьшается неравномерность деформации, что способствует повышению пластичности деформируемого металла. При штамповке поковок без центрального отверстия снижается трудоемкость, сокращается технологический цикл, экономится штамповая сталь и электроэнергия за счет отмены операции обрезки облоя на кривошипных прессах.

Наряду с указанными преимуществами при внедрении процесса закрытой штамповки на молотах выявились и недостатки его по сравнению со штамповкой в открытых штампах.

Одним из существенных недостатков способа штамповки в закрытых штампах следует признать его меньшую универсальность. В закрытых штампах указанных конструкций в настоящее время штампуются детали типа буферов, шестерен и других поковок, представляющих собой тела вращения, фигурные поковки с постоянным поперечным сечением по длине, а также предварительные заготовки для деталей сложной конфигурации, например крестовины. В некоторых случаях безоблойная штамповка применяется для изготовления поковок удлиненной формы сложной конфигурации со значительной разницей в сечениях (рычаги и др.), но со специальной подготовкой заготовок.

Другим недостатком метода безоблойной штамповки является колебание в размерах, главным образом по высоте, и весе поковок, получаемых в закрытых штампах. Это колебание возникает в результате отклонения в размерах по сечению исходного профиля в пределах допуска на прокат и отклонения в размерах по длине заготовок при резке их на ножницах в пределах допуска на резку. Практически по этим причинам заготовки имеют колебания по объему при относительно точной резке до 2%.

При нагреве заготовок в печах потеря на угар колеблется от 2 до 4% от веса заготовки. Объем самой поковки также меняется по мере износа штампов. Практически износ штампов дает приращение объема поковки до 2%.

Все эти факторы приводят к колебаниям в размерах и весе поковок. В ряде случаев они могут привести к утяжелению поковок и к увеличению объема механической обработки по сравнению с поковками, полученными в открытых штампах.

Утяжеление поковки, отштампованной в закрытом штампе на молоте, может произойти также за счет увеличения напусков  $ABB$ , образуемых штамповочными уклонами (угол  $\alpha$ ) при перенесении плоскости разъема штампов с середины высоты поковки ( $II-II$ ), как это принимается при открытой штамповке, на торец поковки ( $I-I$ ), что необходимо при закрытой штамповке (рисунок 6.72).

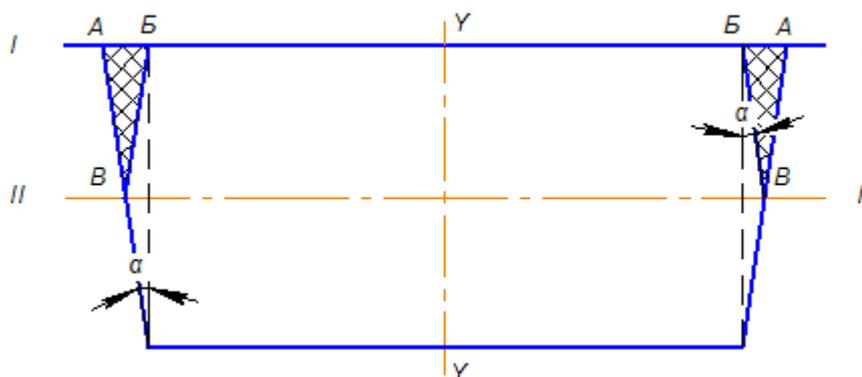


Рисунок 6.72 – Схема нанесения уклонов при разьеме штампа у торца и посередине поковки

Безоблойная штамповка на молотах в закрытых штампах с вертикальной плоскостью разъема сопровождается понижением стойкости штампов по сравнению с облойной штамповкой.

Истечение металла в закрытых штампах происходит несколько иначе, чем в открытых. Поэтому при конструировании ручьев, и выборе размеров заготовки для закрытой штамповки необходимо учитывать ее специфические особенности и отличия от открытой штамповки.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Запустите Deform-2D через ярлык на рабочем столе или меню кнопки «ПУСК».

Создайте новую задачу кнопкой new problem , нажмите кнопку , в следующем окне , введите имя своей лабораторной работы (фамилия\_группа\_ОШ) и затем нажмите .

Нажмите кнопку Настройки задачи, появится окно, в котором по умолчанию будет активна закладка Основное. Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ», задана теплопередача и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (рисунок 6.73). Нажмите ОК.

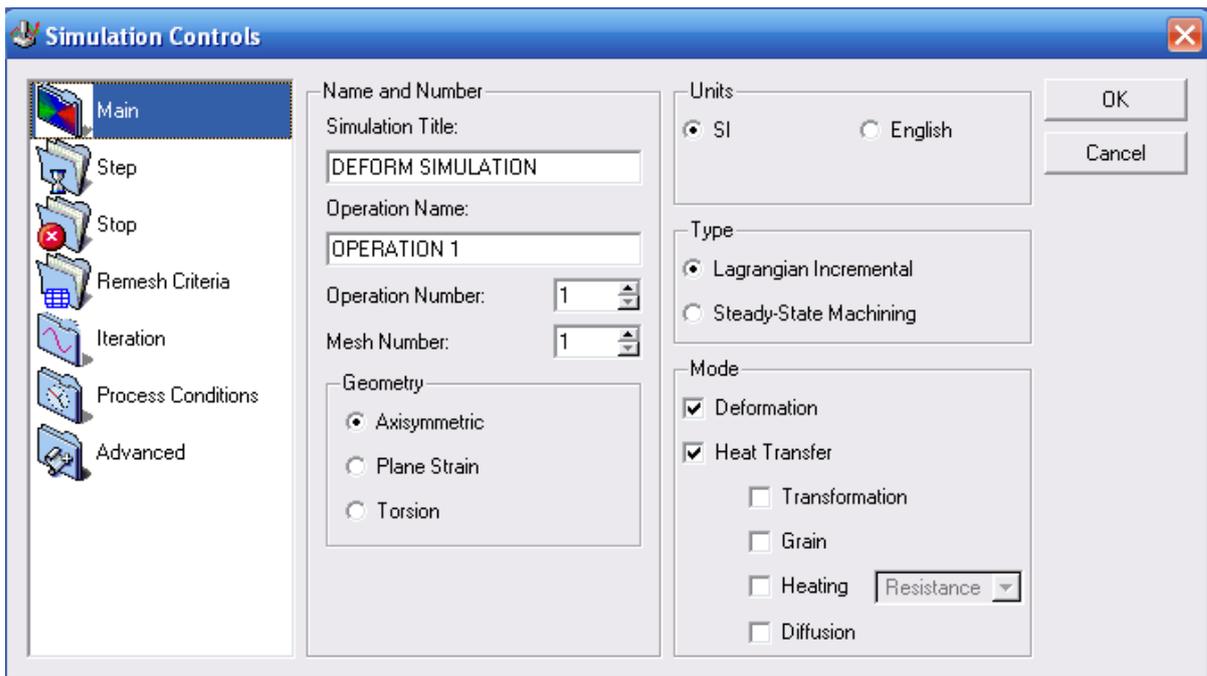


Рисунок 6.73 – Настройки задачи

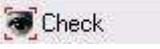
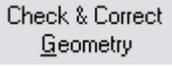
## Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов.

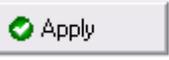
Выделите в дереве объектов Top Die, это будет верхняя половина штампа.

Нажмите  Геометрия, выберите закладку  Edit. Введите данные, указанные на рисунке 6.74.

Введите указанные данные.

Щелкните  Check чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку .

Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

Нажмите кнопку  Apply (применить).

Сохраните геометрию верхнего инструмента Top Die, под именем 1.GEO, нажав на кнопку .

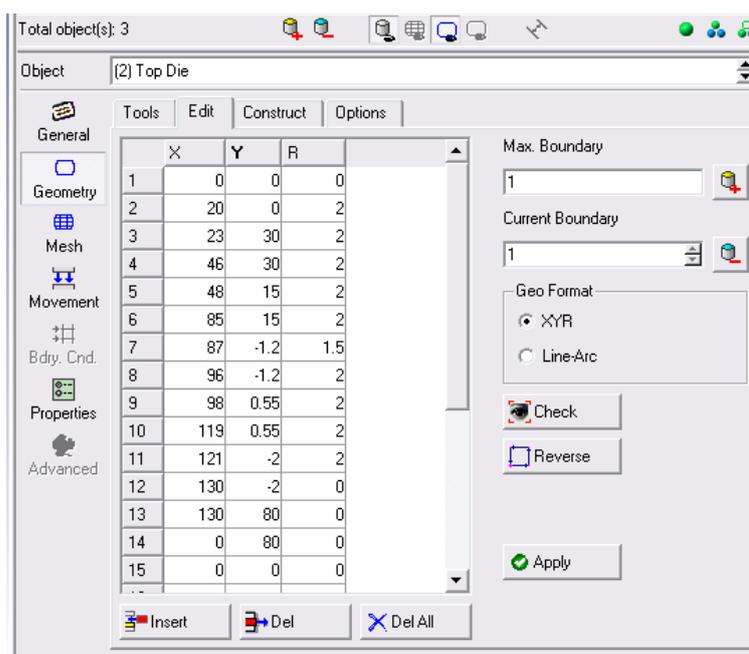
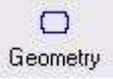


Рисунок 6.74 - Создание геометрии инструмента

Выделите в дереве объектов Workpiece, это будет заготовка. Нажмите  Геометрия (геометрия), выберите закладку  Primitive (геометрические примитивы). Введите данные, указанные на рисунке 6.75.

Введите указанные данные и нажмите кнопку  Create (создать).

Щелкните **Check GEO** чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку

**Check & Correct  
Geometry**

Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

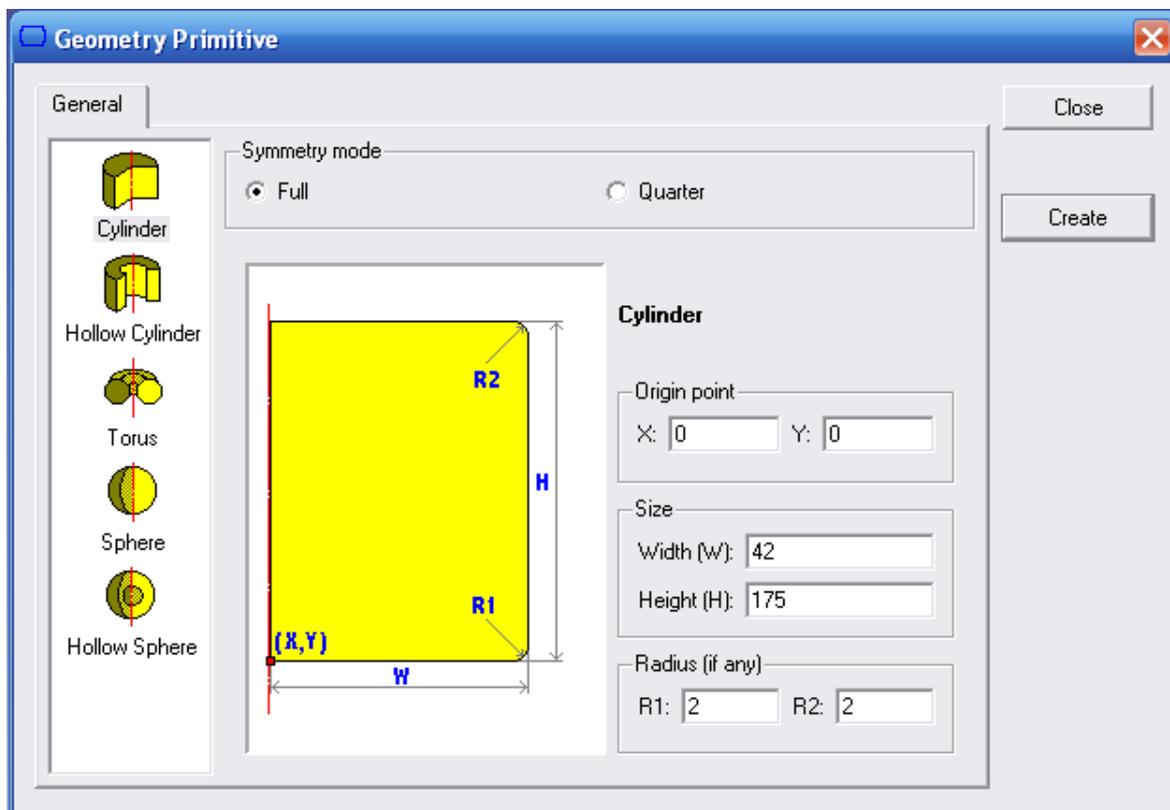


Рисунок 6.75 - Создание геометрии заготовки

Для создания геометрии нижнего инструмента выделите в дереве объектов Bottom Die и импортируйте геометрию верхнего инструмента Top Die, нажав на кнопку **Import Geo...** и выделив файл 1.GEO.

### Позиционирование

Откройте окно «Object Positioning» (позиционирование объектов), показанное на рисунке 6.76, нажав кнопку , и используйте перемещение интерференцией верхнего бойка относительно заготовки, выбрав Interference (интерференция).

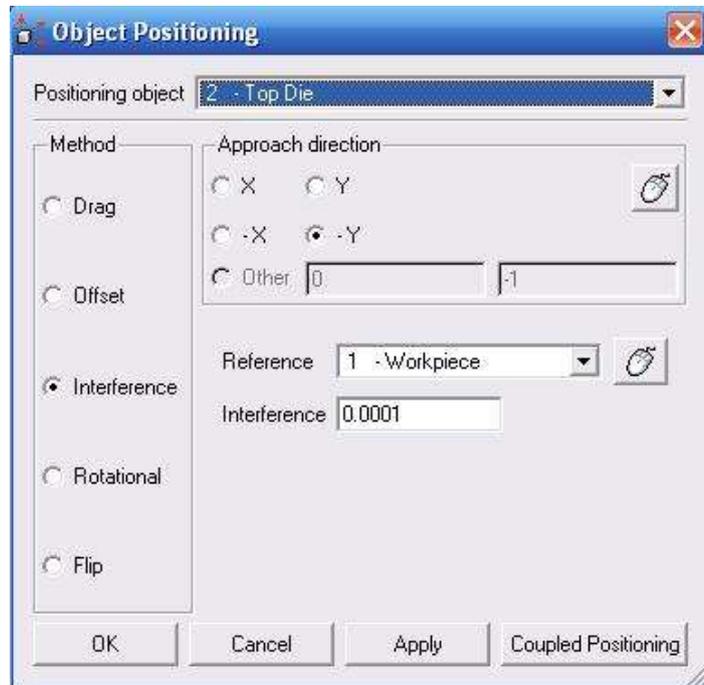
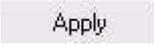


Рисунок 6.76 - Позиционирование верхнего инструмента

Нажмите  (применить). Что бы сместить нижний боек относительно заготовки используйте перемещение зеркальным отражением нижнего бойка относительно оси X, выбрав Flip (зеркальное отражение), как показано на рисунке 6.77.

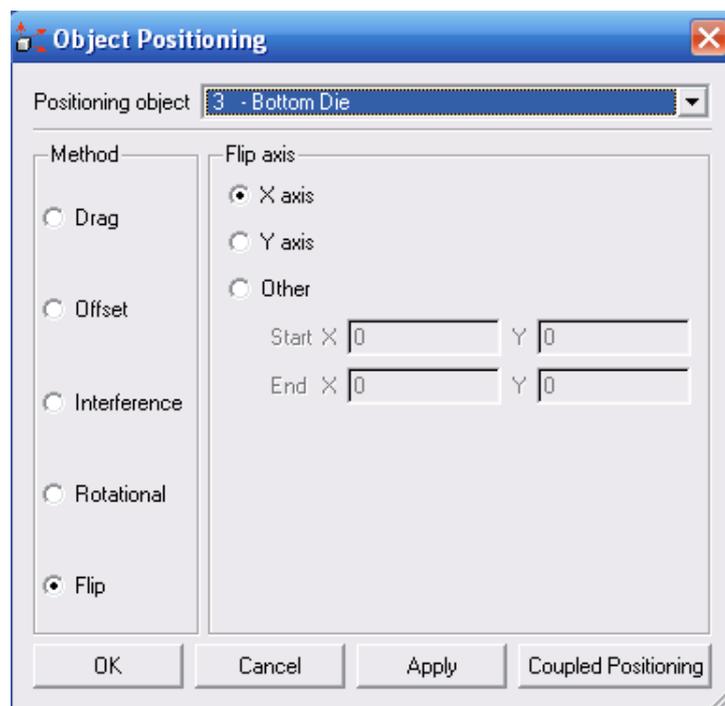


Рисунок 6.77 - Позиционирование нижнего инструмента

Позиционирование нижнего и верхнего инструмента относительно заготовки показано на рисунке 6.78.

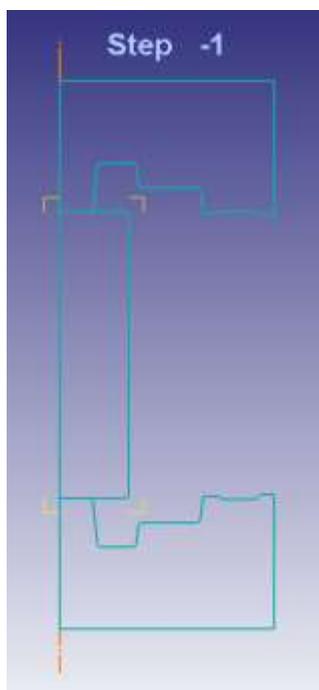
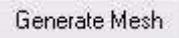


Рисунок 6.78 - Позиционирование объектов

### Создание сетки конечных элементов

Для создания сетки разбиения заготовки, выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece) и нажмите  Mesh (сетка), выберите количество конечных элементов равное 500 и нажмите  Generate Mesh (сгенерировать сетку). Аналогичным образом задайте сетку конечных элементов для верхнего и нижнего инструмента, выбрав количество элементов равное 1000.

### Задание материала заготовки и инструмента

Выберите в дереве объектов заготовку (Workpiece), нажмите кнопку  General (общее), откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 6.79.

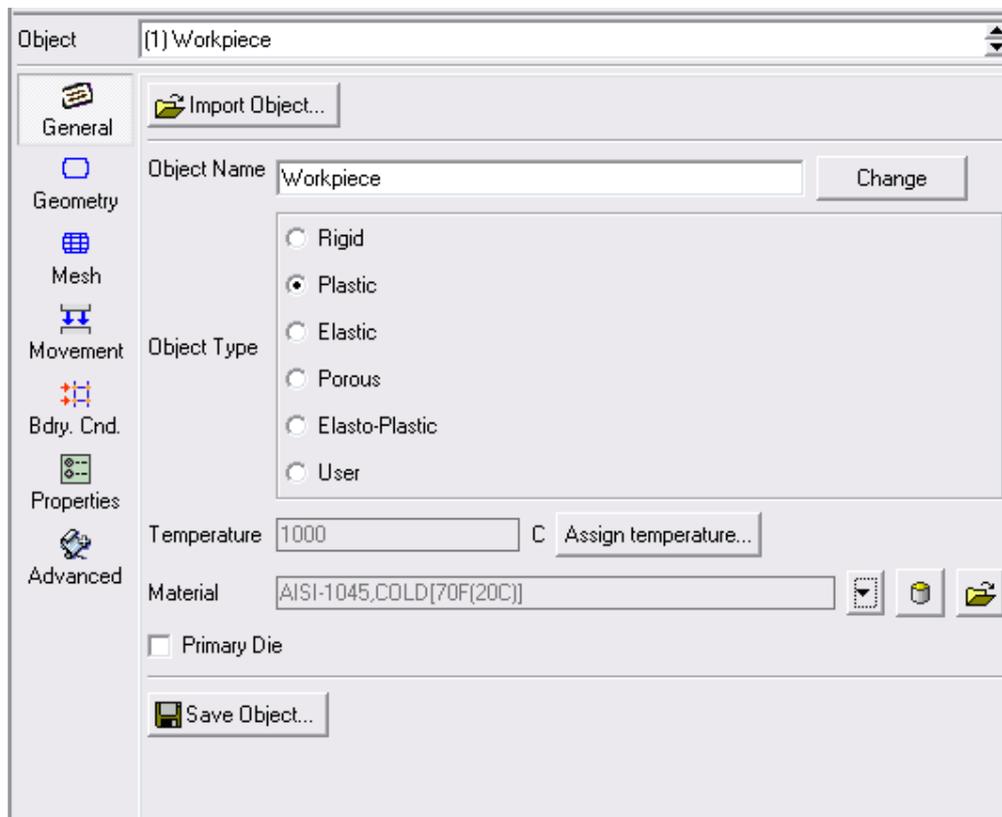


Рисунок 6.79 - Основное окно заготовки

Убедитесь, что для заготовки установлены свойства пластического объекта. Задайте температуру заготовки  $1000^{\circ}\text{C}$ , нажав на кнопку **Assign temperature...**. Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку , откроется окно «Material Library», которое показано на рисунке 6.80 Выбираем материал `AISI-1045,COLD[70F(20C)]` в категории Steel и нажимаем кнопку **Load** (загрузить).

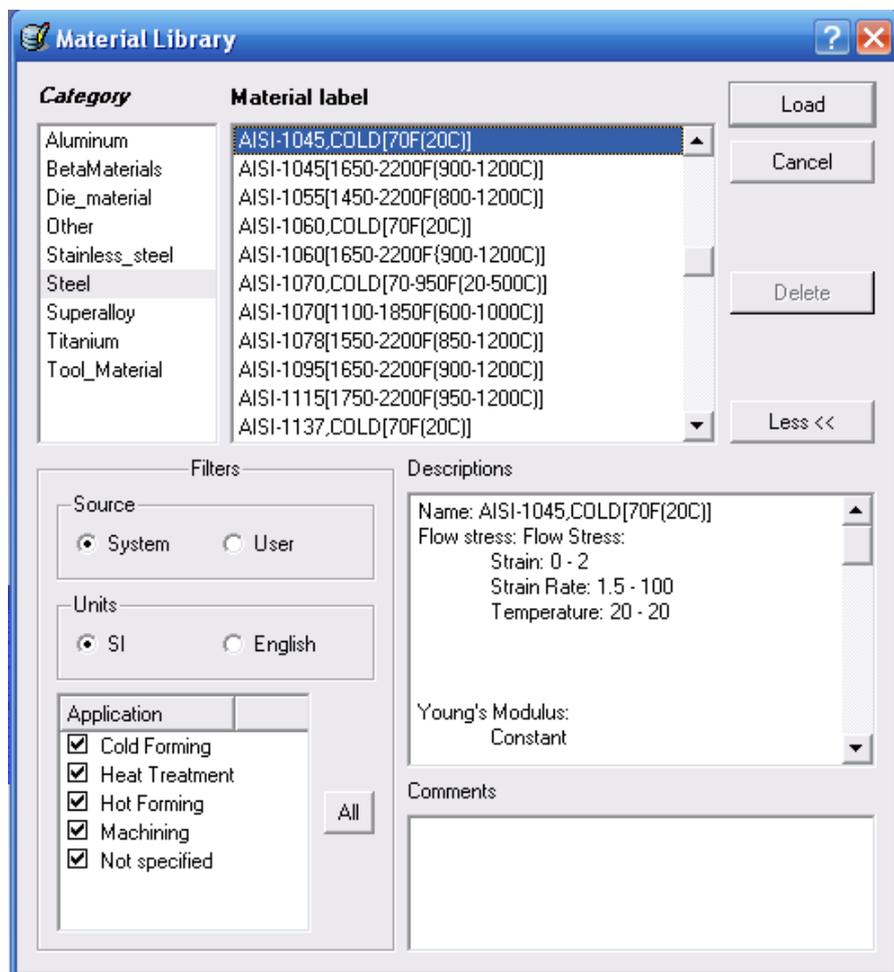


Рисунок 6.80 - Окно «Material Library»

Выберите в дереве объектов верхний инструмент (Top Die), нажмите кнопку  (общее), откроется основное окно объекта, показанное на рисунке 6.81.

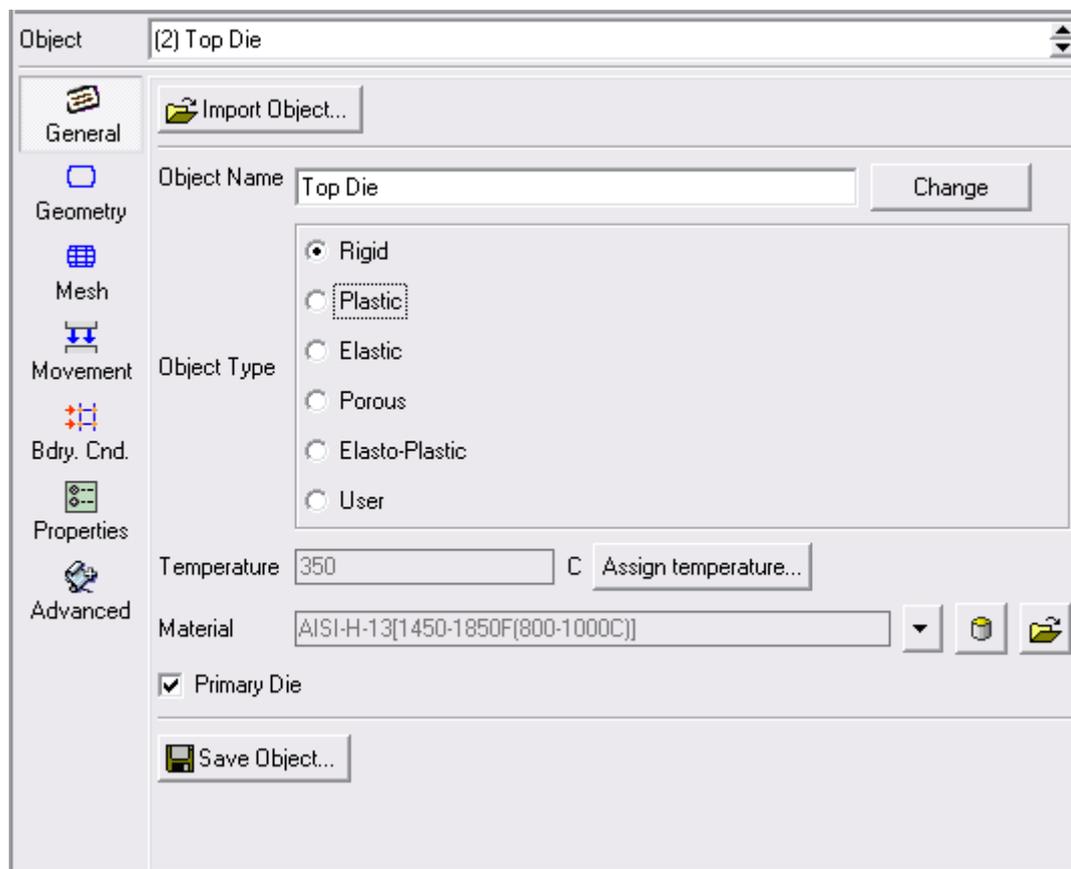
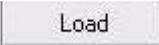


Рисунок 6.81 - Основное окно инструмента

Убедитесь, что для заготовки установлены свойства твердого объекта. Задайте температуру заготовки  $350^{\circ}\text{C}$ , нажав на кнопку . Как только основные параметры заданы – нажмите кнопку , откроется окно «Material Library». Выбираем материал AISI-H-13[1450-1850F(800-1000C)] в категории Die\_material и нажимаем кнопку  (загрузить).

Аналогичным образом задайте температуру  $350^{\circ}\text{C}$  и материал AISI-H-13[1450-1850F(800-1000C)] для нижнего инструмента (Bottom Die).

### Назначение связи между объектами

Для определения связи между объектами нажмите кнопку .

Так как никакие отношения в настоящее время не определены, появится сообщение, спрашивающее, хотите ли вы, чтобы система добавила отношения по умолчанию за вас.

Нажмите кнопку .

Окно INTER-OBJECT появится с уже определёнными четырьмя отношениями. Отношения DEFORM, определяются относительно Главного и Подчинённого объектов. В этом расчете, одна деформируемая заготовка деформируется между двумя жёсткими инструментами. Жесткие инструменты определены как главные объекты, а заготовка определена как Подчинённый объект. Если не появиться отношение Заготовка-Заготовка, то необходимо его добавить.

Несколько свойств (главным образом трение и коэффициент теплопроводности) могут быть определены для каждого из этих отношений. Так как в этом расчете не будет приниматься во внимание никакой передачи температуры, единственное свойство, которое должно быть определено – трение.

Нажмите кнопку «Edit» (изменить). В секции трения, есть выпадающее меню, показанное на рисунке 6.82, которое позволяет пользователю выбирать соответствующее условие трения обычных процессов деформирования. В выпадающем меню выберите Hot forging (lubricated). Автоматически будет выбран коэффициент трения 0,3.

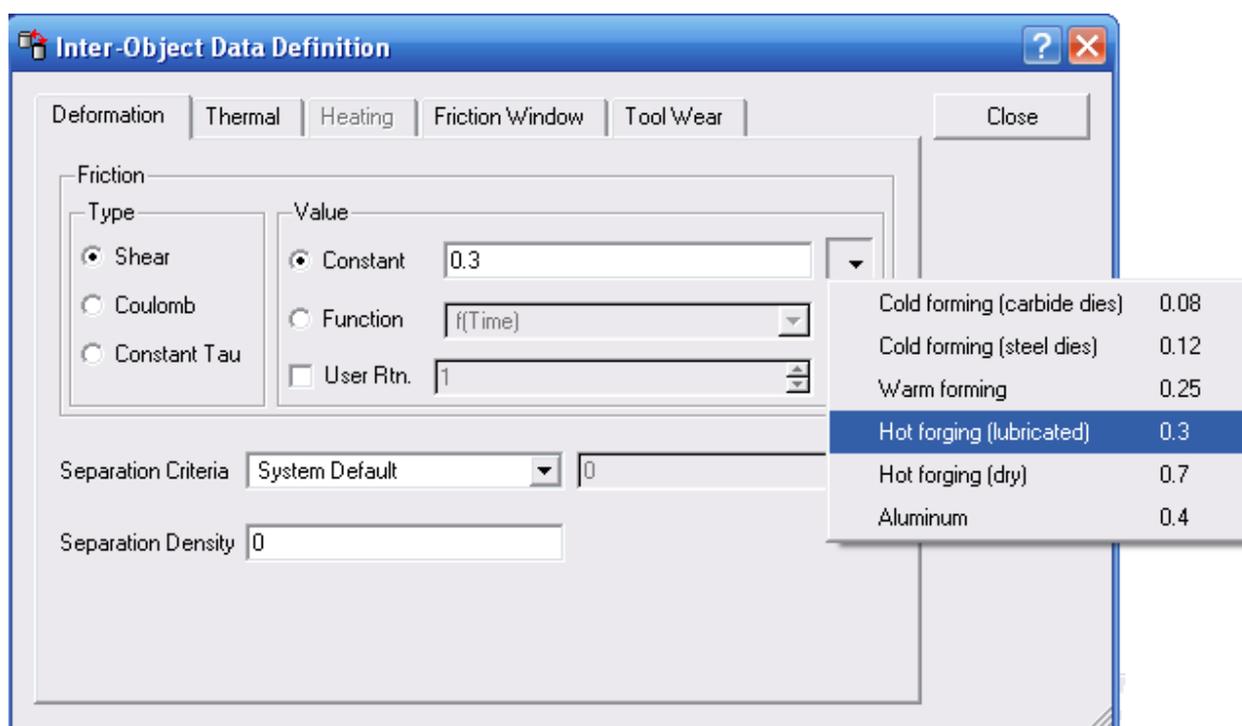
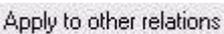


Рисунок 6.82 - Окно «Inter-Object Data Definition»

Нажмите кнопку Close для возврата в главное меню окна Inter-Object.

Также необходимо задать коэффициент теплопроводности, нажмите кнопку «Edit» (изменить), во вкладке температурных взаимоотношений (Thermal) выберите коэффициент теплопроводности постоянным, а в выпадающем меню выберите Forming, тогда система автоматически задаст коэффициент 11.

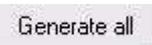
Теперь, когда отношения между верхним инструментом и заготовкой определены, необходимо определить отношения между заготовкой и нижним инструментом.

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, кнопкой  можно скопировать свойства первого отношения во все остальные. После этого, все отношения будут иметь коэффициент трения Shear 0,3 и коэффициент теплопроводности 11.

Как только отношения определены, должен быть создан контакт между объектами. Когда контакт создан, любые узлы на деформируемом (подчинённом) объекте, совпадающие с определённой точностью с инструментом переставляются на поверхность инструмента.

Перед созданием контакта необходимо определить разумное значение точности. Слишком большое значение точности поместит слишком много узлов в контакт с поверхностью инструмента, которые могут исказить сетку заготовки.

Слишком малое значение точности может привести к тому, что узлы, находящиеся на линии контакта не попадут в контакт, и он не будет создан.

DEFORM может определить значение точности с помощью кнопки  в секции «погрешность», которая вычисляет значение точности и автоматически вводит его в программу. Когда значение точности определено, нажмите  для создания контакта между объектами.

Контакт будет создан между заготовкой и обоими инструментами, и этот контакт будет показан, как цветные точки на верхней и нижней поверхностях

заготовки (рисунок 6.83).

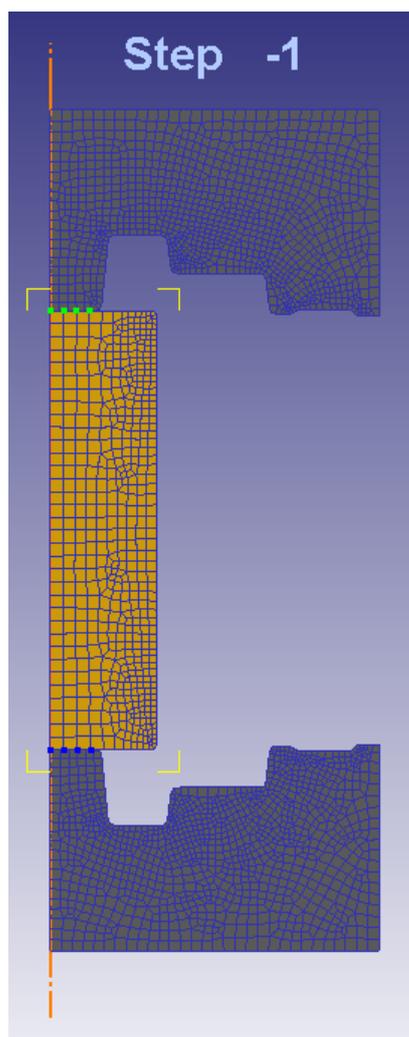
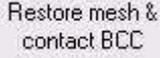


Рисунок 6.83 - Контактные пары

Замечание: если задано слишком большое значение точности при создании контакта и сетка заготовки разрушена, кнопка  может отменить создание контакта.

Когда контакт создан, нажмите на кнопку , что закроет окно «взаимодействие объектов», показанное на рисунке 6.84.

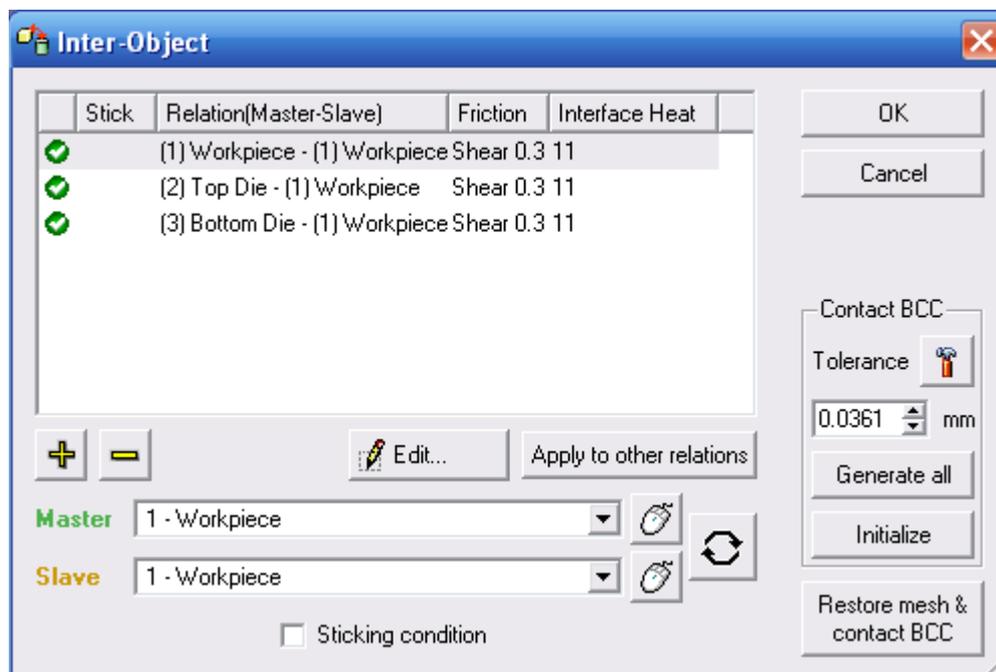


Рисунок 6.84 - Окно «Inter-Object»

### Задание граничных условий

Для точного моделирования процесса, как осесимметричный, вы должны закрепить узлы заготовки по средней линии. Выберите её, и нажмите кнопку



, выберите настройку скорость (Velocity). Чтобы закрепить узлы по средней линии нужно установить  $V_x$  скорость узлов средней линии в ноль. Убедитесь, что направление установлено в X, и что поле содержит скорость 0.

Граничные условия, точно так же как геометрия, должны всегда определяться в направлении против часовой стрелки. Чтобы определить узлы на средней линии, сначала щёлкните на узле в верхнем левом углу, и затем щёлкните на узле в нижнем левом углу. Когда узлы выбраны, нажмите кнопку



для применения граничного условия.

Граничное условие X, Fixed появится в списке «Тип гр. Условий», и затем выбранные, центральные узлы будут подсвечены в окне Экран (Display), изображенном на рисунке 6.85.

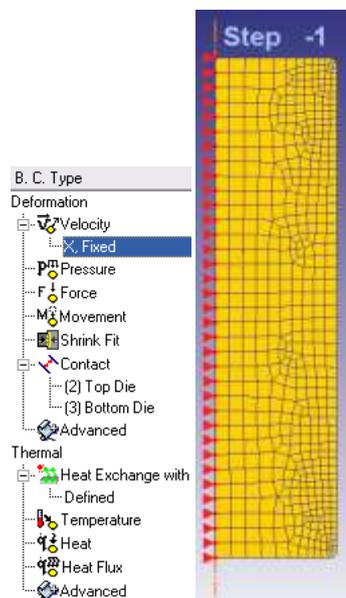


Рисунок 6.85 - Окно «Граничные условия»

Также необходимо задать граничное условие теплопередачи (рисунок 6.86), для этого в термальных взаимодействиях выделите Heat exchange with environment, и укажите область граничного условия (левый нижний и затем левый верхний углы). Нажмите  .

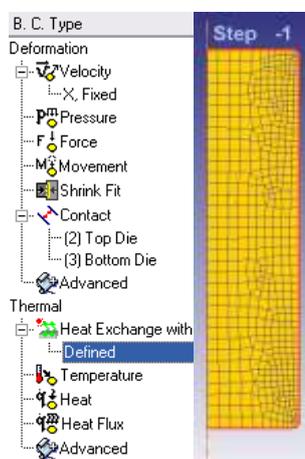


Рисунок 6.86 - Граничное условие при теплопередачи

Таким же образом задайте температурные граничные условия для инструментов. Температурные граничные условия представлены на рисунке 6.87.

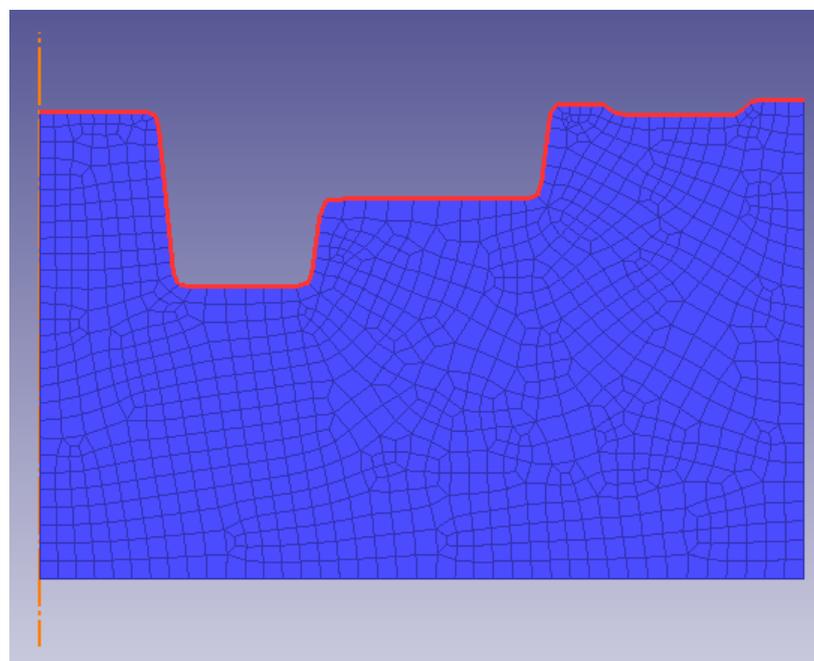
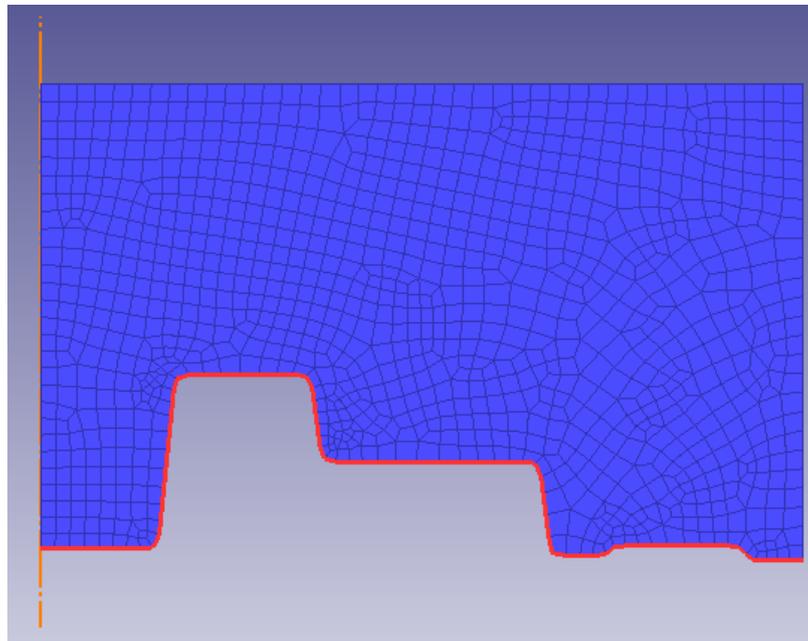


Рисунок 6.87 - Температурные граничные условия

### Задание движения верхнего инструмента

Выберите Top Die в дереве объектов и нажмите на кнопку  Movement (движение). В появившемся окне, показанном на рисунке 6.88, установите направление движения верхнего бойка вниз (-Y), и постоянную скорость 4000 мм/сек.

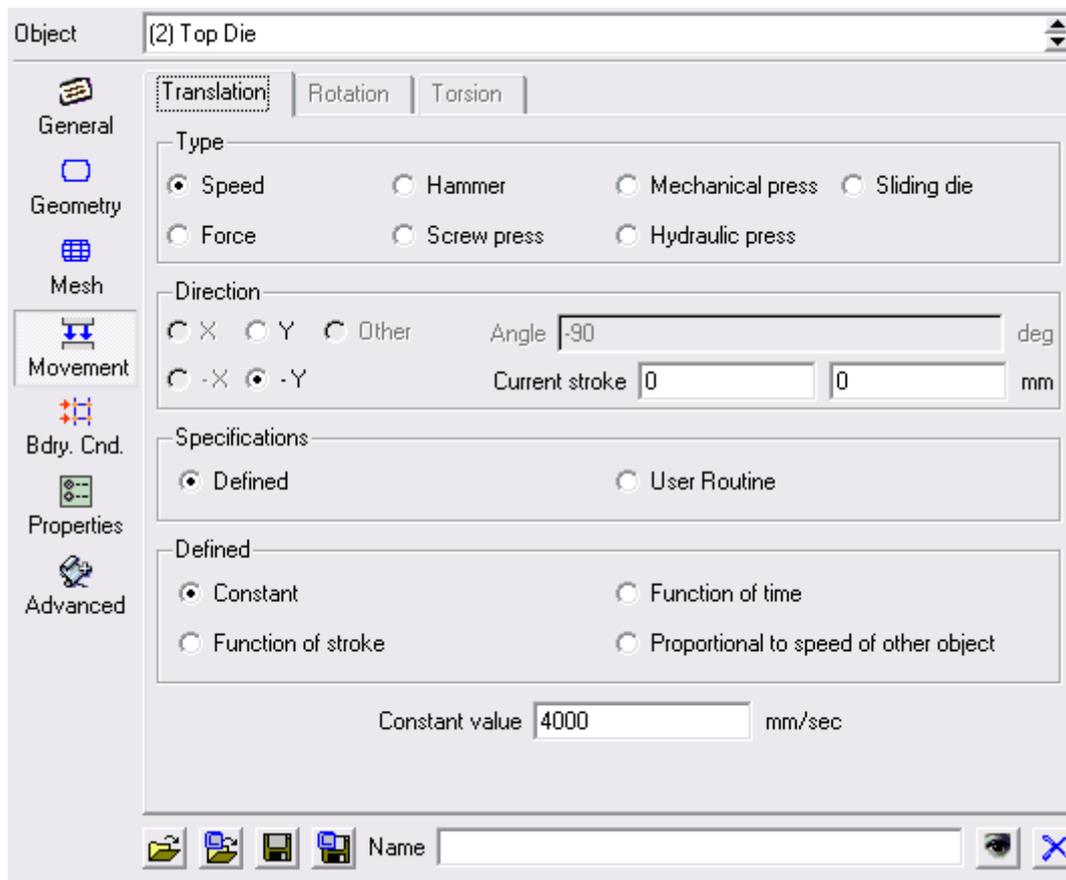


Рисунок 6.88 - Окно «Движение»

Таким образом, мы задаём направление и скорость движения инструмента.

### Задание числа шагов расчёта

Задание шага решения задачи может быть ограничено по времени и по перемещению главного инструмента. Для определения величины шага по перемещению необходимо произвести замер наименьшего размера сетки конечных элементов при помощи кнопок  и , расположенных на Панели инструментов, и данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку  и в появившемся окне Simulation controls перейдите на закладку Step (шаг). Затем введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке With Equal Die Displacement (рисунок 6.89).

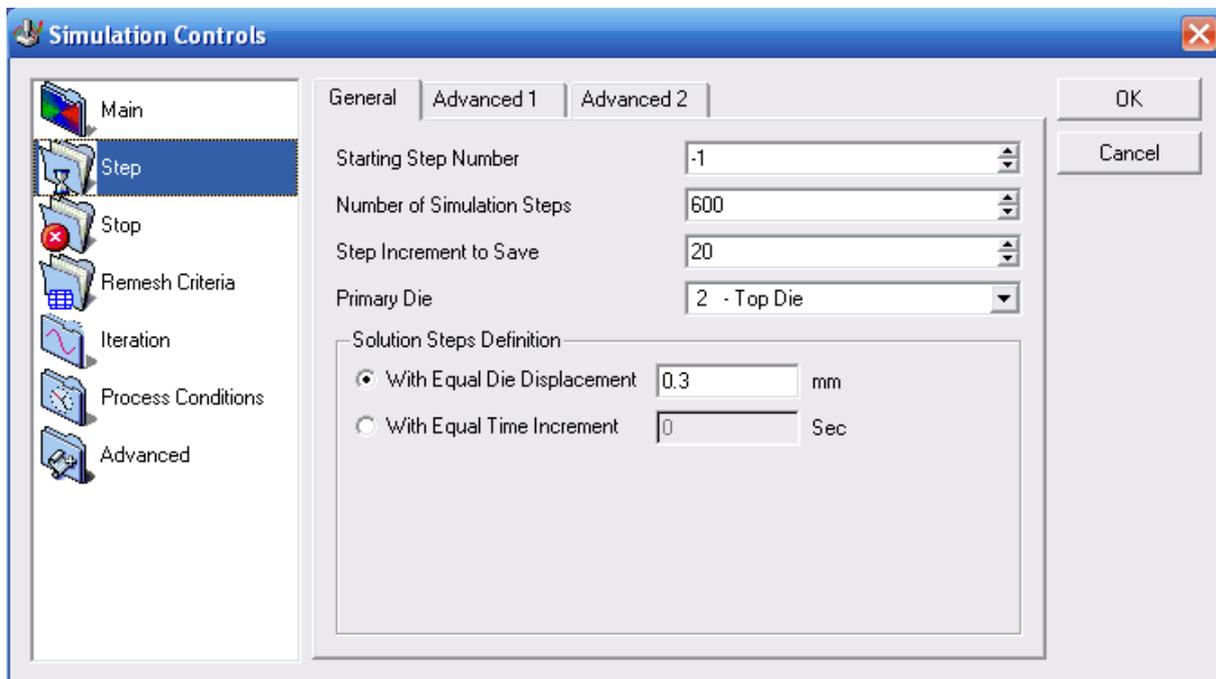


Рисунок 6.89 - Окно «Simulation Controls»

Для того что бы задать число шагов расчёта необходимо перемещение главного инструмента разделить на размер шага по перемещению и полученное значение внести в ячейку в строке Number of Simulation Steps (число шагов расчёта). Для точности моделирования процесса возьмем завышенное число шагов равное 600.

В строку Step Increment to Save (через сколько шагов сохранять) введите 20 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке Primary Die (главный инструмент) установите Top Die. Нажмите кнопку ОК.

Нажмите на кнопку  и в появившемся окне Simulation controls перейдите на закладку Stop. Выберите вкладку Die Distance, что бы задать дистанцию между верхней и нижней половиной штампа, при которой необходимо закончить расчет. В окошке Reference 1 выберите объект TopDie, а в окошке Reference 2, объект Bottom Die. Укажите мышкой точки объектов, между которыми задаётся дистанция (правый нижний угол верхней половины штампа и затем правый верхний угол нижней половины штампа, как показано на рисунке 6.90).

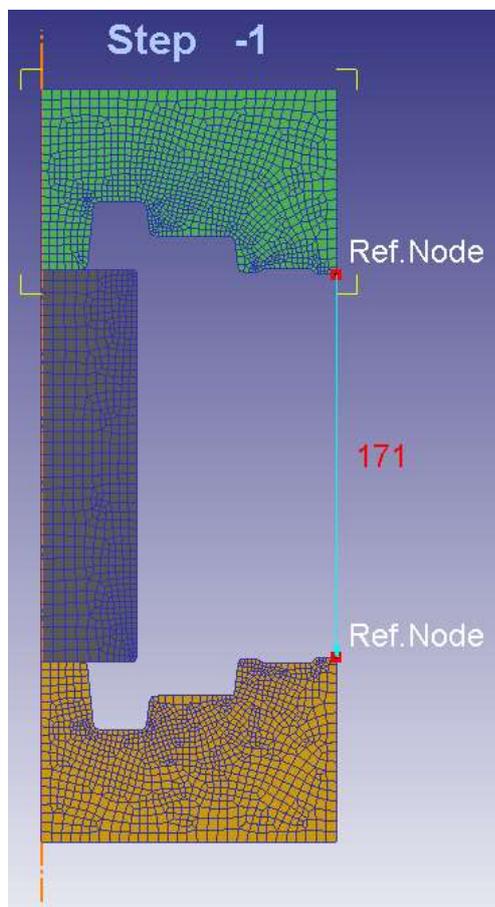


Рисунок 6.90 – Дистанция

В окошке Method выберете Y Distance. А значение Distance задайте равное 0. Нажмите ОК и окно Simulation controls, показанное на рисунке 6.91, закроется.

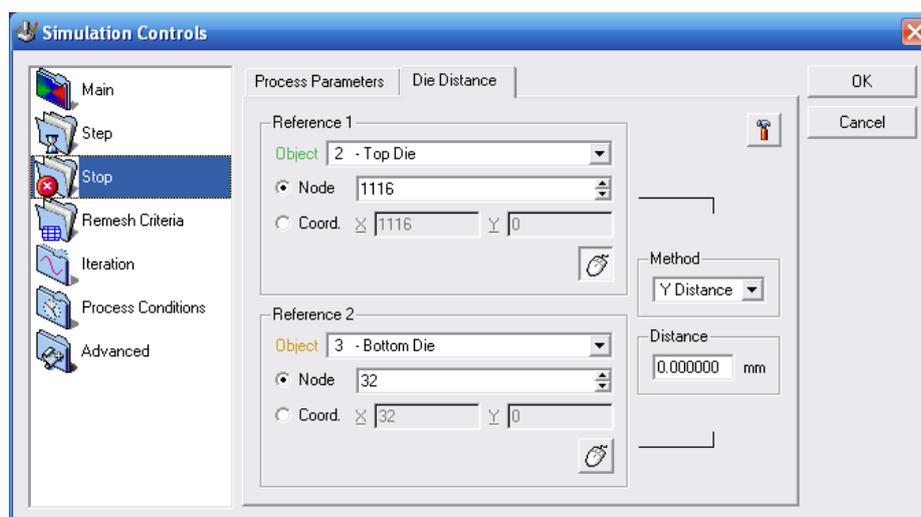


Рисунок 6.91 – Вкладка «Die Distance»

## Генерация базы данных

Все условия для начала расчета заданы, поэтому начинайте генерацию базы данных, нажав кнопку , нажмите кнопку **Check** (проверить), когда появится сообщение  Database can be generated (база данных может быть сгенерирована) нажмите кнопку **Generate** (сгенерировать) и начнётся генерация базы данных. Окно генерации базы данных показано на рисунке 6.92.

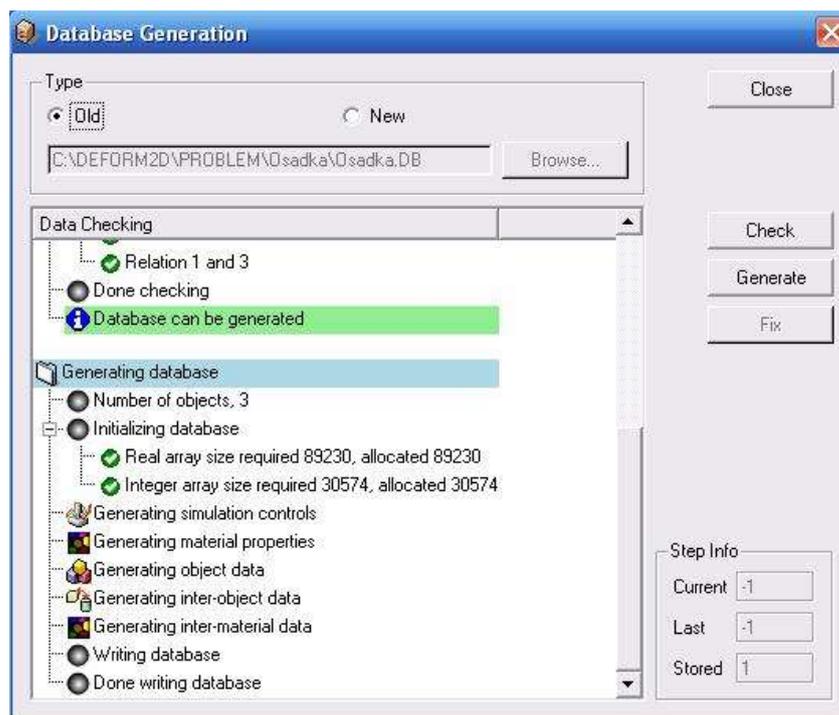


Рисунок 6.92 - Окно «Генерация базы данных»

При появлении сообщения  Done writing database (запись базы данных завершена), после сохранения, можете закрыть Deform2D – Preprocessor.

## Запуск расчета

Выберите текущую базу данных и запустите расчёт кнопкой **Старт** или .

Дождитесь появления в окне сообщений строки

```
PROGRAM STOPPED!  
THE DISTANCE BETWEEN TWO OBJECTS ( 2 3): 0.0011356 HAS EXCEEDED THE SPECIFIED LIMIT 0.0000000
```

После расчета выделяем свою базу данных в дереве файлов и запускаем постпроцессор кнопкой **DEFORM-2D/3D Post** в правом нижнем углу окна.

## Создание новой задачи для закрытой штамповки

Создайте новую задачу кнопкой **new problem** , нажмите кнопку **Next >** , в следующем окне **Next >** , введите имя своей лабораторной работы (фамилия\_группа\_ЗШ) и затем нажмите **Finish** .

Нажмите кнопку **Настройки задачи**, появится окно, в котором по умолчанию будет активна закладка **Основное**. Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ», задана теплопередача и выбран режим расчета деформаций, а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (рисунок 6.93). Нажмите **ОК**.

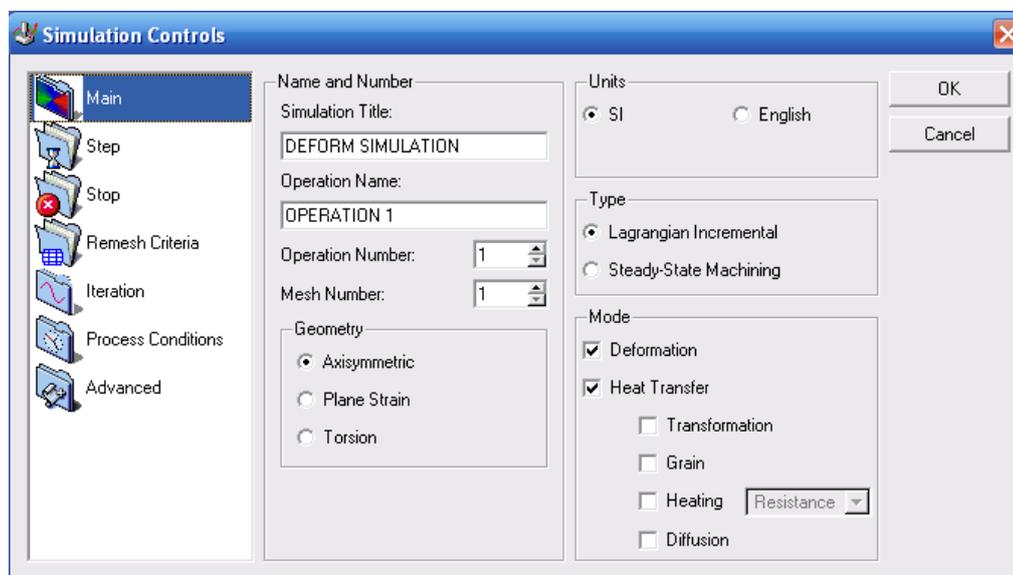
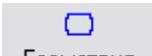


Рисунок 6.93 – Настройки задачи

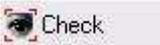
## Создание моделей инструмента и заготовки

Добавьте в дерево объектов верхний и нижний инструменты кнопкой , которая находится под деревом объектов.

Выделите в дереве объектов **Top Die**, это будет верхняя половина штампа.

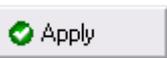
Нажмите **Геометрия** , выберите закладку **Edit** . Введите данные, указанные на рисунке 6.94.

Введите указанные данные.

Щелкните  чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку



Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

Нажмите кнопку  (применить).

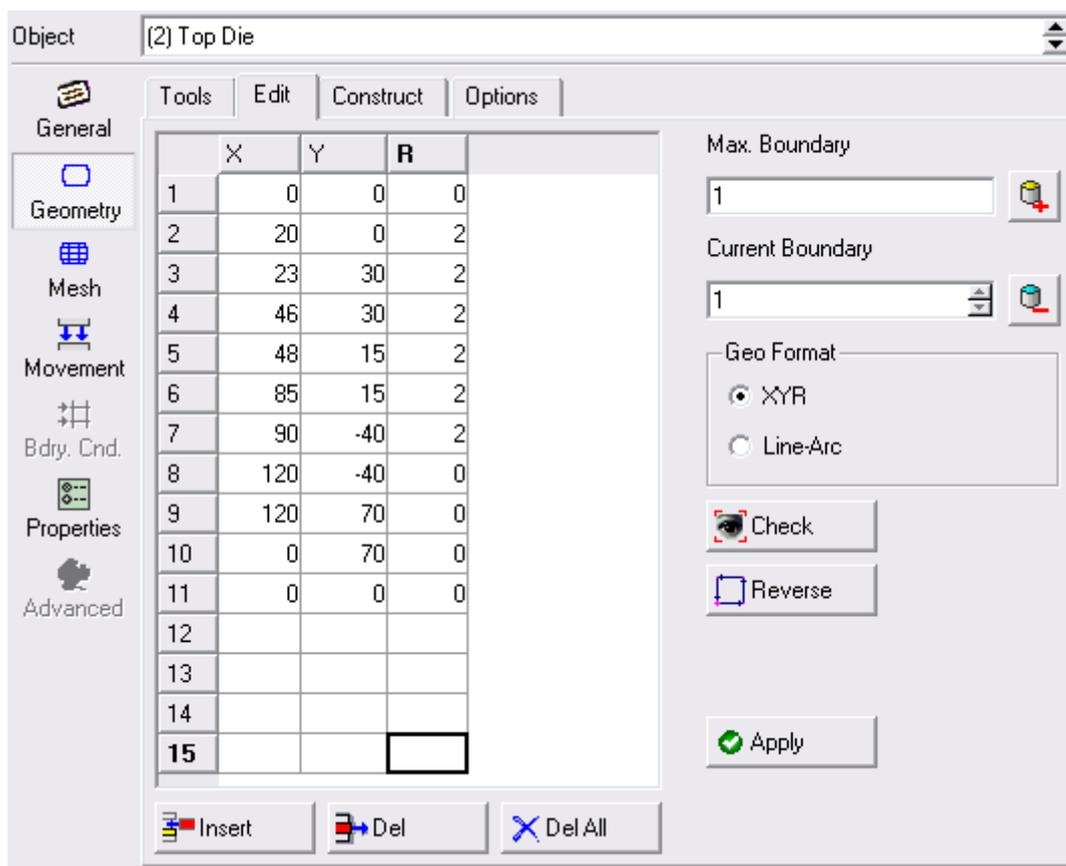
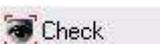


Рисунок 6.94 - Создание геометрии инструмента

Выделите в дереве объектов BottomDie, это будет нижняя половина штампа.

Нажмите , выберите закладку . Введите данные, указанные на рисунке 6.95.

Введите указанные данные.

Щелкните  чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку

Check & Correct  
Geometry

Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

Нажмите кнопку  (применить).

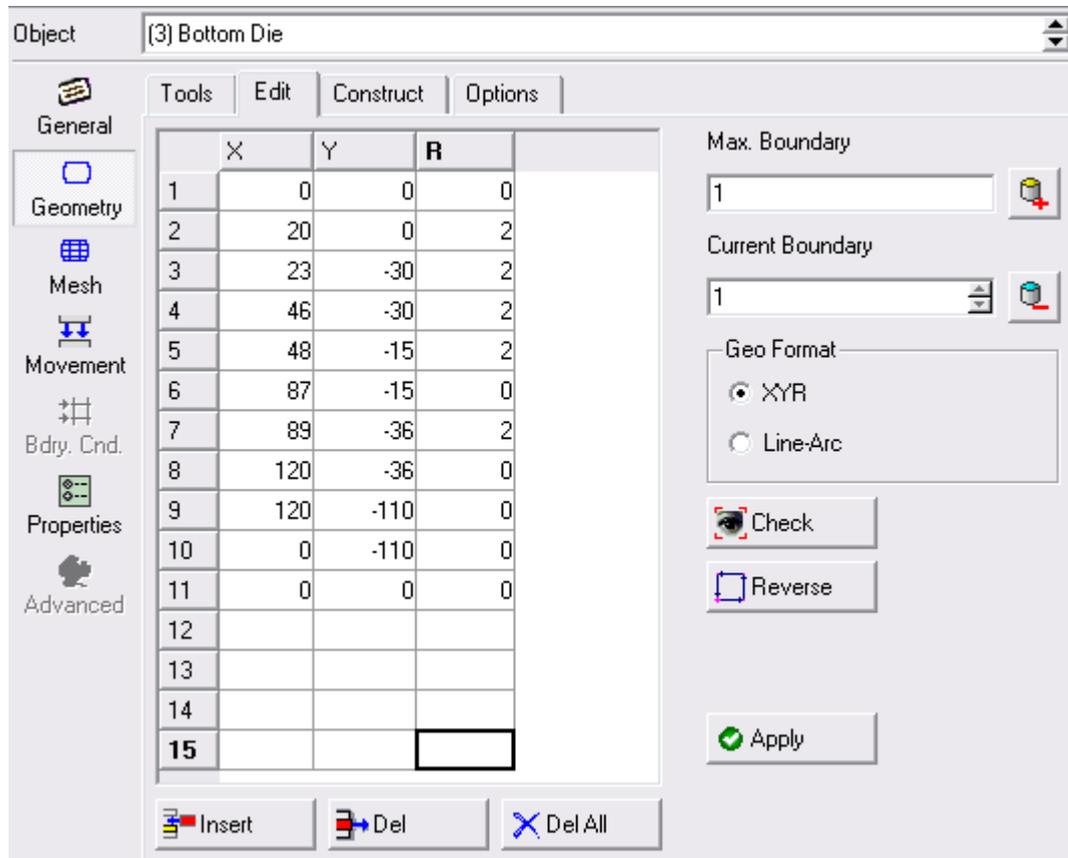
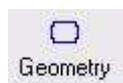


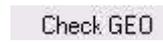
Рисунок 6.95 - Создание геометрии инструмента

Выделите в дереве объектов Workpiece, это будет заготовка. Нажмите

 Geometry

(геометрия), выберите закладку  Primitive (геометрические примитивы). Введите данные, указанные на рисунке 6.96.

Введите указанные данные и нажмите кнопку  Create (создать).

Щелкните  Check GEO чтобы увидеть есть ли какие-либо проблемы с геометрией. Используйте параметры проверки по умолчанию и нажмите кнопку

Check & Correct  
Geometry

Появится сообщение «Geometry is legal» (геометрия легальна).

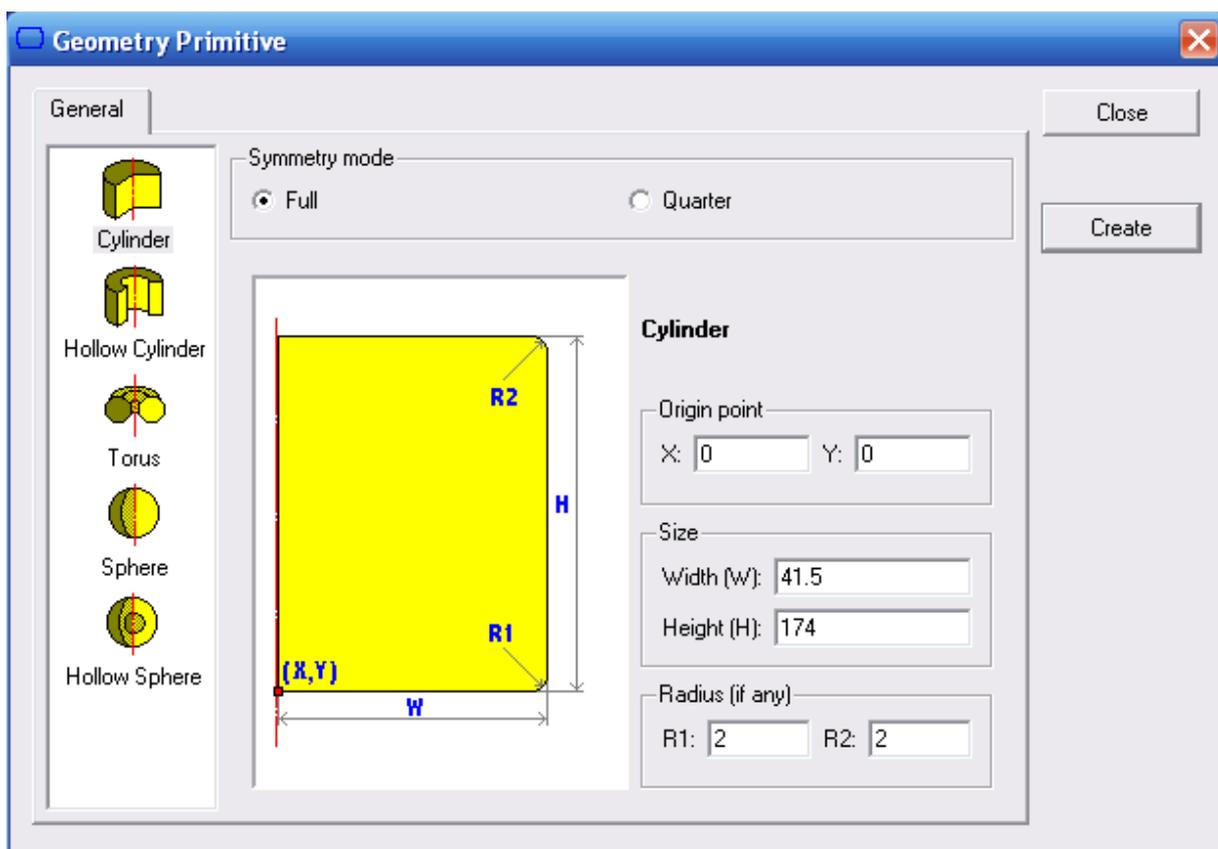


Рисунок 6.96 - Создание геометрии заготовки

Далее по аналогии с моделированием открытой штамповки сделайте следующие операции: позиционирование, создание сетки конечных элементов, задание материала заготовки и инструмента, назначение связи между объектами, задание граничных условий, задание движения верхнего инструмента вниз со скоростью 400 мм/сек и числа шагов расчета равное 600 с интервалом сохранения шагов 20, дистанции между штампами 4 мм, после генерации базы данных проведите запуск расчета.

### Анализ результатов

Постройте график усилий процессов закрытой и открытой штамповки.

Нажмите кнопку , откроется окно построения графиков, которое изображено на рисунке 6.97. Выберите только верхний инструмент Top Die.

По оси X (X – Axis) откладывается перемещение верхнего бойка (Stroke), а по оси Y (Y – Axis) усилие (Y - Load), прикладываемое к верхнему бойку и

необходимое для деформации заготовки. Нажмите .

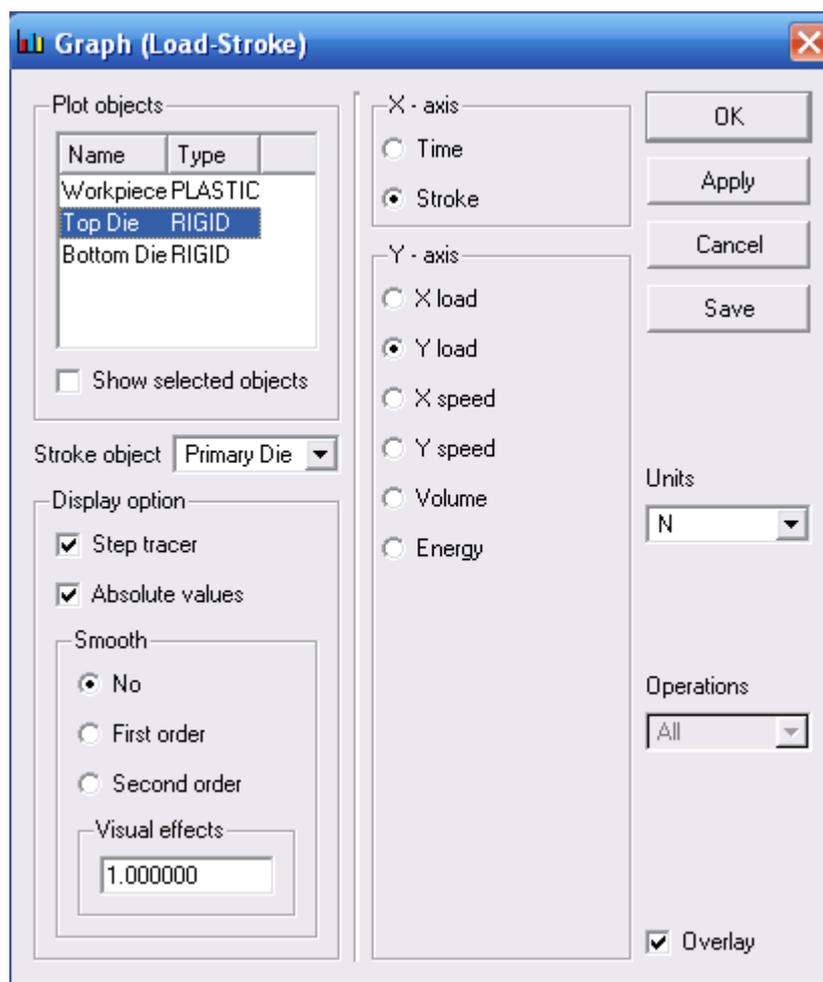


Рисунок 6.97 - Окно построения графиков «Graph (Load-Stroke)»

В основном окне появится график, изображенный на рисунках 6.98 и 6.99. Графики должны дублироваться в двух окнах постпроцессора.

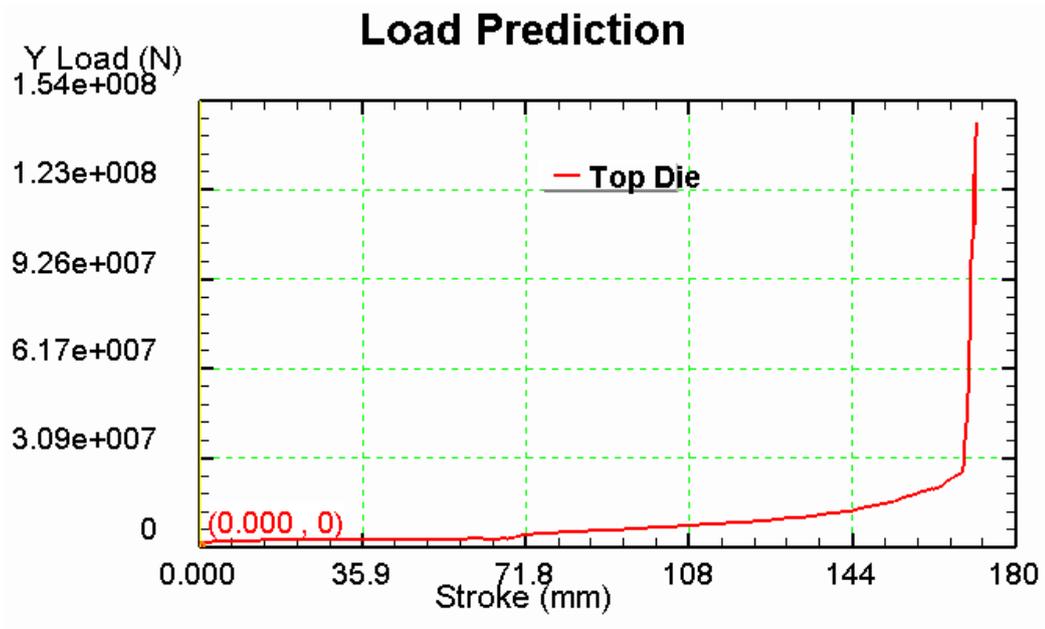


Рисунок 6.98 - График усилия открытой штамповки в зависимости от перемещения верхней половины штампа

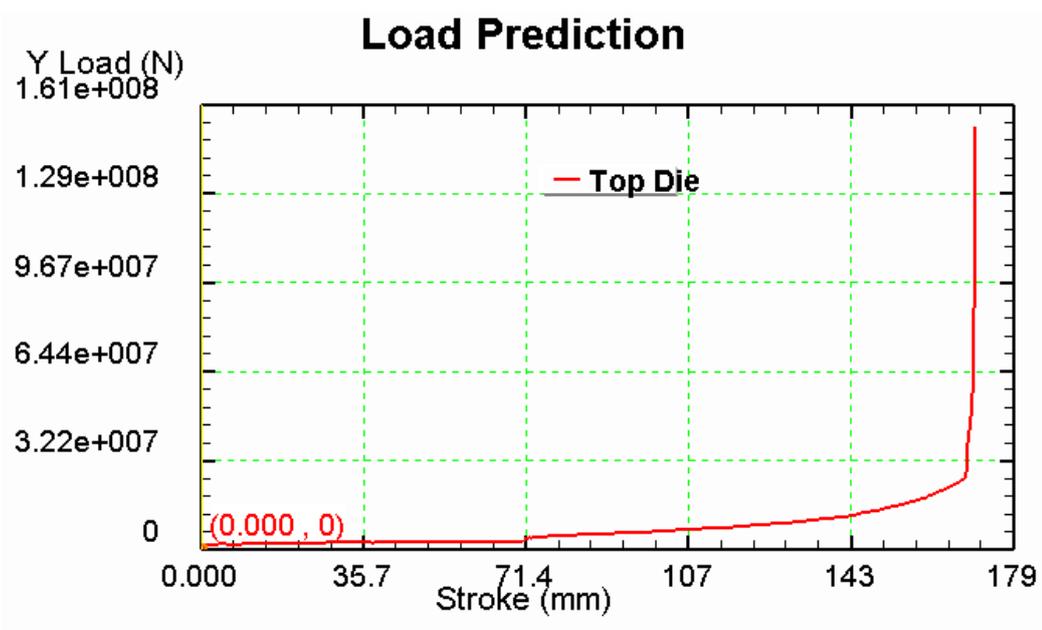


Рисунок 6.99 - График усилия закрытой штамповки в зависимости от перемещения верхней половины штампа

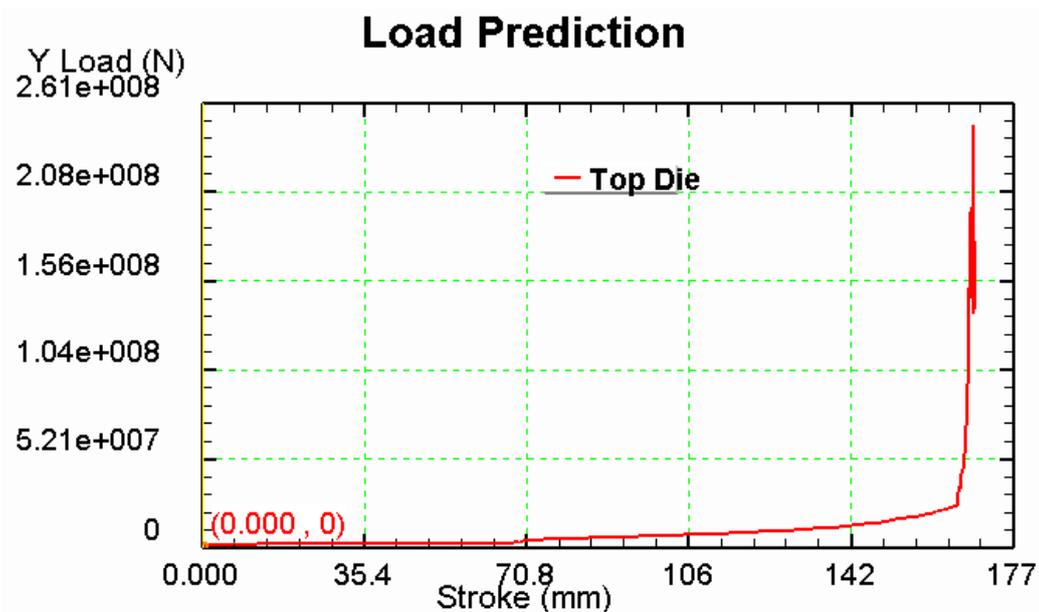


Рисунок 6.100 - График усилия закрытой штамповки в зависимости от перемещения верхней половины штампа при избытке металла

Когда вы посмотрели графический результат, его можно скрыть, для этого в дереве объектов наведите на него курсором, нажмите правую кнопку мыши и выберите «скрыть график» (hide graph), таким же способом его можно опять вывести на показ (show graph). Аналогичным образом можно скрывать другие объекты графики.

Чтобы оценить влияние температуры металла в процессе деформации, необходимо построить температурные диаграммы для обоих случаев. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и выберите раздел Температурных зависимостей (Temperature). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку напротив линейного контура (Line contour). Нажмите  и . Эпюры распределения температурных полей показаны на рисунках 6.101 и 6.102.

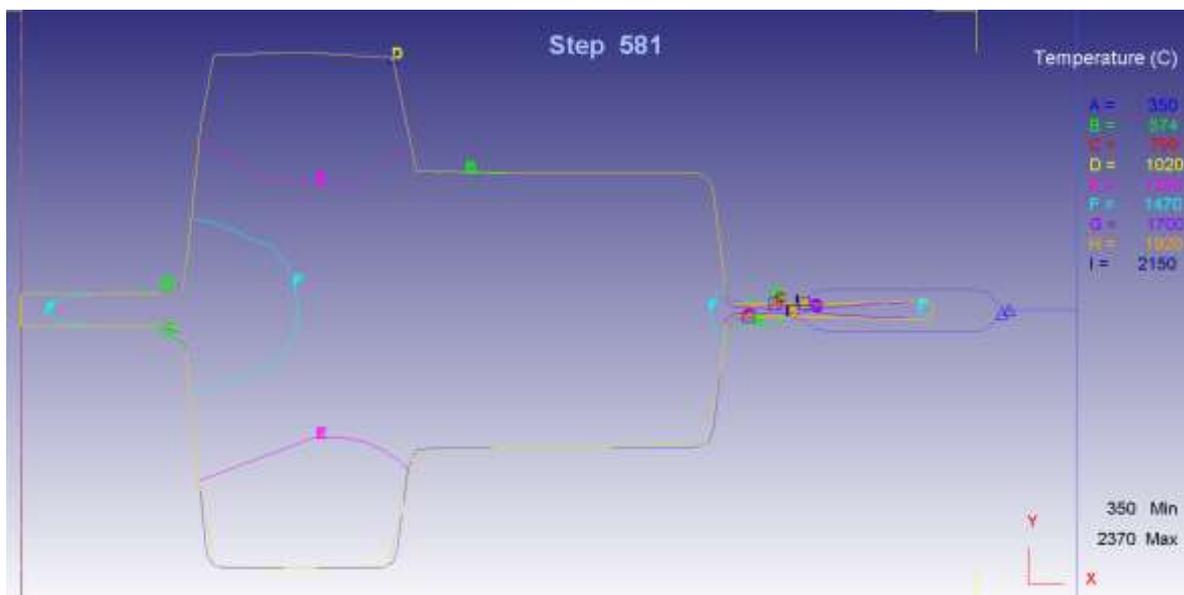


Рисунок 6.101- Эпюры распределения температурных полей процесса открытой штамповки

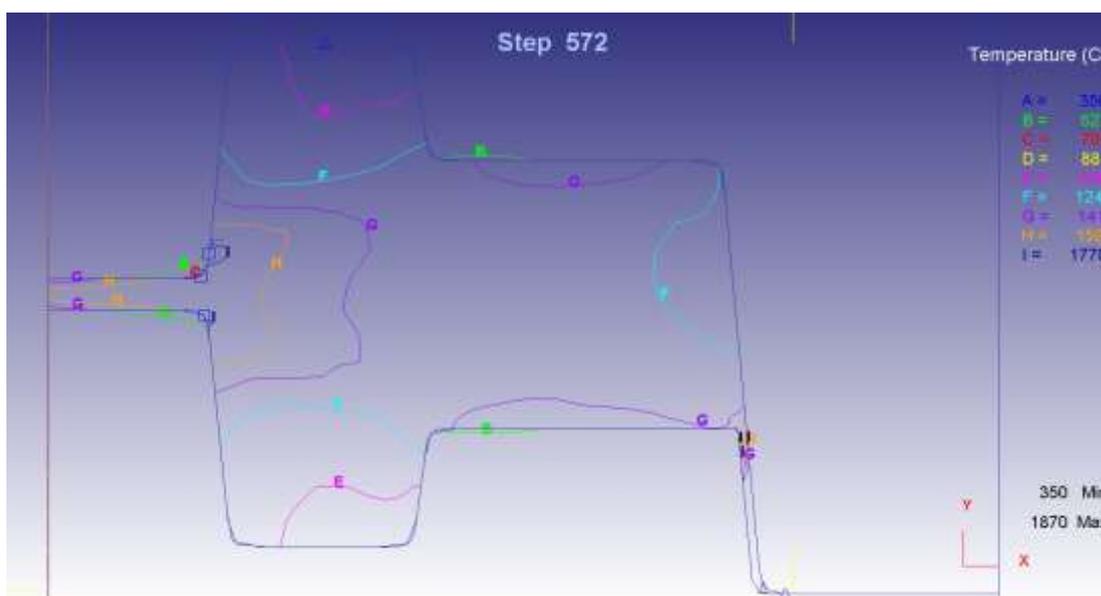


Рисунок 6.102 - Эпюры распределения температурных полей процесса закрытой штамповки

Для определения качественного изменения интенсивности деформации вы должны построить эпюры интенсивности деформации.

Откройте окно построения диаграмм, и в разделе Деформации (Strain) поставьте галочку напротив эффективных деформаций (Effective). Справа от списка построений есть список отображения зависимостей, поставьте галочку

напротив линейного контура (Line contour). Нажмите  и . Посмотрите поэтапно, как накапливается деформация в заготовке (рисунки 6.103 и 6.104).

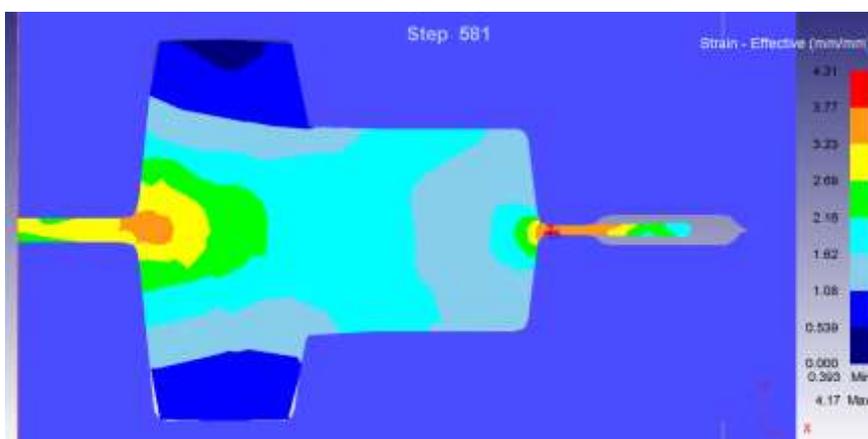
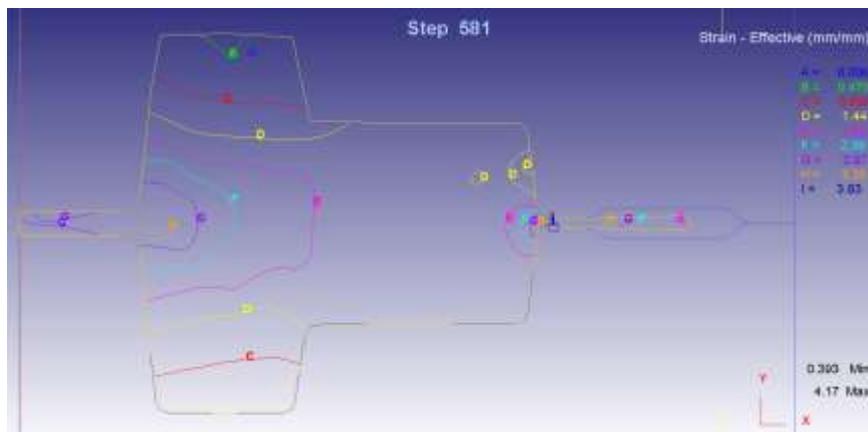
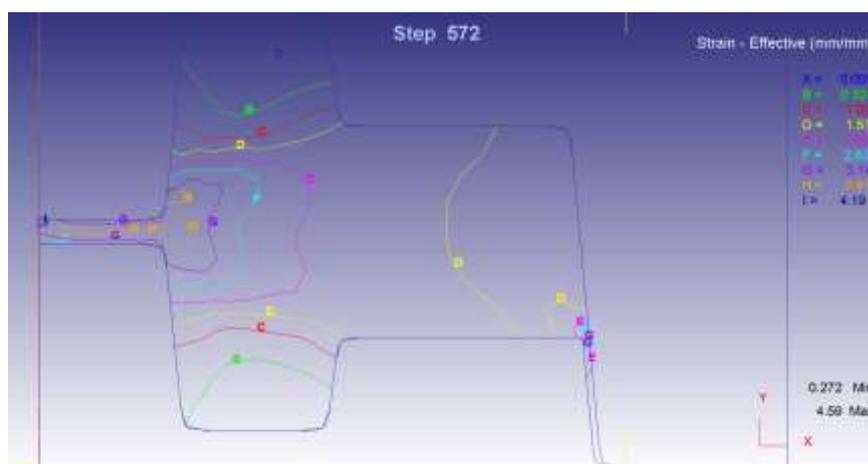


Рисунок 6.103 - Интенсивность деформации процесса открытой штамповки



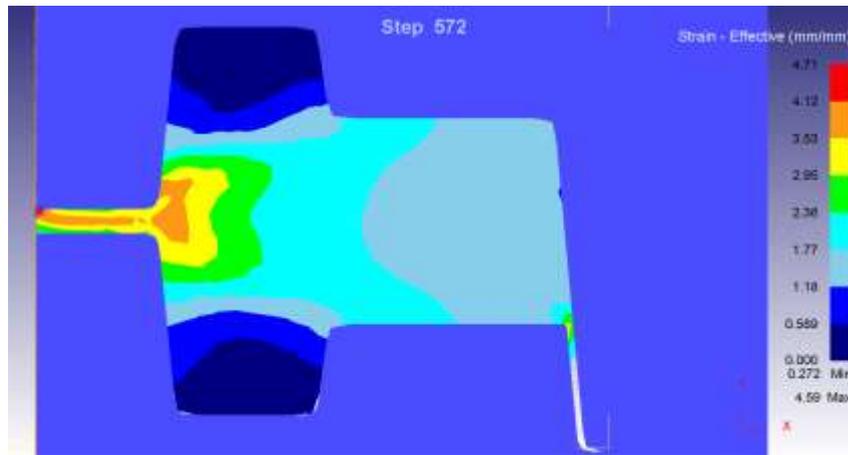


Рисунок 6.104 - Интенсивность деформации процесса закрытой штамповки

Аналогично построению эпюр интенсивности деформаций, постройте эпюры для интенсивности напряжений (Stress – Effective) (рисунки 6.105 и 6.106).

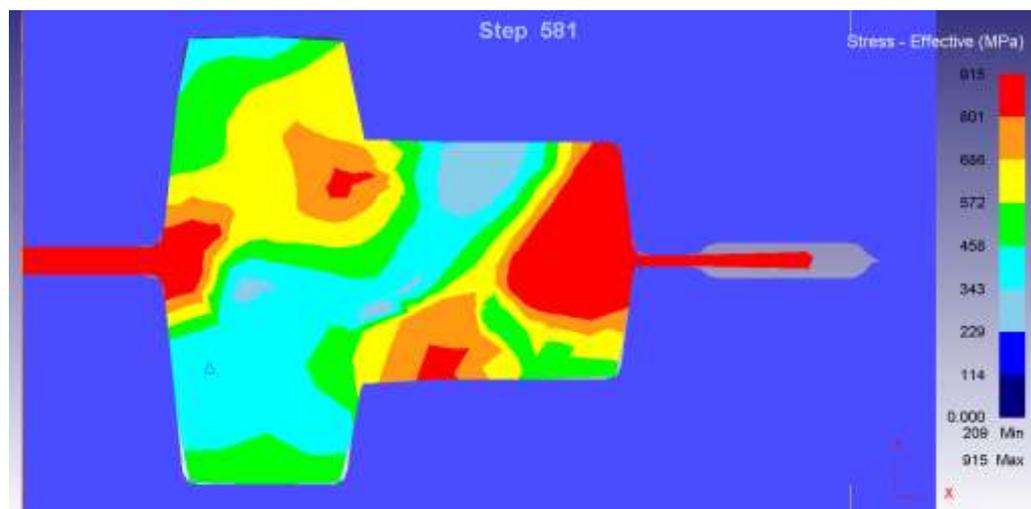
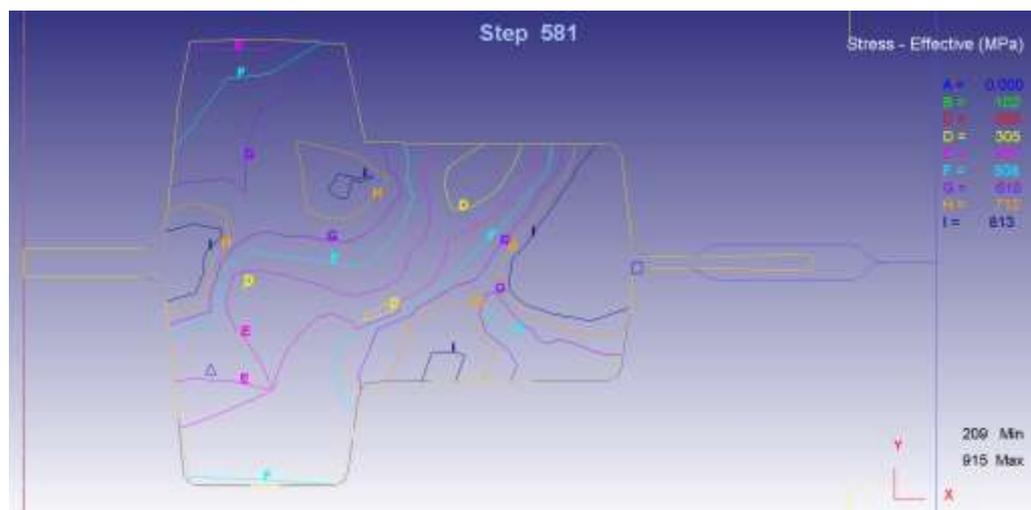


Рисунок 6.105 - Эпюра интенсивности напряжений процесса открытой штамповки

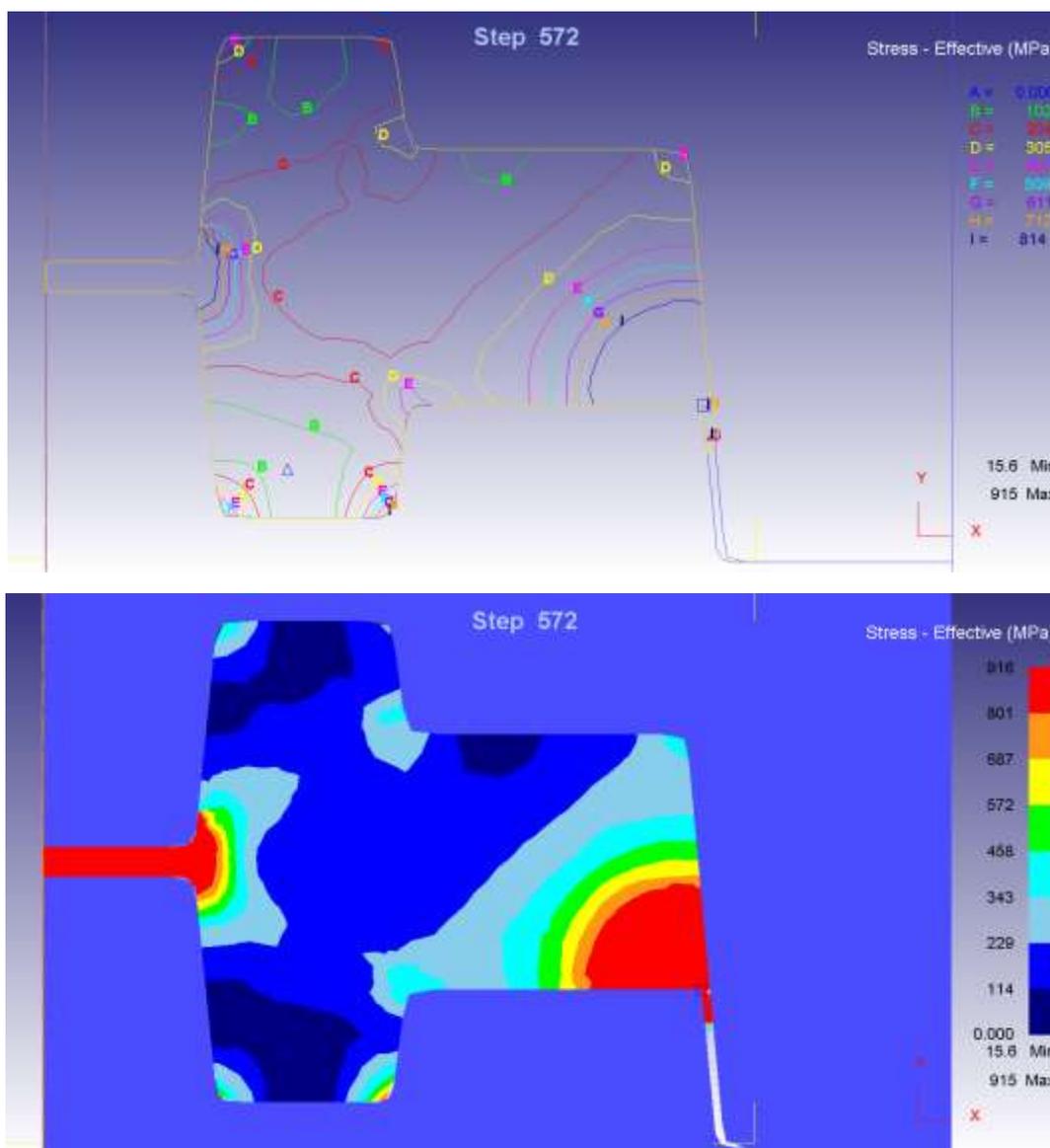


Рисунок 6.106 - Эпюра интенсивности напряжений процесса закрытой штамповки

Постройте диаграммы, показывающие области возможного разрушения изделия. Для этого кнопкой  откройте окно построения диаграмм, и выберите раздел Разрушение (Damage). Нажмите  и . Диаграммы областей возможного разрушения заготовки показаны на рисунках 6.107 и 6.108.

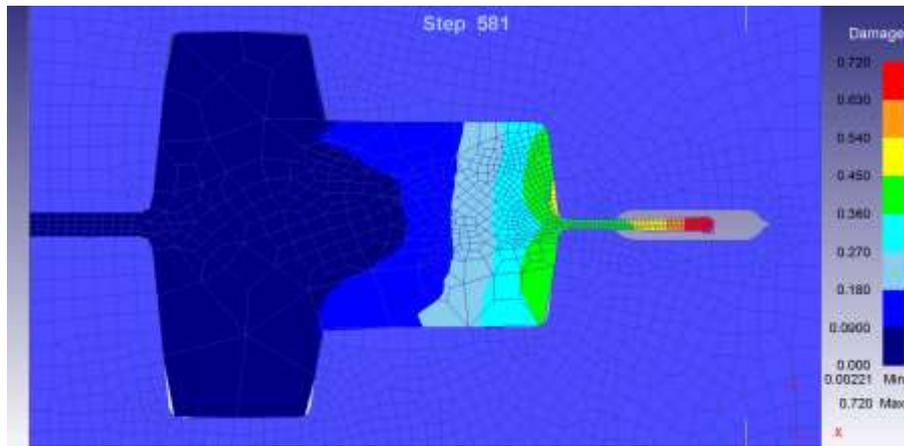


Рисунок 6.107 - Диаграмма областей возможного разрушения заготовки в открытом штампе

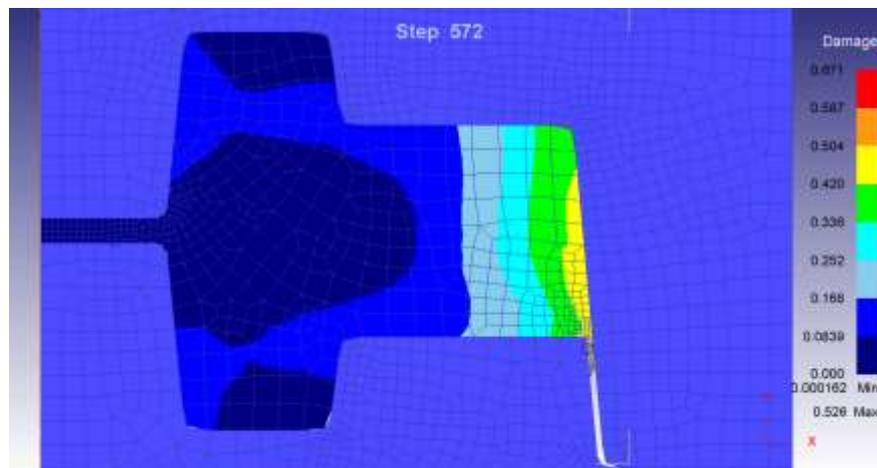


Рисунок 6.108 - Диаграмма областей возможного разрушения заготовки в закрытом штампе

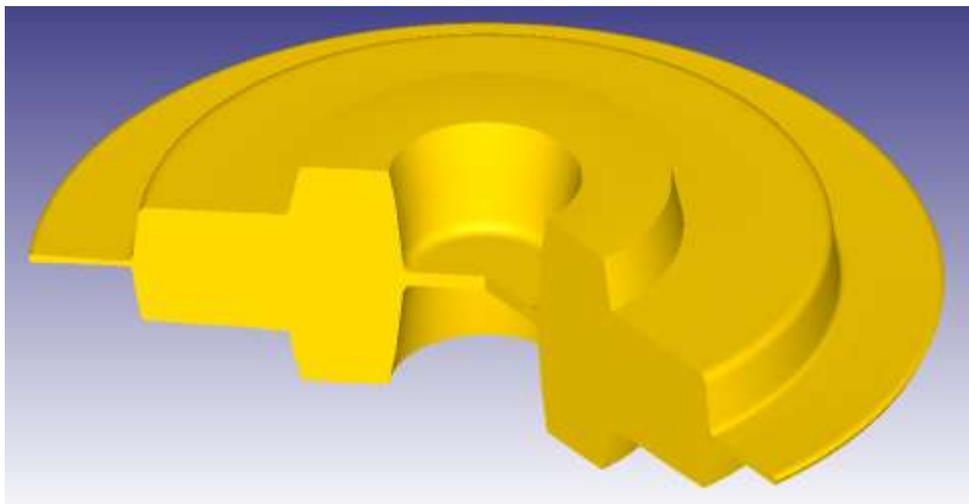


Рисунок 6.109 – 3D-модель заготовки после штамповки

## Содержание отчёта

1. Стадии открытой и закрытой штамповки.
2. График усилия штамповки в зависимости от перемещения верхнего бойка.
3. Распределение интенсивности деформаций.
4. Распределение интенсивностей напряжений.
5. Процесс деформации координатной сетки.
6. Эпюры распределение температурных полей.
7. Диаграммы областей возможного разрушения заготовки.

## Контрольные вопросы

1. Чем отличается открытая штамповка от закрытой?
2. Назовите стадии при штамповке кольцевых поковок в открытых штампах.
3. Назовите стадии при штамповке кольцевых поковок в закрытых штампах.
4. Какие преимущества и недостатки процессов штамповки в открытых и закрытых штампах?
5. Как изменяется усилие в процессах открытой и закрытой штамповки?
6. Какой закон трения используется в расчете процесса?
7. Как задаются граничные условия?
8. Как задать дистанцию между верхней и нижней половиной штампа, при которой необходимо закончить расчет?
9. Как построить график усилия?
10. Как построить диаграмму областей возможного разрушения заготовки?

## 6.4 Проектирование технологии изготовления поковки на молотах

Цель работы: ознакомление с алгоритмом расчета задачи неизотермической штамповки поковки на молоте в программе DEFORM-2D.

### Краткие теоретические сведения

При изготовлении технологического процесса изготовления поковки на молотах необходимо:

- сконструировать поковку по готовой детали и рассчитать ее массу;
- определить температурный интервал штамповки;
- определить способ штамповки (штамповка перпендикулярно оси заготовки или вдоль ее оси), а также группу, к которой принадлежит поковка по классификации молотовых поковок;
- выбрать переходы штамповки;
- определить массу, форму и размеры заготовки с учетом отходов;
- сконструировать ручки и выполнить чертеж штампа;
- определить массу падающих частей штамповочного молота и выбрать молот, число ударов на молоте для получения качественной поковки;
- выбрать способ удаления облоя и перемычек и спроектировать для этой операции штамп;
- предложить по необходимости отделочные операции; правку, калибровку, удаление окалины, зачистку заусенцев и т.д.;
- составить технологическую карту штамповки.

Температурный интервал штамповки определяют по диаграммам пластичности, кривым течения, диаграммам сопротивления деформации, состояния и рекристаллизации. Высокие механические свойства и меньшая анизотропия свойств получаются при суммарной деформации сплавов 65-75%. Поэтому в случае обработки давлением слитков на заготовки суммарная степень деформации должна быть минимальной. По диаграммам рекристаллизации необходимо учитывать критическую степень деформации

(12-15%). Поэтому штамповку проводят при больших обжатиях, исключая рекристаллизацию с образованием крупного зерна. Допустимую степень деформации за основной ход машины определяют по диаграммам пластичности [64].

В лабораторной работе будет исследована возможность изучения технологического процесса штамповки поковки из алюминиевого сплава с учетом влияния температуры на технологический процесс.

При моделировании технология изготовления поковки будет включать в себя следующие операции:

- 1) Нагрев заготовки в печи при  $t=570^{\circ}\text{C}$
- 2) Перенос заготовки из печи в штамп
- 3) Установка заготовки в нижнем штампе
- 4) Осадка
- 5) Перенос заготовки в чистовой ручей
- 6) Штамповка в открытом штампе.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Моделирование нагрева заготовки

Подготовка данных

Создайте новую задачу.

Войдите в меню **Настройки задачи**  и убедитесь в том, что в качестве системы измерения выбрана система "Сн" (рисунок 6.110).

В поле "Режим" напротив надписи "Теплопередача" поставьте флажок. В окне **Настройки задачи** на закладке **Условия процесса**  Условия процесса установите температуру окружающей среды  $570^{\circ}\text{C}$ . Нажмите левой кнопкой мыши **ОК** для подтверждения задания исходных параметров настройки задачи.

На закладке **Общее**  Общее, которая расположена на **Панели инструментов**, нажмите ЛКМ на кнопку **Задать температуру**  Задать температуру... и введите температуру заготовки  $20^{\circ}\text{C}$  (рисунок 6.111).

Постройте с помощью геометрических примитивов цилиндрическую заготовку с размерами  $W=50\text{мм}$ ,  $H=250\text{мм}$  (см. лабораторную работу №2).

Создайте на заготовке сетку из 1000 элементов.

Задайте в качестве материала заготовки сплав AL1100.

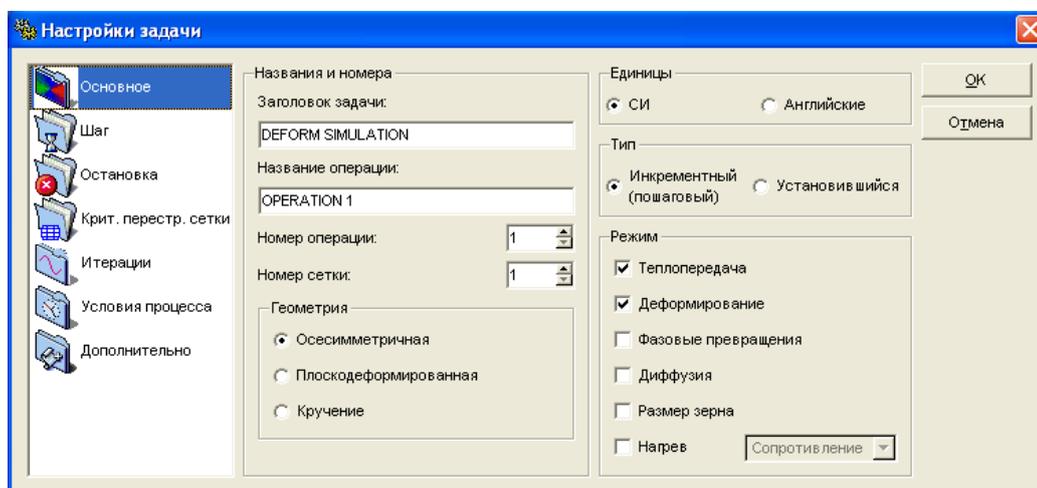


Рисунок 6.110 - Окно **Настройки задачи**

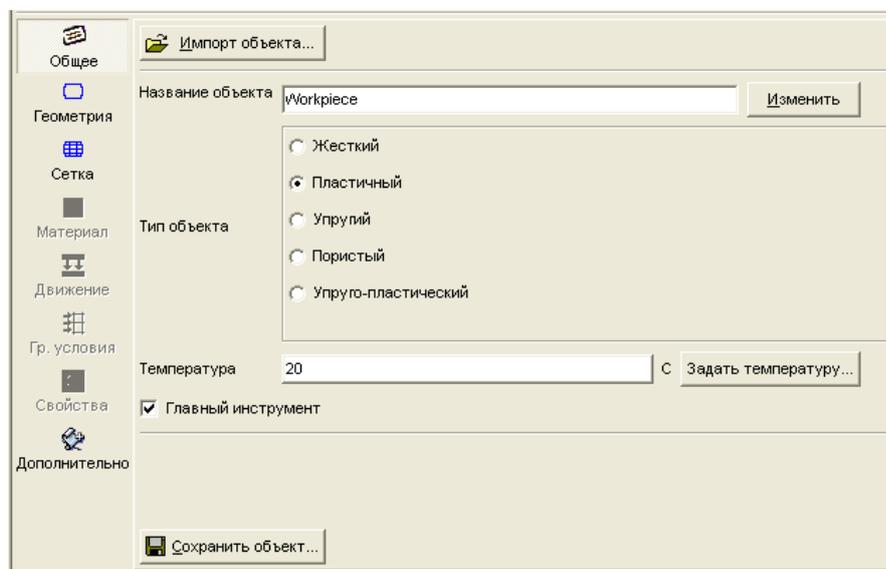
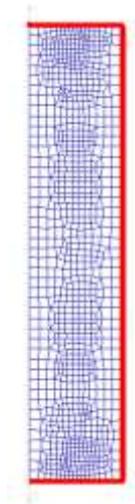


Рисунок 6.111- Окно пункта **Общее**

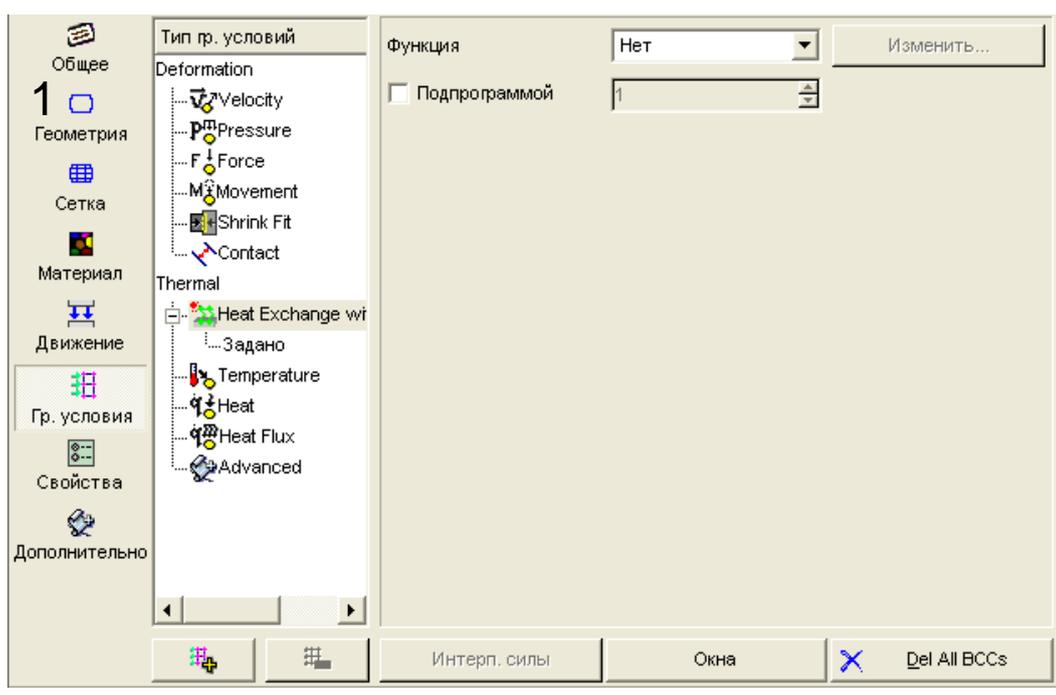
В пункте **Граничные условия**  укажите надпись **“Heat Exchange with Environment”**. Данная команда позволяет определить поверхность, по которой осуществляется теплообмен с окружающей средой.

Последовательно укажите левый нижний угол точно 1 и левый верхний

угол точно 2 сечения заготовки рисунок б., лежащие на оси симметрии. Узлы сетки КЭ, расположенные на поверхности заготовки между указанными точками, будут подсвечены красным цветом. Для ввода указанной поверхности нажмите ЛКМ кнопку **Задать**  (рисунок 6.112).



а)



б)

а) Окно **Display**, б) Панель **Инструментов**

Рисунок 6.112 - Вид заготовки после задания поверхности теплообмена

Нажмите на кнопку **Настройка задачи**  и перейдите к закладке **ШАГ**. В рассматриваемой операции нет деформирования заготовки, поэтому шаг расчета целесообразно задать по времени, для этого напротив надписи “**With**

**Equal Time Increment**” надо поставить флажок. Укажите шаг расчета 10 сек, а число шагов равным 100 с сохранением через каждые 10 шагов, что эквивалентно 1000 секундам нагрева в конвекционной печи.

Создайте базу данных, выйдите из препроцессора и запустите задачу на расчет.

По окончании расчета запустите постпроцессор.

Для вывода интересующих данных полученных в результате расчета используется команда **Параметры** , которая позволяет вызвать окно **Параметры** рисунок 6.113.

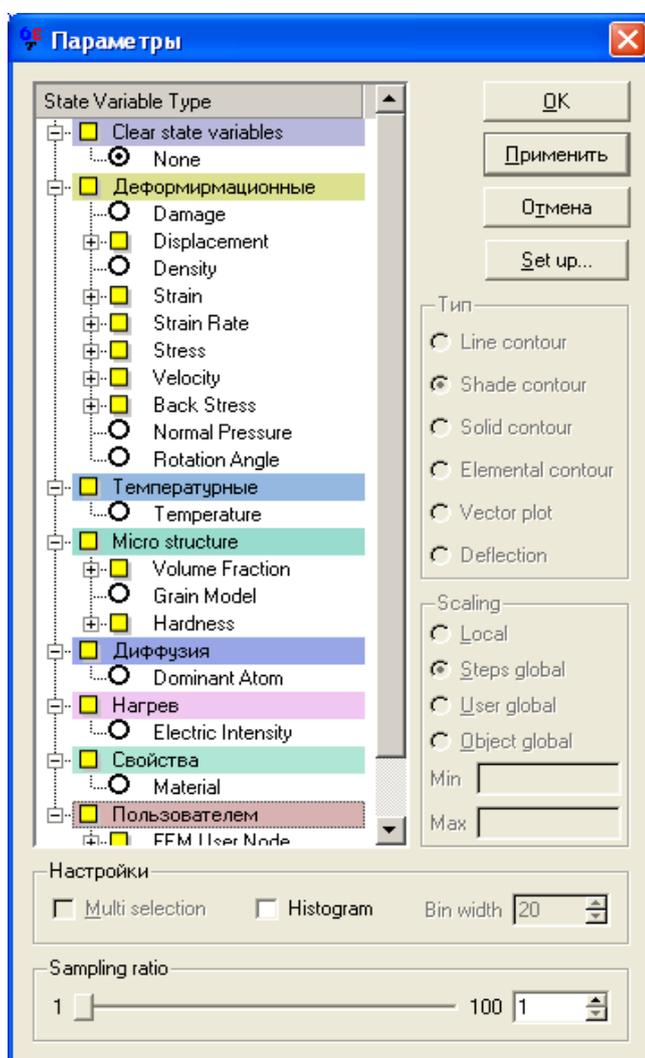


Рисунок 6.113 -. Окно Параметры

Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры**. В появившемся окне **Параметры**

поставьте ЛКМ флажок напротив параметра **Temperature**. Нажмите кнопку **Применить**. Обратите внимание на появление шкалы в правой части окна дисплея. Нажав на кнопку расположенную в левой части экрана



. Из списка выберите надпись **step 100** (шаг 100). Обратите внимание на то что заготовка вся красная по умолчанию в программе установлены настройки в соответствии с которыми температура заготовки на каждом из рассматриваемых шагов показано относительно своего наибольшего и наименьшего значения. Об этом свидетельствует флажок установленный напротив надписи **step global** в пункте окна параметры **scaling**.

Список наиболее часто используемых при исследовании задач обработки металлов давлением параметров представлен в таблице 6.7.

Таблица 6.7 - Параметры процессов ОМД

Величина	Перевод	Параметр	Перевод
Stain	Деформация	Effective	Интенсивность
Stain Rate	Скорость деформации	Mean	Среднее значение
Stress	Напряжение	Max Principal	Главное наибольшее
Velocity	Скорость	Min Principal	Главное наименьшее
Temperature	Температура	X/R	Действующее в направлении X в декартовой системе координат или R если система координат полярная

Для просмотра интересующего параметра его необходимо указать в окне **Параметры** и нажать ЛКМ на кнопку **Применить**. После этого используя кнопки изменения шага можно отследить изменение рассматриваемого параметра по мере протекания процесса деформирования заготовки.

Установите флажок напротив надписи **local** в области **scaling** окна **Параметры** нажмите кнопку **Применить**. В окне дисплея появится

изображение с распределением температур для **step 100**. Убедитесь в том, что задача рассчитана верно. Температура должна изменяться в пределах 444-450°C (рисунок 6.114).

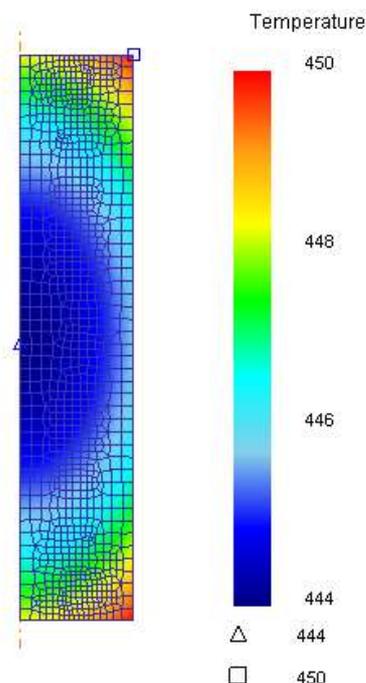


Рисунок 6.114 - Вид заготовки после нагрева

Для того, что бы определить какие части заготовки нагрелись более 400°C, в области **scaling** установите флажок напротив надписи **user global**. Обратите внимание на то, что в нижней части обложки **scaling** станут активными окна **Min** и **Max**, в окне **Min** введите значение 400°C. Вся заготовка приобрела оранжево-красный цвет. Для более удобного зрительного восприятия градации температур в области **Тип** окна параметра поставьте флажок напротив надписи **solid contour** обратите внимание на то, что заготовка вся станет красная, что свидетельствует о том что вся она нагрелась до диапазона температур 444–450 °C. Поставьте флажок в области **Тип** напротив надписи **line control** нажмите кнопку **Применить** обратите внимание на то, что в центральной части заготовки есть область имеющая температуру 444°C в то время как остальная область нагрета выше этой температуры. Заметьте также то, что область с наименьшей температурой показана на заготовке треугольником , в то время как область наибольшей температурой показана

на заготовке квадратом .

Выйдите из постпроцессора.

### Расчет переноса заготовки из печи в штамп

Загрузите рассматриваемую задачу с последнего шага в препроцессоре.

В окне **Настройки задачи** на закладке **Условия процесса** установите температуру окружающей среды 20°C.

На закладке **ШАГ** установите размер шага по времени таким образом, чтобы время переноса заготовки соответствовало 4 секундам, а число шагов было равно 50.

Создайте базу данных, выйдите из препроцессора и рассчитайте задачу.

5. Загрузите задачу в постпроцессоре. Дайте оценку полученным результатам и сравните с рисунок 6.115.

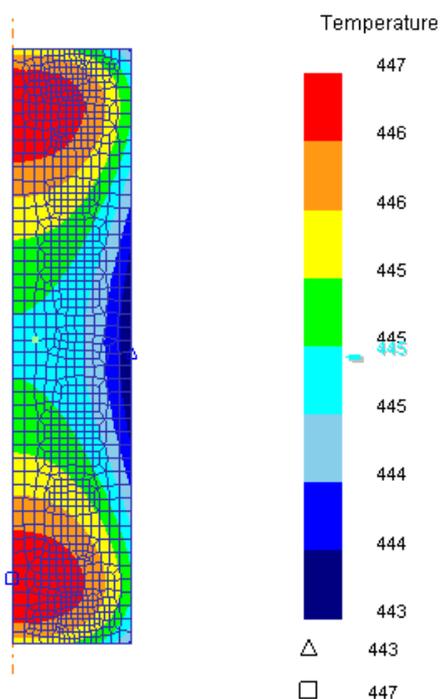


Рисунок 6.115 - Вид заготовки после переноса

### Охлаждение заготовки на штампе

Загрузите рассчитанную ранее задачу с последнего шага.

Добавьте нижний инструмент и измените его название на Bottom.

Установите тип объекта ”жесткий” и на закладке **Общее** задайте температуру нижнего инструмента равную 70°C.

С помощью геометрических примитивов постройте нижний боек с размерами W=120мм и H=80мм.

Постройте сетку КЭ на нижнем инструменте содержащую 300 элементов.

С помощью команды **Интерференция**  расположите нижний инструмент как показано на рисунке 6.116.

Создайте контактное взаимодействие между инструментом и заготовкой. При задании свойств контактной пары не забудьте указать коэффициент теплообмена между заготовкой и инструментом. Для расчета примите, что трение подчиняется закону Кулона (Coulomb), коэффициент трения равным 0.3, а коэффициент теплообмена 11 (рисунок 6.117) Задайте материал нижнего инструмента в папке steel AISI 4120.

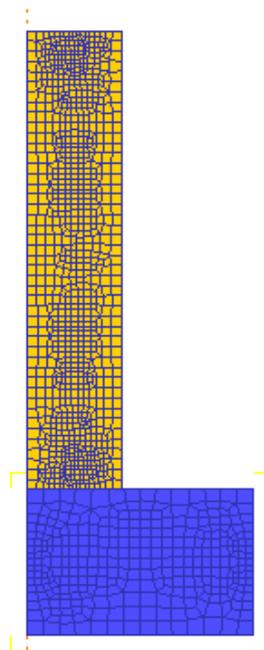


Рисунок 6.116 - Вид заготовки после создания поверхности теплообмена

В окне **Настройки задачи** установите шаг расчета задачи по времени 0.1 секунды и число шагов 50. Сохранить результат расчета необходимо через каждый 5 шаг.

Создайте базу данных и запустите задачу на расчет.

По окончании расчета загрузите задачу в постпроцессоре. Результат расчета последнего шага дан на рисунке 6.118.

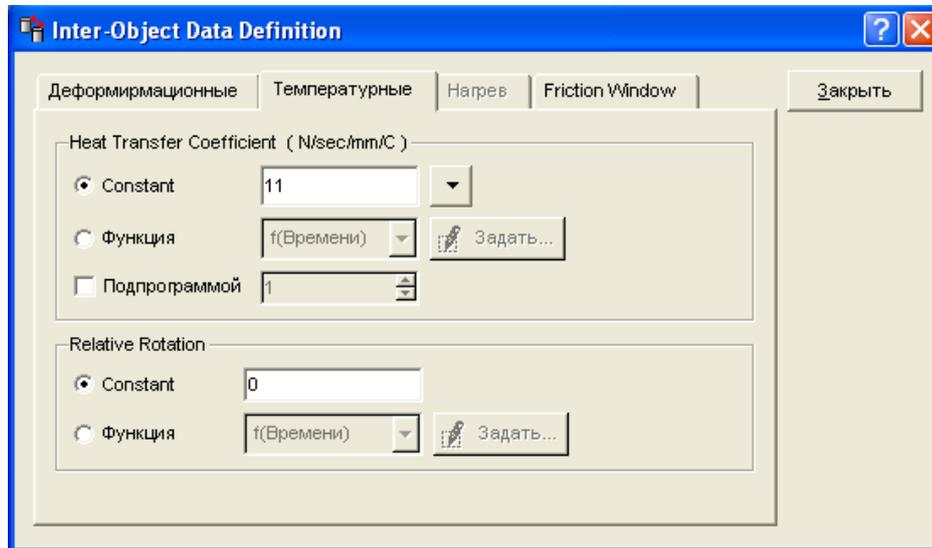


Рисунок 6.117 - Задание условий теплообмена в контактной паре

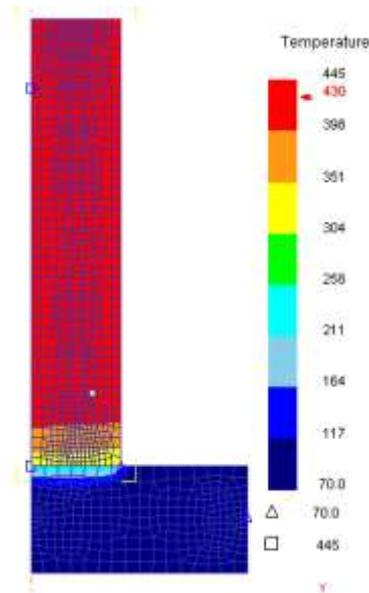


Рисунок 6.118 - Вид заготовки после установки на штамп

### Осадка заготовки на прессе

Загрузите рассматриваемую задачу с последнего шага в препроцессоре.

Добавьте в **Дерево объектов** новый объект переименовав его Top Die и постройте для него геометрию с помощью геометрических примитивов с

размерами  $W=120$  мм и  $H=60$  мм. Сделайте верхний инструмент главным и задайте температуру инструмента равную  $20^{\circ}\text{C}$ .

Постройте сетку КЭ на верхнем инструменте, содержащую 300 элементов.

Задайте материал верхнего инструмента в папке steel AISI 4120.

Расположите верхний инструмент относительно заготовки с помощью команды **Интерференция**.

Вызовите окно **Взаимодействия объектов**. С помощью кнопки **Добавить**  создайте новую контактную пару. В качестве главного объекта (**Master**) укажите верхний боек, качестве подчиненного объекта (**Slave**) – заготовку. Укажите параметры взаимодействия объектов (коэффициент трения равный 0.3 и коэффициент теплоотдачи равный 11).

Задайте движение верхнего инструмента со скоростью 1 мм/с с помощью пункта **Движение**  расположенную на **Панели инструментов**.

Задайте шаг расчета по перемещению. Рассчитайте его размер (1/3 часть наименьшего ребра сетки КЭ). Укажите число шагов, которое необходимо рассчитать из условия, что верхний боек должен переместиться на 30 мм. Сохранять задачу необходимо через каждые 10 шагов.

Сгенерируйте базу данных, закройте препроцессор и выполните расчет задачи.

Сравните полученные результаты с тем, что представлено на рисунке 6.119.

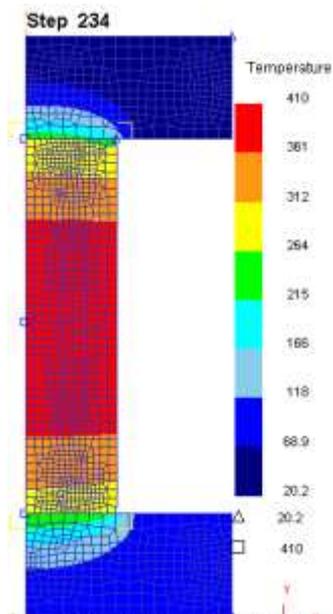


Рисунок 6.119 - Вид заготовки после осадки

### Моделирование процесса переноски между ручьями

Загрузите рассматриваемую задачу с последнего шага в препроцессоре.

Удалите верхний и нижний бойки.

Сделайте главным инструментом заготовку.

Задайте шаг по времени 0,1 сек и число шагов 30, что эквивалентно 3 секундам.

Создайте базу данных и выполните расчет задачи.

Откройте рассматриваемую задачу в постпроцессоре и сравните результаты расчета с тем, что представлено на рисунке 6.120.

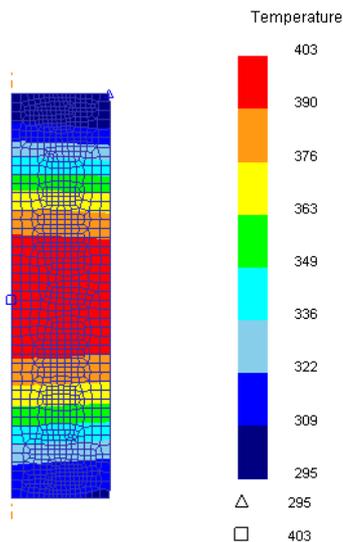


Рисунок 6.120 - Вид заготовки после переноса с осадки на штамповку

### Моделирование штамповки

Загрузите рассматриваемую задачу в препроцессоре. Создайте верхний и нижний инструмент.

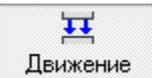
Постройте геометрию в CAD-системе по данным, приведенным на рисунке 6.121, и экспортируйте её в формате “igs” в DEFORM-2D.

Проверьте корректность построения геометрии объектов.

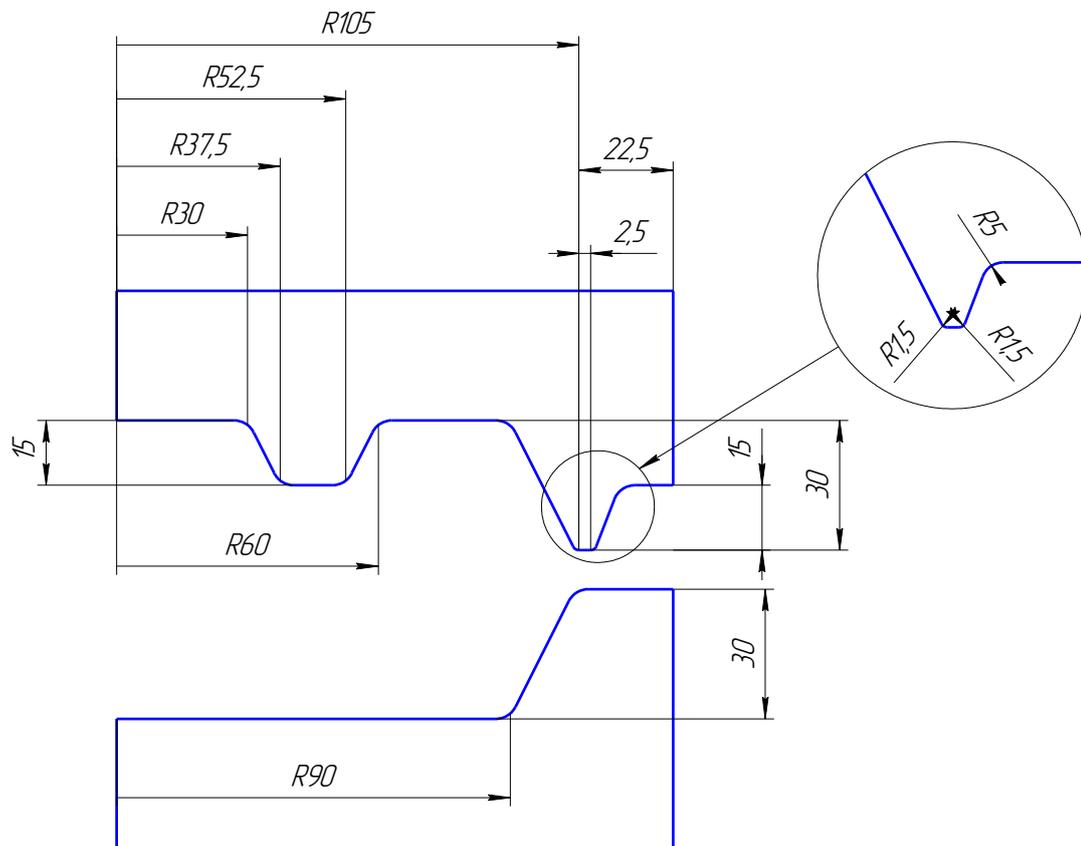
Задайте температуру инструментов 50°C.

Постройте сетку на инструментах, состоящую из 300 КЭ и расположите их так, как это показано на рисунке 13. Задайте контактные взаимодействия между объектами.

Укажите параметры взаимодействия объектов (коэффициент трения равный 0.3 и коэффициент теплоотдачи равный 11).

Задайте движение верхнего инструмента со скоростью 1 мм/с с помощью пункта **Движение**  расположенного на **Панели инструментов**.

Укажите параметры взаимодействия объектов (коэффициент трения равный 0.3 и коэффициент теплопередачи равный 11). Создайте контактные взаимодействия между объектами. Задайте движение верхнего инструмента со скоростью 1 мм/с.



### 1. Неуказанные радиусы 5 мм

Рисунок 6.121. Данные для построения верхнего и нижнего инструментов

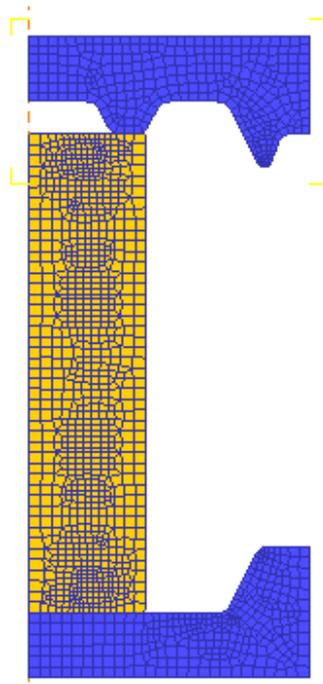


Рисунок 6.122 - Вид заготовки после позиционирования

Задайте шаг расчета задачи по перемещению. Рассчитайте минимально необходимое количество шагов так, чтобы расчет остановился в момент, когда расстояние между верхним и нижним штампом составит 3 мм.

Удвойте минимально необходимое количество шагов и введите в соответствующую ячейку с количеством шагов расчета.

Не выходя из окна **Настройки задачи** перейдите на закладку **Остановка**. На закладке **Расстояние между инструментом**, в поле **Инструмент 1** выберите объект **Top Die**, затем ЛКМ укажите в окне **Display** правый нижний угол верхнего инструмента (рисунок 6.123).

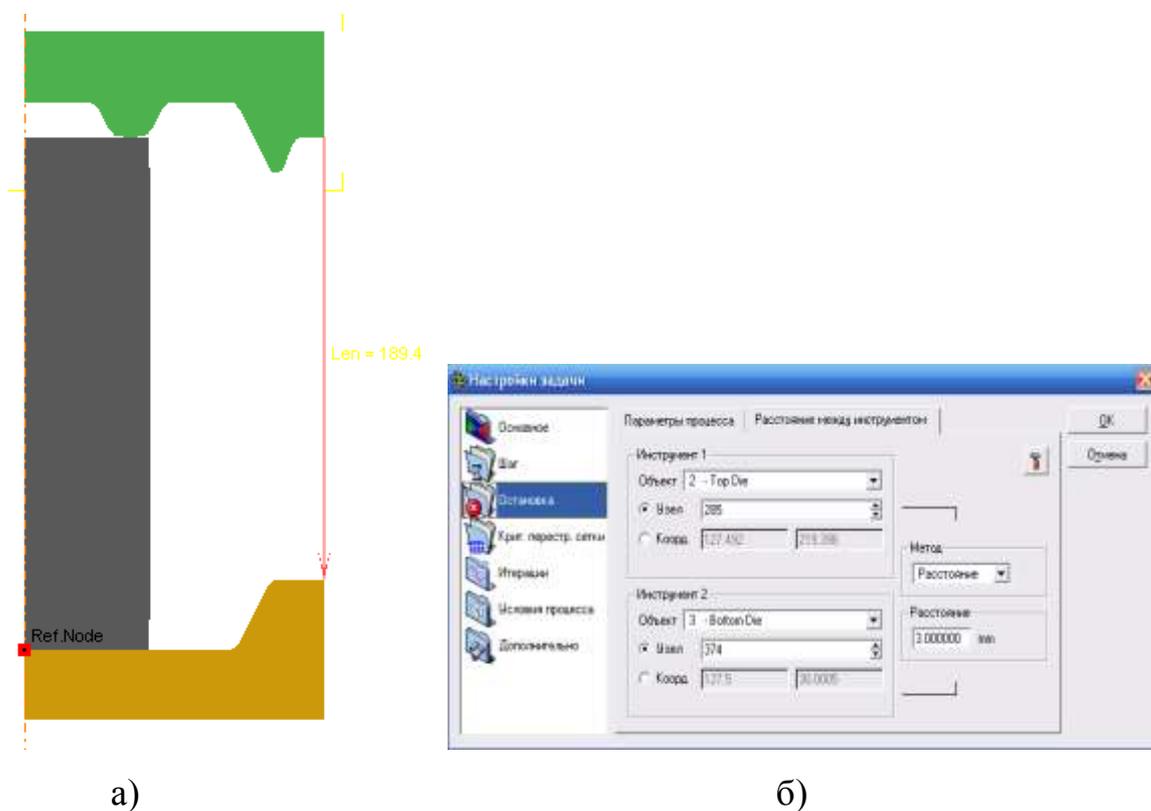


Рисунок 6.123 - Задание критериев остановки расчёта

В поле **Инструмента 2** выберите объект **Bottom Die** и укажите в окне **Display** правый верхний угол нижнего инструмента. Изображение в окнах **Display** и **Настройки задачи** примет вид показанный на рисунке 6.123.

Создайте базу данных и выполните расчет.

Запустите рассчитанную задачу в постпроцессоре. Результат расчета последнего шага приведен на рисунке 6.124.

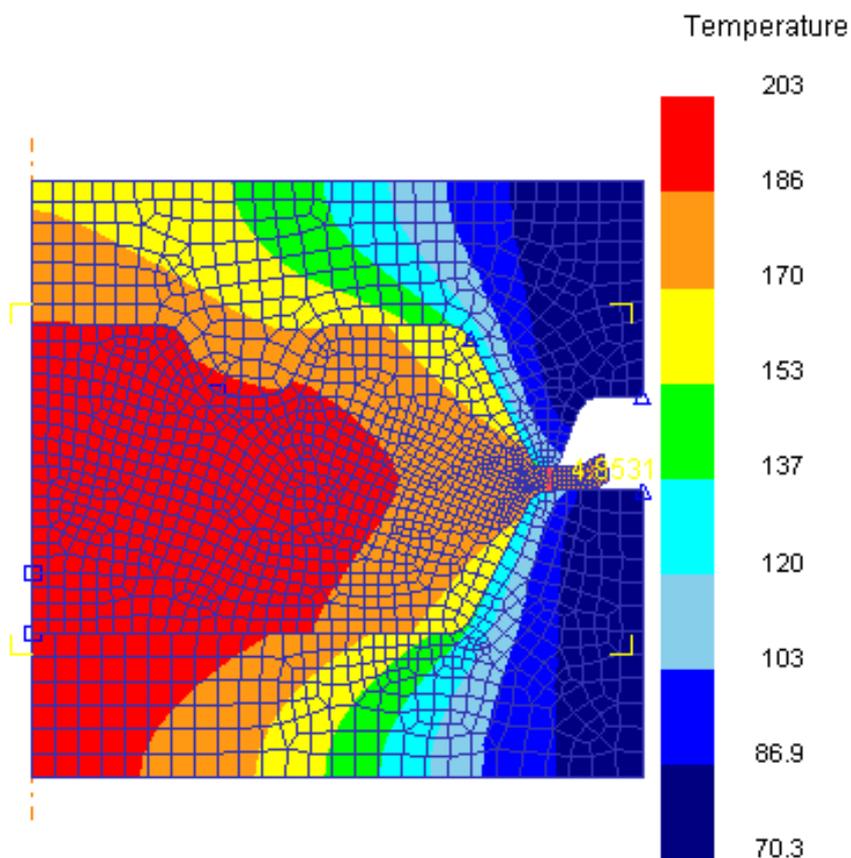


Рисунок 6.124- Результат расчета процесса штамповки

Дайте оценку полученным результатам.

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MSWord и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Анализ полученных результатов моделирования.
5. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение ручьев в штампах.
2. Как выбрать температурный интервал штамповки.
3. Что собой представляет перегрев и пережог?
4. Перечислите основные технологические операции при горячей объемной штамповке.
  5. Какие технологические операции относят к отделочным?
  6. По каким диаграммам находят допустимую степень деформации.
    7. Как импортировать геометрию в DEFORM-2D?
    8. Как изменить систему измерения в DEFORM-2D?
    9. С помощью какой кнопки осуществляется вызов окна Построение геометрических примитивов?
      10. Какие способы позиционирования объектов Вы знаете?
      11. Зачем нужна автоматическая корректировка геометрии?
      12. В чем отличие файла с расширением "bd" от файла с расширением "key"?

## 7 ЛИСТОВАЯ ПРОКАТКА

### 7.1 Условия захвата заготовки валками

Цель работы: изучение и углубление знаний по исследованию деформации металла заготовки в начальный момент при захвате валками и установившегося процесса прокатки; приобретение навыков работы в программном комплексе DEFORM-2D; исследование факторов, влияющих на условия захвата при прокатке.

#### Краткие теоретические сведения

Анализ сил, действующих в начале прокатки между валками и заготовкой (рисунок 7.1), показывает, что со стороны валков на передний конец заготовки действуют радиальные силы  $N$  (нормальные силы) и касательные силы  $T$  (силы трения). Также на заготовку в начальный момент прокатки могут действовать выталкивающая сила  $Q$ , возникающая от действия подающего рольганга, и инерционная (выталкивающая) сила  $U$ , возникающая от действия веса заготовки и препятствующая захвату металла валками [65].

Процесс прокатки обеспечивается наличием сил трения  $T$ , поэтому в процессе прокатки силы трения являются необходимыми (активные силы) и без них процесс прокатки невозможен.

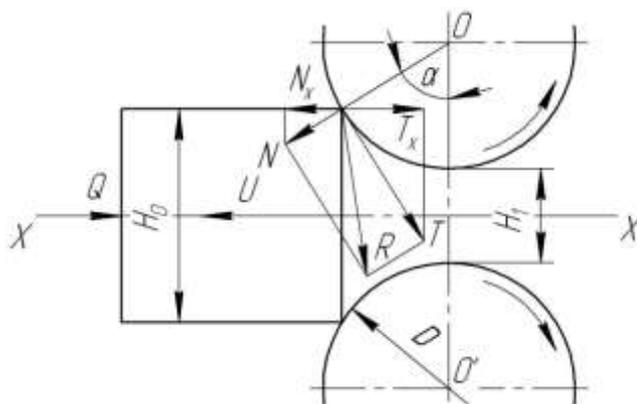


Рисунок 7.1 - Силы, действующие на металл при захвате его валками

Угол  $\alpha$ , образованный направлением действия нормальной силы  $N$  и геометрической осью  $OO'$ , соответствующий углу, при котором осуществляется захват металла силами трения  $T$  и втягивание его в очаг деформации, называется *углом захвата*.

Для анализа условий захвата рассмотрим процесс прокатки, который характеризуется следующими условиями: оба валка приводные, имеют одинаковый диаметр и одинаковое число оборотов; прокатываемый материал однороден в отношении пластических свойств и на него действуют только силы, приложенные от валков ( $Q=U=0$ ).

Из рисунка 1 видно, что горизонтальная составляющая силы трения  $T_x$  стремится втянуть металл в валки, горизонтальная составляющая нормальной силы  $N_x$  препятствует началу прокатки. Отсюда следуют три условия:

- 1) при  $N_x > T_x$  выталкивающие силы больше втягивающих – прокатка невозможна;
- 2) при  $N_x = T_x$  валки будут скользить (буксовать) по металлу – процесс равновесия;
- 3) при  $N_x < T_x$  втягивающие силы больше выталкивающих, металл захватывается валками – прокатка осуществляется [69].

Втягивающую силу  $T_x$  и выталкивающую силу  $N_x$  можно определить из геометрических соотношений (рисунок 1):

$$\begin{aligned} T_x &= T \cos \alpha \\ N_x &= N \sin \alpha \end{aligned} \quad (7.1)$$

Силы трения  $T$  при прокатке связаны с силами нормального давления  $N$  законом Кулона:

$$T = fN \quad (7.2)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

Для осуществления захвата металла валками и начала прокатки необходимо, чтобы  $T_x > N_x$ . Тогда, с учетом (1) и (2) условие захвата металла валками запишется следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha < f \quad (7.3)$$

Таким образом, захват металла валками в начальный момент прокатки произойдет при условии, когда тангенс угла захвата будет меньше коэффициента трения.

Коэффициент трения представляет собой тангенс угла трения:

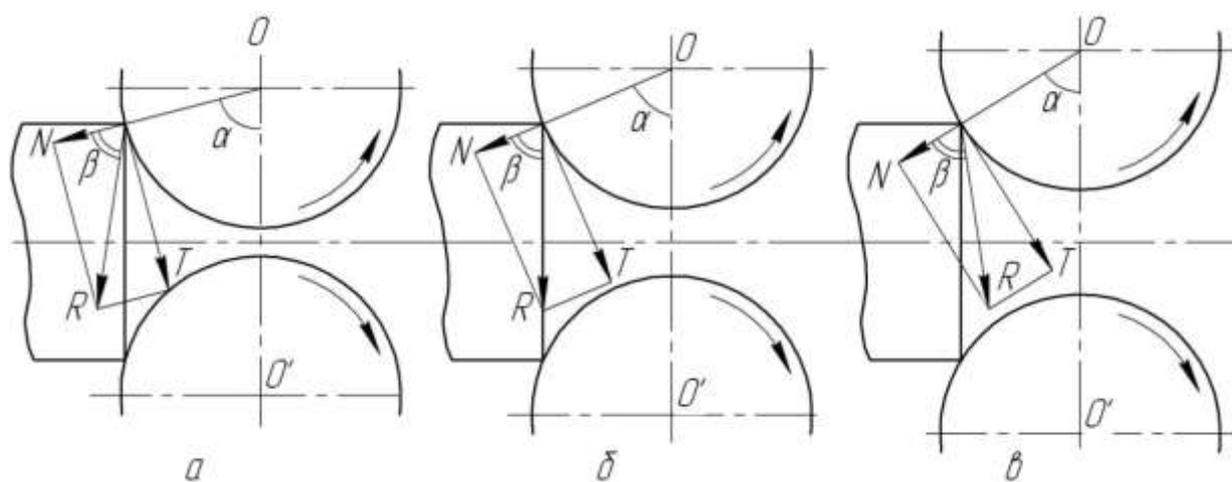
$$f = \operatorname{tg} \beta, \quad (7.4)$$

где  $\beta$  – угол трения. **Угол трения**  $\beta$  образован направлением нормальной силы  $N$  и силы  $R$ , являющейся результирующей (суммарной) для сил  $N$  и  $T$  (рисунок 1).

Из формул (3) и (4) следует, что условие захвата металла валками в начальный момент прокатки можно записать в виде:

$$\alpha < \beta, \quad (7.5)$$

т.е. захват металла валками в начальный момент прокатки произойдет при условии, когда угол захвата будет меньше угла трения.



а – захват невозможен ( $\alpha < \beta$ ); б – состояние равновесия ( $\alpha = \beta$ );

в – захват осуществляется ( $\alpha > \beta$ )

Рисунок 7.2 - Соотношение между углами трения и захвата в начальный момент прокатки

На рисунка 7.2 даны схемы взаимосвязи между углом захвата  $\alpha$  и углом трения  $\beta$ . Из схем видно, что начало прокатки возможно в случае, когда

результатирующая сила  $R$  отклонена от геометрической оси  $OO'$  в сторону направления прокатки, т.е. когда  $\alpha < \beta$ .

Угол захвата  $\alpha$  определяется из геометрических соотношений (рисунок 7.1):

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta H}{D}\right),$$

где  $D$  – радиус рабочих валков (на прокатном стане 300 установлены рабочие валки диаметром 75 мм).

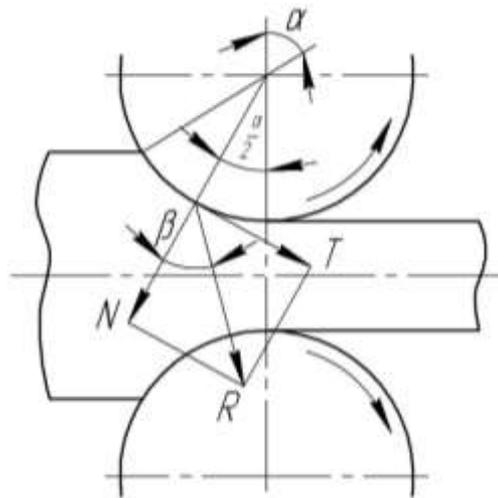


Рисунок 7.3 - Схема сил при установившейся прокатке

В случае установившегося процесса прокатки при рассмотрении условия захвата следует учитывать уже не полный угол захвата  $\alpha$ , а лишь ту его часть, под которой располагается равнодействующая элементарных реактивных сил, т.е.  $\alpha/2$  (рисунок 7.3). Тогда условие захвата приближенно характеризуется неравенством:

$$\alpha < 2\beta(1)$$

Таким образом, установившийся процесс прокатки осуществим легче, чем его начальная стадия (захват). Поскольку, однако, всякий случай прокатки должен начинаться со стадии естественного захвата полосы валками, то после заполнения зева валков металлом (установившийся процесс) образуется избыток сил трения, расходуемый на развивающееся в связи с этим опережение металла.

Искусственный захват, т.е. минуя условие (5), может быть произведен либо вдавливанием слитка в валки внешней силой, либо задачей в валки конусного слитка, либо дополнительным сближением валков после естественного захвата.

Из неравенства 5 следует ряд практически важных выводов. Угол захвата определяется коэффициентом трения металла, поэтому все отмеченные ранее факторы, повышающие коэффициент трения, также повышает предельный угол захвата.

Условия захвата улучшаются:

- при снижении скорости валков;
- при горячей прокатке;
- при снижении твердости металла;
- при закруглении поверхности валков (состояние поверхности самого металла при горячей прокатке мало влияет на условие захвата, но при холодной прокатке влияет состояние обеих поверхностей).

Помимо коэффициента трения на захват полосы влияют и другие факторы: скорость подачи полосы в валки и инерционные силы при захвате крупных заготовок. Оба фактора определяют протяженность площадки смятия, которая образуется в начальный момент захвата и без которой захват вообще невозможен, так как сила трения  $T$  есть произведение контактных напряжений трения на площадь смятия. Процесс формирования площадки смятия называется первичным захватом. Далее следует вторичный захват, который определяется величиной сил трения, втягивающих полосу в валки, и инерционными силами [67].

Скорость подачи полосы в валки по-разному влияет на условия первичного захвата, в зависимости от окружной скорости вращения валков  $V_0$ . Экспериментально установлено, что на захват полосы влияет как сама скорость подачи полосы в валки, так и разность скорости подачи полосы  $V_{II}$  и горизонтальной проекции окружной скорости валков  $V_{Oвх}$ . Кинетическая энергия движения полосы  $0,5mV_{II}^2$  ( $m$  – масса полосы) расходуется на

образование площадки смятия. Чем больше скорость подачи полосы в валки и чем пассивнее полоса, тем больше площадка смятия и надежнее захват.

В начальный момент вторичного захвата сил трения  $T$  суммируется с силами инерции, которые зависят от разности скоростей полосы и валков.

Пусть скорость подачи полосы  $V_{\Pi}$  меньше горизонтальной проекции окружной скорости валков  $V_{\text{обх}}$ . При таком соотношении скоростей после деформирования площадки смятия полоса ускоряется, поэтому сила инерции  $J = ma$  ( $a$  – ускорение полосы) направлена против хода прокатки, что уменьшает силу  $T$ .

Если скорость подачи полосы  $c_0$  превышает скорость валков  $c_{\text{вх}}$ , то энергия движения полосы выше, чем в предыдущем случае, что способствует образованию более сильной площадки смятия, что улучшает захват. При вторичном захвате скорость полосы падает до скорости валков, поэтому сила инерции направлена по ходу прокатки и складывается с силой трения. Рассмотренные условия захвата являются наилучшими. Если есть люфты в системе привод, то при первичном захвате скорость валков и полосы резко падает. При вторичном захвате полоса разгоняется, поэтому сила инерции вычитается из силы  $T$ , что не способствует захвату. Захват протекает труднее, чем без люфтов, но лучше, чем при обратном соотношении скоростей.

Таким образом, захват представляет собой сложный процесс и для прокатки в целом является наиболее ответственной операцией. Необходимо всеми средствами обеспечивать надежность и устойчивость захвата полосы валками. Многие авторы приходят к выводу о целесообразности создания вспомогательных механизмов для осуществления искусственного захвата на прокатных станах [66].

При выборе режимов обжатий при прокатке необходимо считаться с предельно допустимыми углами захвата, при которых силы трения достаточны для обеспечения нормальных условий захвата. В таблице 7.1 приведены предельные углы захвата в градусах для различных условий прокатки.

Таблица 7.1 – Предельные углы захвата

Условие прокатки	Предельный угол захвата
Холодная прокатка со смазкой на шлифовальных станках	3-4
Холодная прокатка без смазки на расточенных валках	5-8
Горячая прокатка стального листа	15-18
Горячая прокатка стальных сортовых профилей	22-24
Горячая прокатка алюминиевых сплавов	18-22
Горячая прокатка медных сплавов	20-24
Горячая прокатка на волках с насечкой или наваркой	27-30

Таким образом, самым трудным является захват металла валками, а после заполнения очага деформации процесс прокатки протекает устойчиво почти при двукратном обжатии [68].

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *ROLLING\_1*. Нажмите кнопку **Finish**, произойдет запуск препроцессора.

Нажмите кнопку **Simulation controls** , появится окно **Simulation controls**, в котором по умолчанию будет активна закладка **Основное**. Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим «Деформирование». Поскольку при холодной листовой прокатке ширина заготовки изменяется незначительно, то деформацию можно считать плоской, т.е. равной нулю в направлении ширины заготовки, поэтому установите тип геометрии – «Плоскодеформированная». Нажмите кнопку **OK**.

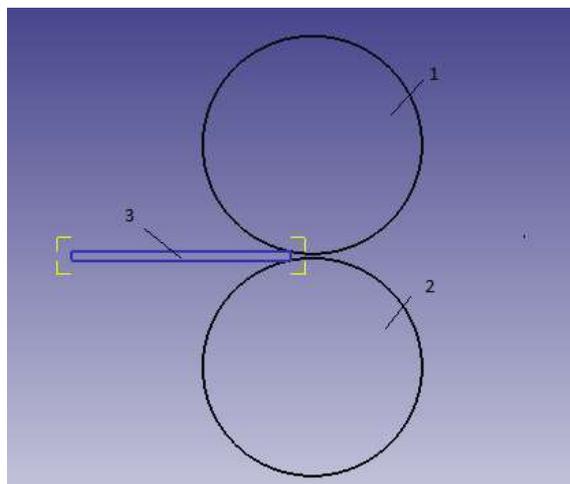


Рисунок 7.4 - Расположение верхнего 1, нижнего 2 валков и заготовки 3 после позиционирования

Сначала расположим валки по отношению друг к другу. Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 7.5) нажав кнопку **Object positioning**. Для расположения валков относительно друг друга воспользуйтесь методом смещения. Позиционируемый объект **Bottom Die**. Сместим его в направлении оси  $-Y$  на величину  $Y = -102$  с учетом зазора между валками. Для позиционировать нажмите кнопку **Применить**, а затем кнопку **ОК**.

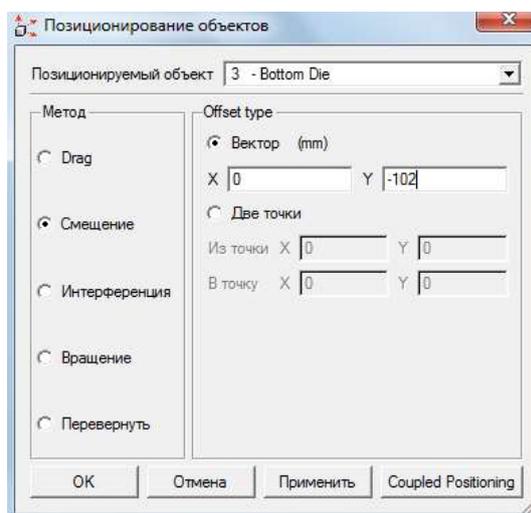


Рисунок 7.5 - Позиционирование валков относительно друг друга

Затем расположим заготовку и валки по отношению друг к другу. Вначале методом **Смещение** позиционируемый объект **Workpiece** сместим на

ось прокатки в направлении  $-Y$  на величину  $Y = -53$ . Затем методом **Drag** и ЛКМ заготовку перемещаем влево в направлении оси  $-X$  так, чтобы она не касалась валков. Далее воспользуйтесь методом **Интерференция**. В строке **Позиционируемый объект** выберите **Workpiece**, а в строке **Относительно** – **Top Die**. В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи **X**. В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи **X**. Для позиционирования нажмите кнопку **Применить** (рисунок 7.6).

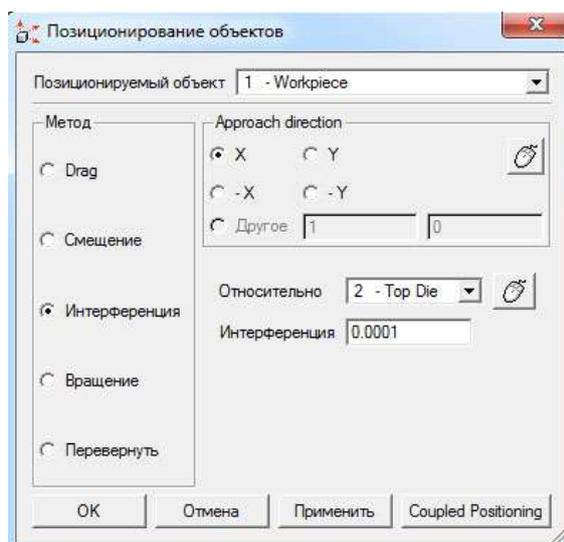


Рисунок 7.6 - Позиционирование заготовки относительно валков

### Создание модели заготовки

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  **Общее** стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** , задайте количество конечных элементов 1500 (4 элемента по толщине) и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DINAlMgMn, COLD[70-250F(20-120C)]* (АД31) и нажмите кнопку **Загрузить**.

## Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 7.7).

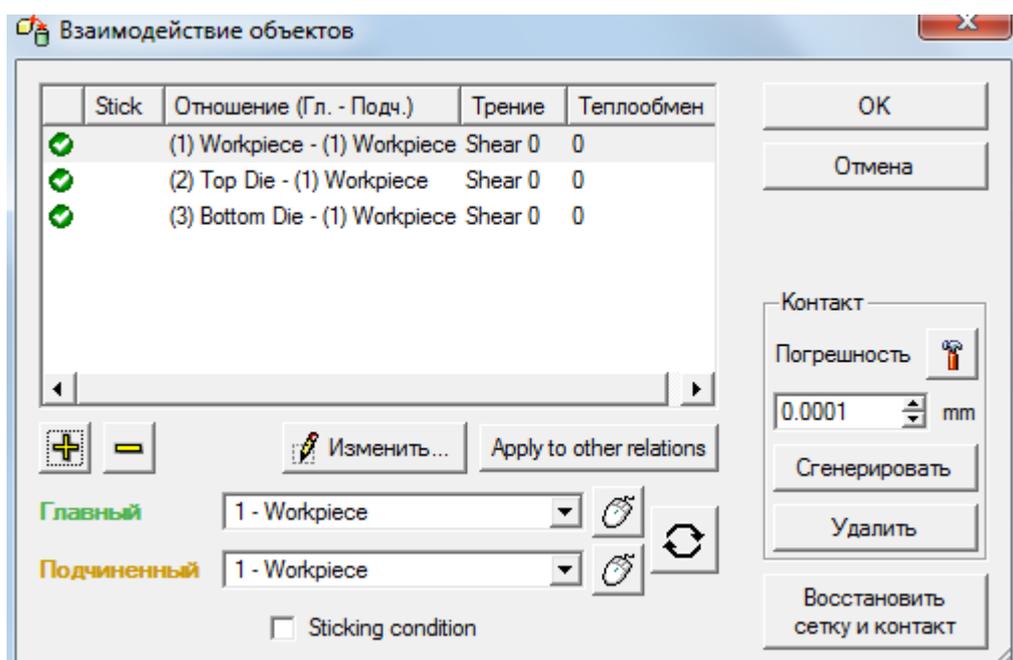


Рисунок 7.7 Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «*Shear*», укажите коэффициент трения равный 0,2 по закону Зибеля и нажмите кнопку **Закреть** (рисунок 7.8).

Так как коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к остальным.

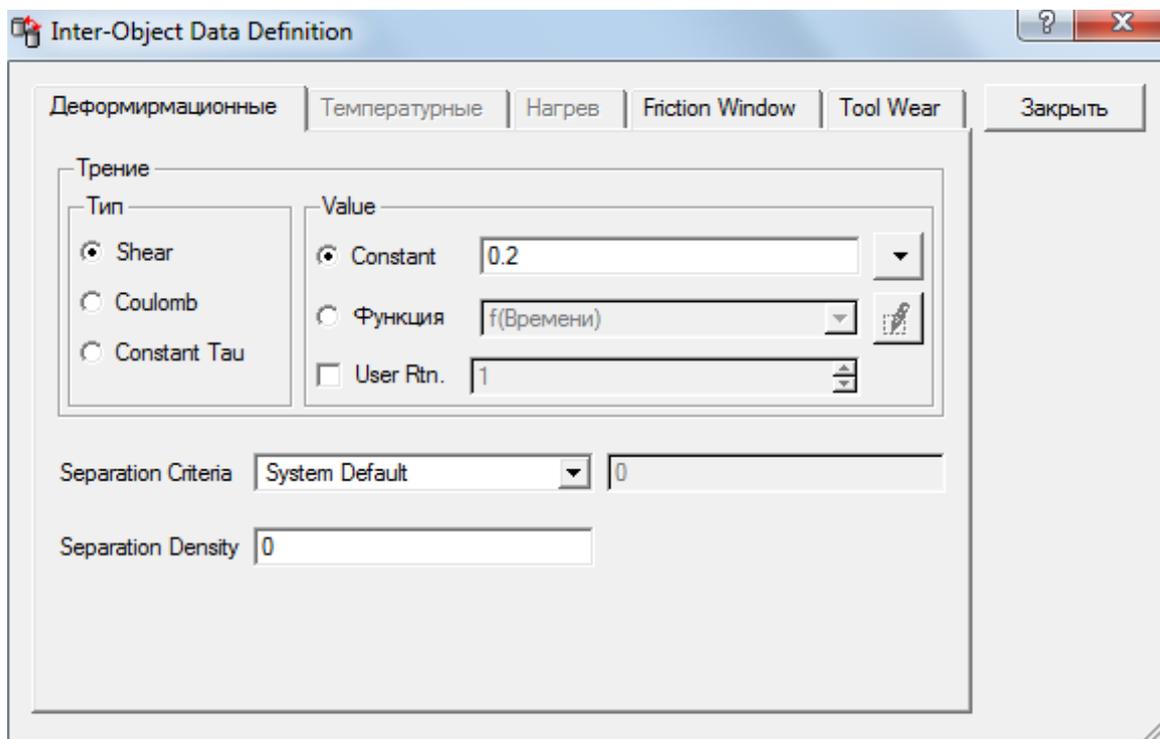


Рисунок 7.8 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта. Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

### Задание движения объектов

Укажите ЛКМ *Top Die* (верхний валок) в **Дереве объектов** для приложения вращения. Затем перейдите к закладке **Вращение** в пункте **Движение**  **Движение**, в блок **Angular velocity** (угловая скорость) введите скорость вращения валка – 0,2 рад/с (рисунок 7.9). Далее укажите ЛКМ **BottonDie** (нижний валок) в дереве объектов и введите скорость вращения нижнего валка  $\omega = -0,2 \text{ рад/с}$ , так как валки вращаются в разные стороны обратите внимание, что центр нижнего валка смещен относительно верхнего на величину **Y = - 102 мм**.

## Объект Top Die.



Рисунок 7.9 – Задание вращения валка

Для задания движения полосы перед захватом в валки укажите **ЛКМ** в Дереве объектов **Workpiece** для приложения скорости перемещения. Затем нажмите кнопку Движение. Убедитесь, что в блоке **Тип** напротив надписи скорости стоит флажок, а в блоке Направление установите флажок напротив надписи **X** (движение по оси **X**) (рисунок 7.10).

Скорость движения полосы рекомендуется брать большей, чем окружная скорость вращения валков  $V_0 = \omega R$  или  $V_0 = 0,2 \cdot 50 = 10$  мм/с. Примем скорость подачи полосы  $V_{II} = 12$  мм/с.

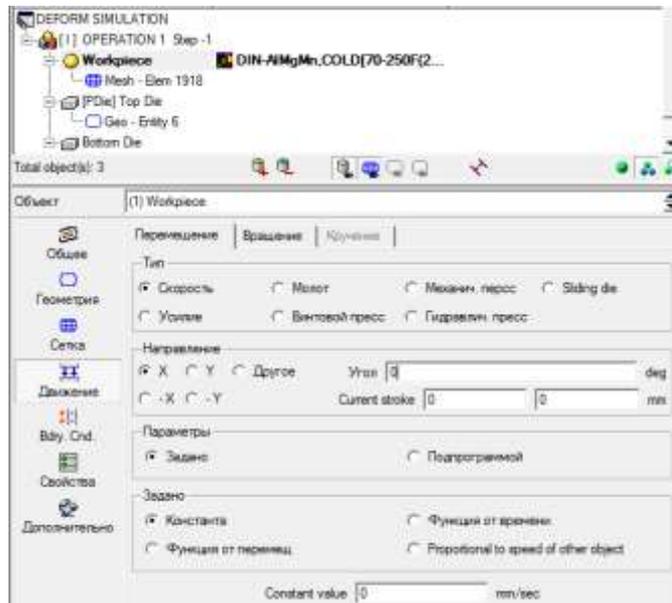


Рисунок 7.10 - Задание движения полосы

Теперь необходимо выбрать узлы, на которые будет наложено граничное условие, т.е. узлы, составляющие передней грани заготовки направленной к валкам. Увеличьте объект при помощи кнопки **Увеличить**  на **Панели управления**, а затем установите прежний тип курсора, нажав на кнопку **Выбрать** . В окне **Pick nodes** (выбор узлов), обычно расположенном в левом нижнем углу экрана, нажмите кнопку **By edge**  (по грани) для выбора всех узлов какой-либо грани. ЛКМ укажите нижнюю грань заготовки, при этом все узлы грани выделяться красными точками (рисунок 7.11).



(граничные условия), укажите тип граничного условия в блоке **В.С. Type** –  *Velocity* (скорость), введите значение скорости 12 мм/с в строку **Velocity**, а в блоке **Направление** поставьте флажок напротив надписи «X» (рисунок 7.12, а).

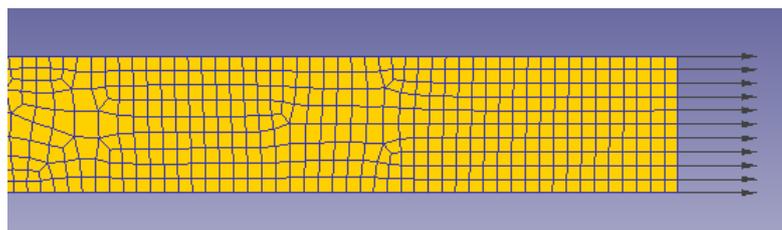
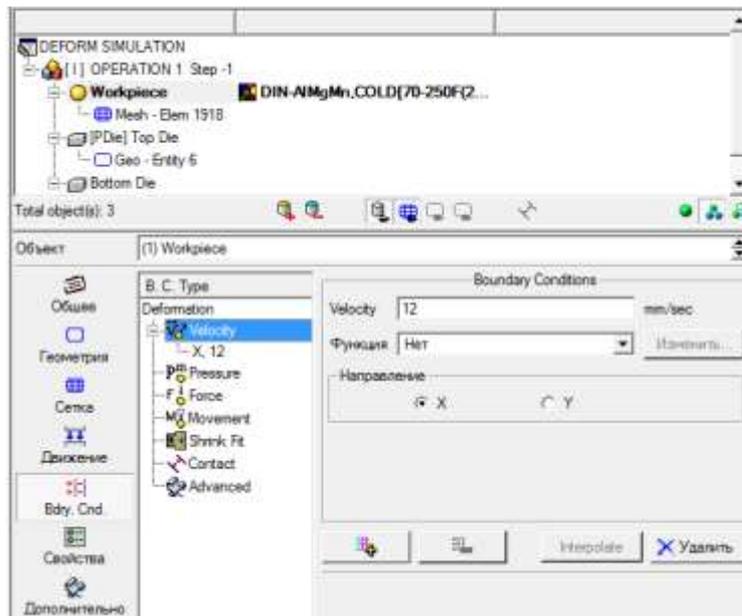
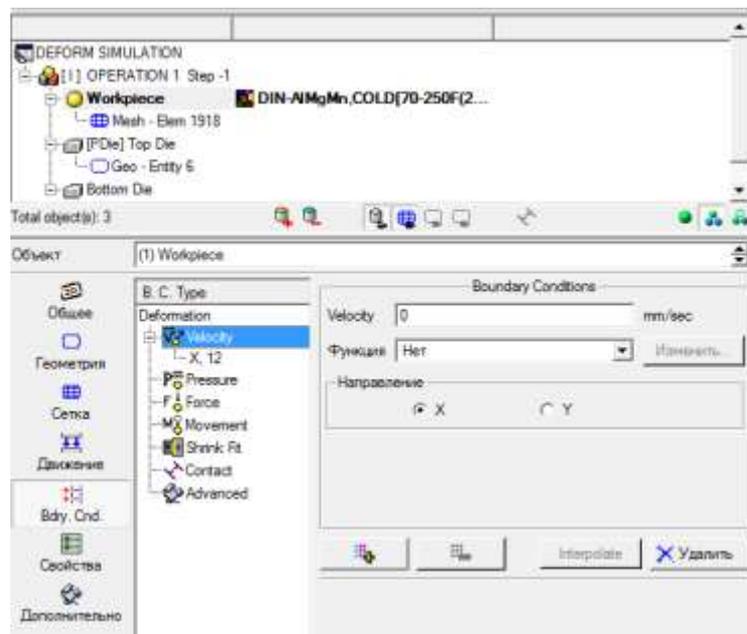


Рисунок 7.11 - Выбор узлов полосы



а



б

Рисунок 7.12 - Пункт **Bdry. Cond.** до(а) и после (б) задания граничных условий

Для применения указанного граничного условия на выбранные узлы нажмите кнопку **Добавить гр. условия**  в пункте **Bdry. Cnd.** При этом узлы с наложенным граничным условием обозначаться серыми треугольниками (рисунок 7.12, б) и в пункте **Bdry. Cnd.** появится новое граничное условие «Y, Fixed» (рисунок 7.12, б).

## Задание числа шагов расчета

Ограничим шаг решения задачи по времени, для этого нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем в блоке **Задание шагов решения** установите флажок напротив надписи **With Equal Time Increment** (с равным приращением по времени) и введите величину шага – 0,01 с (при скорости вращения валка 0,2 рад/с за один шаг валок повернется на угол в 20°) (рисунок 7.13).

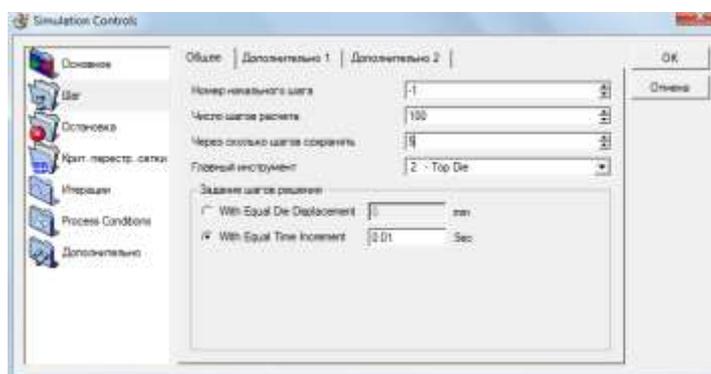


Рисунок 7.13 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Первоначальное количество шагов определяем исходя длины геометрического очага деформации  $l = \sqrt{50 \cdot 2} = 10$  мм. Так как  $V_0 = 10$  мм, то примем число шагов расчета равным 100 и введем данное значение в ячейку в строке **Число шагов расчета**.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

## Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы**

**данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 7.14). Для закрытия окна нажмите кнопку **Закрыть**.

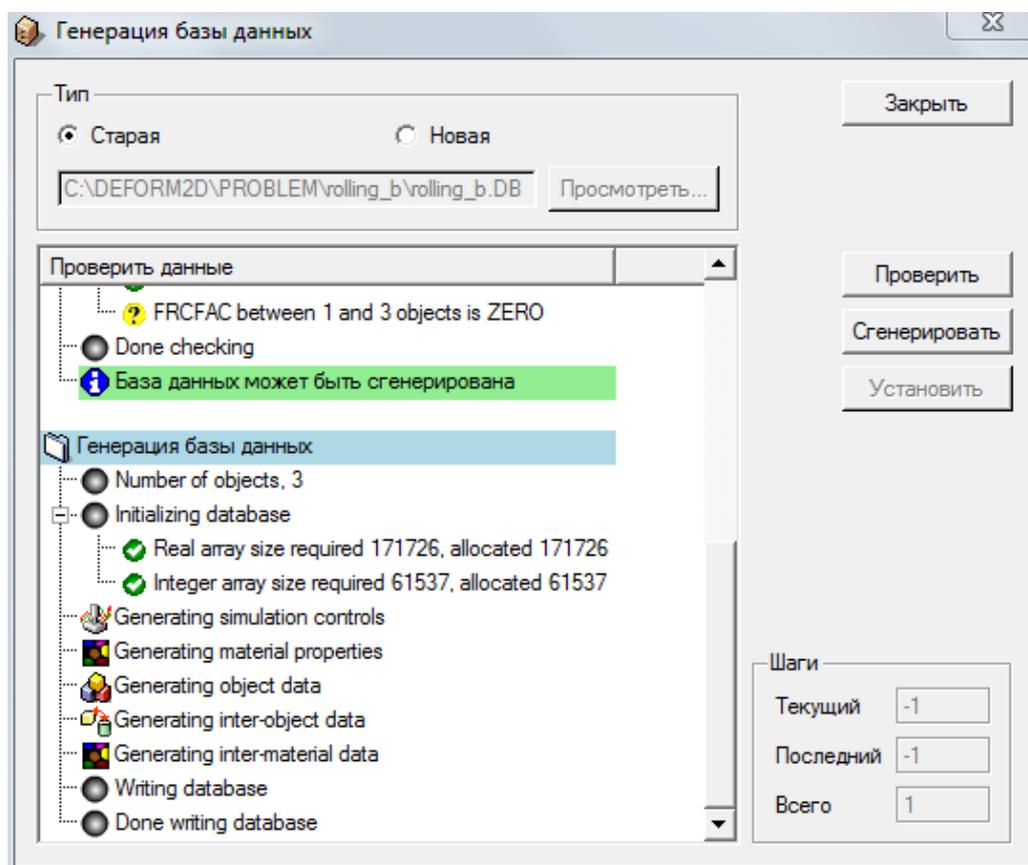


Рисунок 7.14 - Окно **Генерация базы данных**

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку . Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент.

Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается.

### Анализ результатов моделирования

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** . Увеличьте заготовку в области очага деформации и посмотрите его заполнение по рисунку 7.15 на последнем шаге. Так как очаг деформации заполнен металлом заготовки, то необходимо выйти из постпроцессора и вернуться в препроцессор для формирования базы данных процесса установившейся прокатки. В модели заготовки необходимо убрать на передней грани граничные условия, определяющие движение заготовки. Целесообразно рассмотреть формирование контактных поверхностей между заготовкой и валками. В окне **Simulation controls** ввести новое число шагов расчетов установившейся прокатки 100, а в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**, а после закрытия окна продолжить расчет.

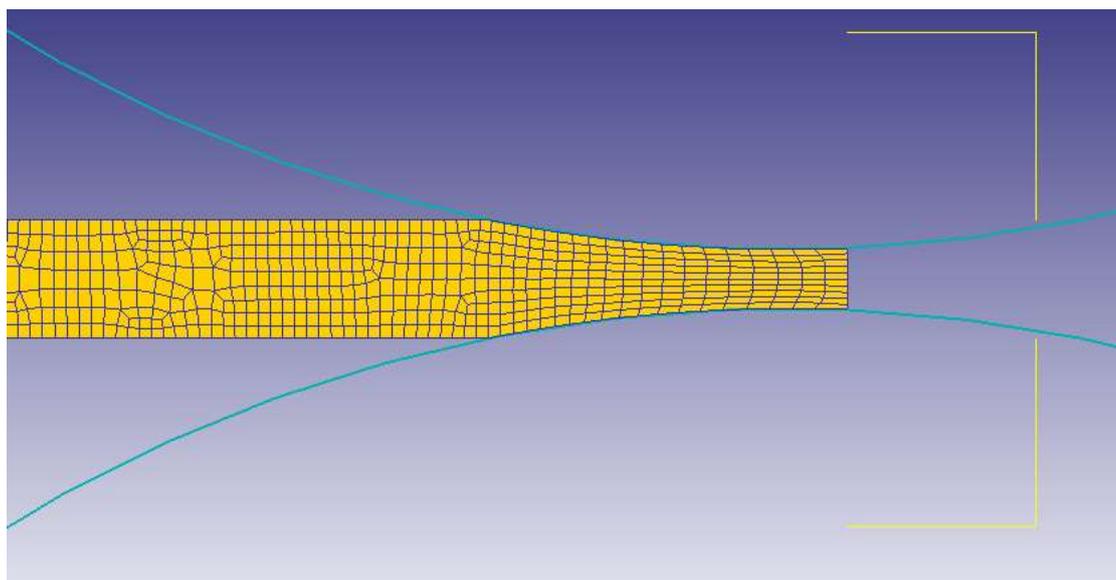


Рисунок 7.15 - Окончание стадии захвата

Опишите характер изменения усилия прокатки по стадиям процесса (рисунок 7.17). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 7.16) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим время процесса, поэтому в разделе установите «*Время*». По оси ординат, поставьте

флажок напротив **Y Load** в разделе **Y-axis** Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

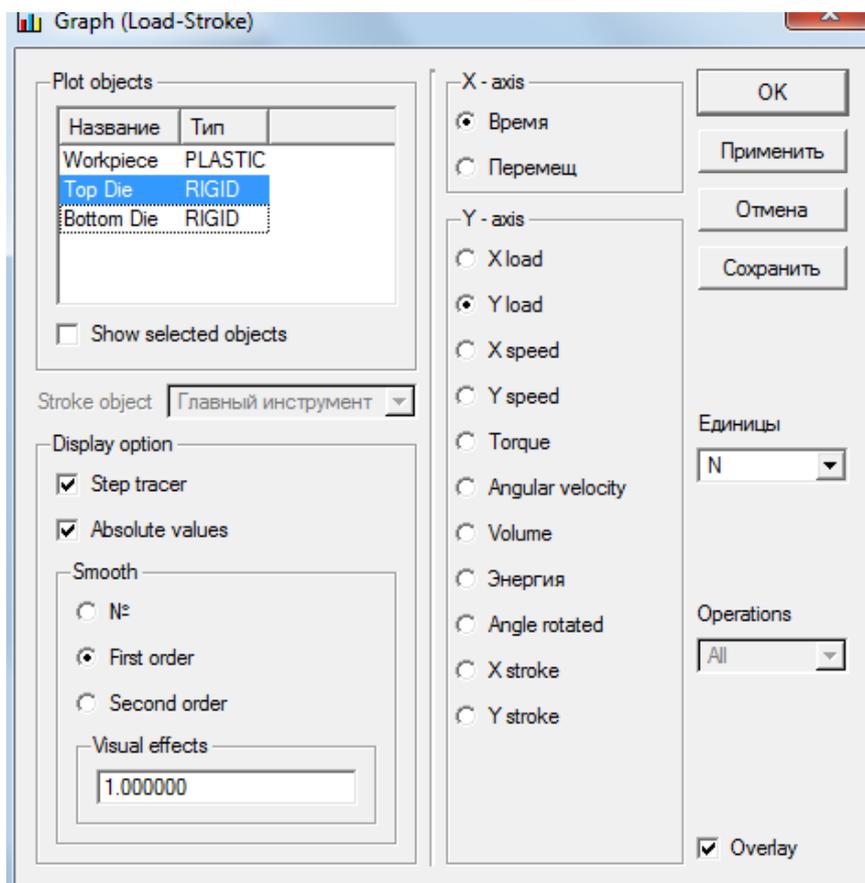


Рисунок 7.16 - Окно Graph (Load-Stroke)

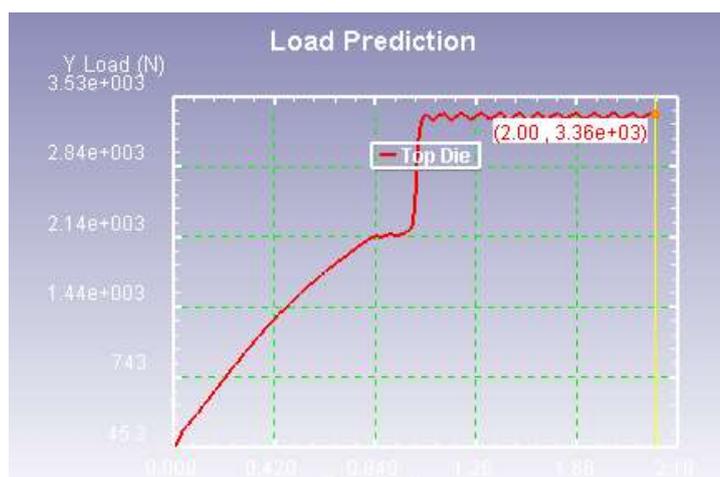


Рисунок 7.17 - Изменение усилия прокатки от времени процесса

Опишите характер изменения момента прокатки по стадии процесса захвата металла валками – стадии установившейся прокатки.

Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 7.16) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим время процесса, поэтому в разделе **X-axis** установите «*Время*». По оси ординат в разделе Y-axis поставьте флажок напротив **Torque**. Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

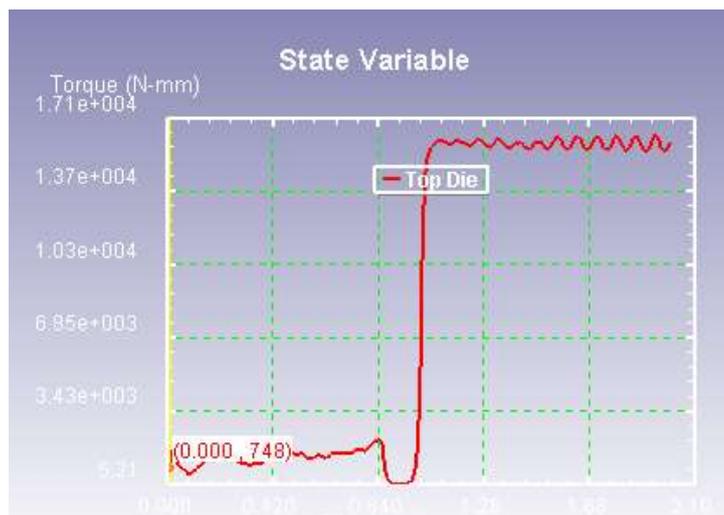


Рисунок 7.18 Изменение момента прокатки вначале процесса прокатки

Для отображения и анализа скоростей нажмите кнопку **Параметры** , выберите тип переменной «*Velocity*» и подтип «*X*» (рисунок 7.19). В разделе Экран установите **Solid**, в разделе **Scaling Local**. Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

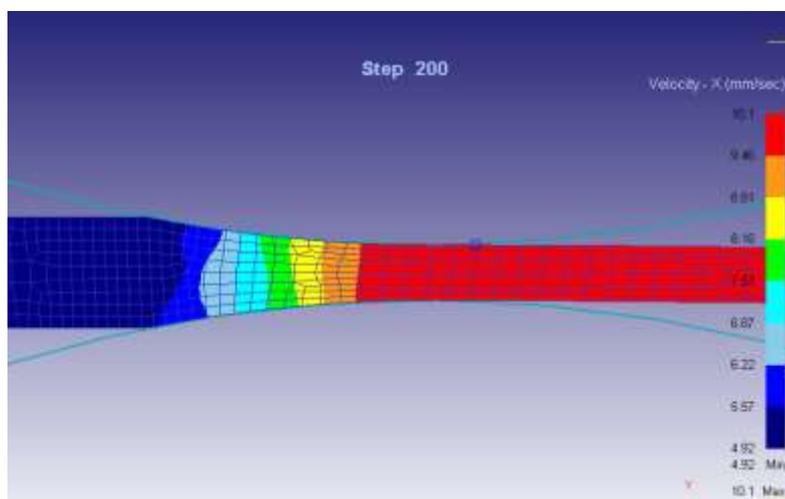


Рисунок 7.19 - Поле скоростей на установившейся стадии прокатки

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MSWord и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Результаты моделирования захвата металла в начальный момент и прокатки установившейся стадии.
  - компьютерная модель прокатки;
  - поле скоростей в направлении оси X;
  - графики усилия и момент прокатки в зависимости от времени процесса.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Пути улучшения захвата металла валками.
7. Выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие силы действуют на металл в начале прокатки?
2. Что называют углом захвата при прокатке?
3. В каком случае происходит легче захват при горячей или холодной прокатке?
4. Какую роль играют силы трения при захвате металла валками?
5. Сформулируйте условие захвата
6. Что осуществляется легче, захват металла, или установившийся процесс?
7. Предложите способы искусственного захвата металла валками.
8. Перечислите факторы, облегчающие захват.
9. Как влияют на захват полосы валками скорость подачи полосы и окружная скорость вращения валков?

10. Назовите предельные углы захвата при горячей прокатке алюминиевых сплавов.
11. Что понимают под первичным и вторичном захватом?
12. В чем сущность практического определения угла захвата и коэффициента трения.
13. Каково соотношение между углами трения и захвата в начальный момент прокатки? В случае установившегося процесса прокатки?

## 7.2 Холодная листовая прокатка

Цель работы: компьютерное моделирование плоско-деформированного состояния в процессе холодной продольной прокатки листов из алюминия и привитие навыков работы в программном комплексе *DEFORM-2D*.

### Краткие теоретические сведения

Пластическую деформацию, при которой заготовка из металла захватывается и деформируется между вращающимися валками, называют прокаткой. Заготовка под действием сил трения  $T$  втягивается в зазор между валками, деформируется ими и приобретает заданную форму и размеры (рисунок 7.20).

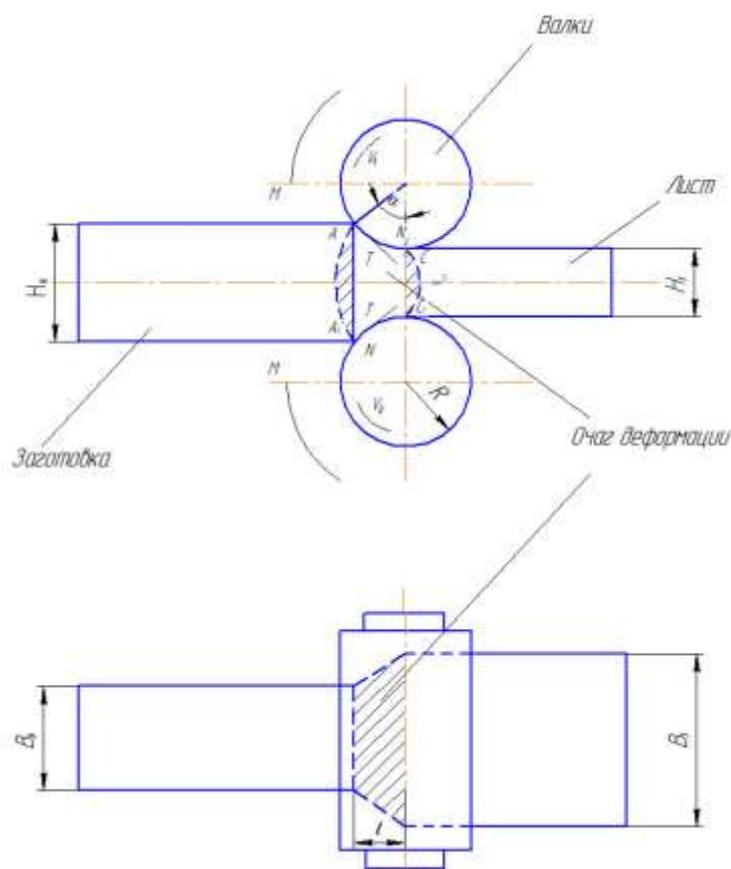


Рисунок 7.20 - Схема продольной прокатки

При прокатке сечение заготовки уменьшается, ширина и длина увеличиваются. Форма сечения получаемой продукции зависит от формы

валков. Например, на гладких валках прокатывают листы, полосы и ленту. В так называемых калиброванных валках катают круг, квадрат, шестигранник, рельсы, уголки и т.п. Для производства труб, шаров, шестерен и других профилей используют специальные прокатные станы, в которых применяются более двух валков: форма валков может быть конической, винтообразной и др.

Деформация металла при прокатке количественно определяется следующими величинами:

$$\varepsilon_H = \frac{H_0 - H_1}{H_0} - \text{обжатие,}$$

$$\varepsilon_B = \frac{B_1 - B_0}{B_0} - \text{уширение,}$$

$$\mu = F_0 / F_1 = L_1 / L_0 - \text{вытяжка,}$$

где  $H_0, B_0, L_0, F_0, H_1, B_1, L_1, F_1$  – соответственно высота, ширина, длина заготовки, площадь поперечного сечения до и после прокатки [70].

Металл деформируется между валками в зоне, которая называется очагом деформации (ОПД). Геометрически очагом деформации принято называть участок прокатываемого металла, заключенный между валками и вертикальными сечениями входа металла в валки и выхода металла из валков. Экспериментальными исследованиями установлено, что пластическая деформация также распространяется и на зоны, прилегающие к этому участку, называемые внешними или внеконтактными зонами деформации.

Внеконтактных зон деформации две. Одна из них расположена до сечения входа металла в валки (линия  $AA_1$ ), а другая – за сечением выхода металла из валков (линия  $CC_1$ ). Протяжённость фактического очага деформации зависит от многих факторов прокатки и в 1,2 – 1,7 раза больше геометрического очага деформации.

Форму геометрического очага деформации характеризуют углом захвата  $\alpha$ , высотами сечения  $H_0$  и  $H_1$  входа в валки и выхода из них, длиной  $l$  и начальной  $B_0$  и конечной  $B_1$  шириной.

Длина геометрического очага деформации:

$$l = \sqrt{R\Delta H},$$

где  $R$  – радиус валка,  $\Delta H$  – абсолютное обжатие:

$$\Delta H = H_1 - H_0.$$

Углом захвата называют центральный угол  $\alpha$ , ограниченный двумя радиусами, исходящими из точек касания сечений входа и выхода с поверхностью валка [71]:

$$\alpha \approx \sqrt{\Delta H/R}.$$

Очевидно, что в валки будет втянута заготовка высотой  $H_0$  (рисунок 7.20), если последняя не превышает определенной максимальной величины.

Захват заготовки валками произойдет, если коэффициент трения между деформируемым металлом и валками будет больше или равен тангенсу угла  $\alpha$ . Коэффициент трения и режим обжатий зависят от температуры металла, смазки, шероховатости поверхности валков, скорости прокатки и др. Так в случае горячей прокатки  $f \approx 0,2-0,4$ , в случае холодной прокатки  $f \approx 0,1-0,2$ , при холодной прокатке в полированных валках с эффективной смазкой  $f \approx 0,04-0,08$ .

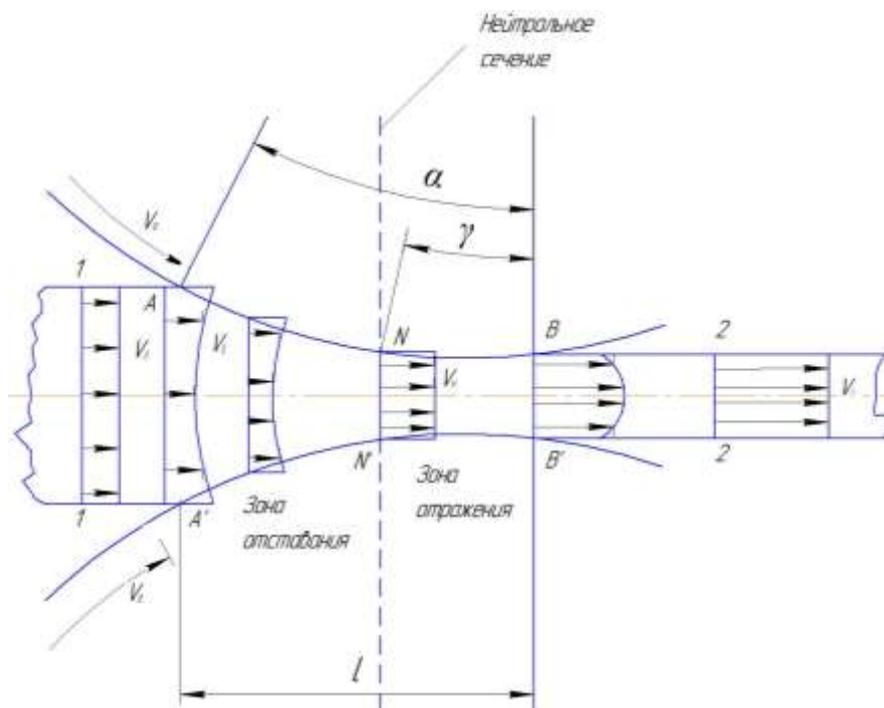


Рисунок 7.21 - Характер течения металла вдоль очага деформации

Вдоль очага деформации металл течёт неравномерно, что подтверждают эпюры скоростей течения металла в различных сечениях (рисунок 7.21). При

установившемся процессе прокатки все слои металла в сечении 1-1 движутся к валкам со скоростью  $V_0$ , которая меньше, чем горизонтальная составляющая окружной скорости вала в точке А, т.е.  $V_A > V_0$ . Деформация в сечении 1-1 отсутствует, так как это недеформируемая зона.

Горизонтальная проекция окружной скорости вала в точке А:

$$V_A = V_B \cos \alpha.$$

В сечении АА' поверхность вала движется быстрее, чем металл заготовки. Начинается захват металла. Поверхностные слои заготовки увлекаются за поверхностью вала в направлении прокатки за счёт активных сил трения, поэтому их скорости перемещения вдоль оси прокатки больше, чем скорость перемещения центральных слоёв. Эюра скоростей в сечении АА' имеет вогнутый вид. Такой вид эюры характерен для всей зоны отставания, вплоть до нейтрального сечения NN'.

В нейтральном сечении NN' скорость течения всех слоёв металла одинакова и равна горизонтальной проекции окружной скорости вала  $V_H = V_B \cos \gamma$ . Здесь металл заготовки перемещается вместе с поверхностью вала. Эюра скорости – прямоугольник. Положение нейтрального сечения определяется центральным углом  $\gamma$ .

В сечении ВВ', как во всей зоне опережения, металл течёт быстрее, чем движется поверхность вала. Однако, за счёт реактивных сил трения на контактной поверхности, скорость течения периферийных слоёв меньше, чем скорость центральных. Эюра скорости выпуклая.

В сечении 2-2 эюра скоростей – прямоугольник, так как это недеформируемая зона [72].

Анализ течения металла показывает, что в зоне отставания и в зоне опережения на контактной поверхности АВ найдутся две такие точки С и D вблизи точки N, в которых скорости течения металла поверхностных слоёв будут равны скоростям движения поверхности валков, а скорости остальных слоёв в сечении СС<sub>1</sub> и DD<sub>1</sub> будут отличаться от горизонтальной проекции окружной скорости валков (рисунок 7.22).

Получается, что на участке CD, включая точку N, металл движется с одинаковой скоростью равной  $V_H = V_B \cos \gamma$ , т.е. движется как бы «прилипая» к поверхности валка. А течение внутренних слоёв осуществляется за счёт их перемещения относительно поверхностных слоёв.

Таким образом, контактная поверхность АВ геометрического очага деформации при прокатке состоит из трёх участков: два крайних участка скольжения (АС – отставания, DB – опережения) и средний участок CD – прилипания (рисунок 7.22).

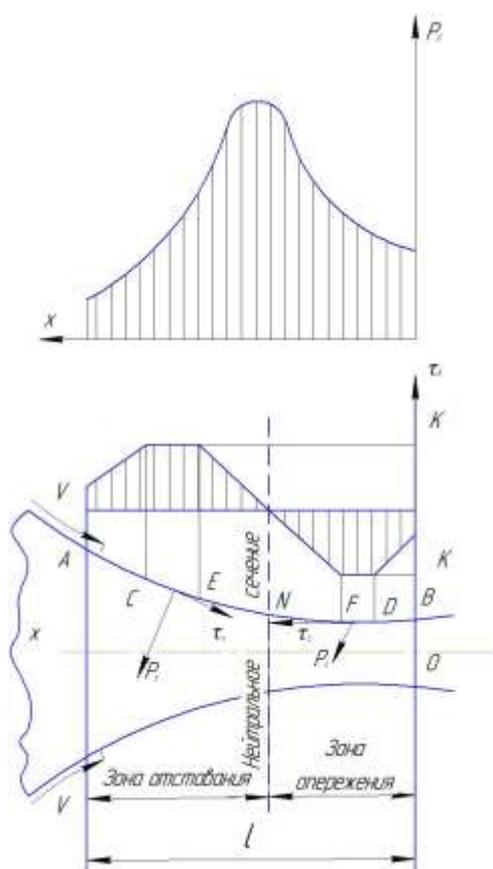


Рисунок 7.22 - Характер распределения давления  $P_x$  и напряжения трения  $\tau_K$  по дуге захвата при прокатке

В точках С и F напряжение трения  $\tau_K$  достигает своего максимального значения. Здесь скольжение металла по поверхности валка прекращается и  $\tau_K = \mp K$ , где  $K$  – пластическая постоянная,  $K = 0,58\sigma_T$ . Это значение сохраняется на участках CE и FD.

На участке EF, в непосредственной близости к точке N, напряжения трения  $\tau_K$  меняются от +K до -K, причём в точке N  $\tau_K = 0$ . Данный участок называется зоной заторможенной деформации или «мёртвой» зоной.

На выходе из зоны деформации металл опережает валки. Это явление называют опережением. На входе в зону деформации металл отстаёт от валков. Это явление называют отставанием [73].

Количественно опережение определяется отношением разности между скоростью выхода полосы из зоны деформации  $V_1$  и окружной скоростью  $V_B$  к окружной скорости, т.е.:

$$S = \frac{V_1 - V_B}{V_B}.$$

Зная опережение и окружную скорость валков, можно определить скорость выхода полосы из зоны деформации:

$$V_1 = V_B(1 + S).$$

Скольжение металла в продольном поперечном направлениях противодействуют силы трения, направленные против скольжения. Поэтому напряжённое состояние в зоне деформации при прокатке характеризуется всесторонним неравномерным сжатием. Максимальным по абсолютной величине является напряжение сжатия, создаваемое активным действием валков, минимальным – напряжение сжатия в продольном направлении и средним – напряжение сжатия в поперечном направлении.

На кромках полосы в результате уширения появляются продольные напряжения растяжения, что приводит к разноименной схеме напряжённого состояния.

Схема деформации в общем случае с одной деформацией сжатия (по высоте) и двумя деформациями растяжения – по длине и ширине. При большой ширине полосы относительное уширение мало. В этом случае им можно пренебречь, т.е. деформацию в направлении ширины принять равной нулю и рассматривать деформацию плоской.

Переменные скорости движения металла и неравномерность деформации по вертикальным сечениям при прокатке неизбежно вызывают разнородные

напряжения в фактическом очаге деформации.

Характер распределения нормальных напряжений в различных сечениях фактического очага деформации при прокатке относительно толстых и широких полос представлен на рисунке 7.23.

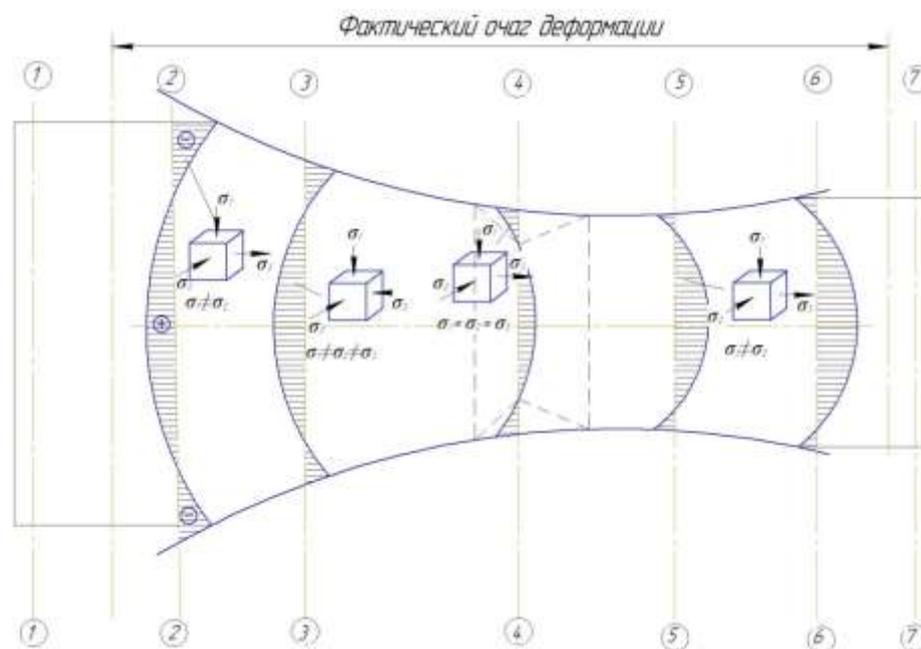


Рисунок 7.23 - Эпюры распределения нормальных напряжений в фактическом очаге деформации при прокатке широких полос

Во внеконтактной зоне (сечение 2-2) возникает неравномерность течения металла; поверхностные слои стремятся двигаться быстрее внутренних, в результате чего появляются растягивающие продольные напряжения, а во внутренних слоях – напряжения сжатия. Также распределены напряжения в сечении входа металла в валки и в зоне отставания (сечение 3-3).

В зоне прилипания (сечение 4-4) напряжения также распределяются неравномерно. В участках, прилегающих к контактным поверхностям (в виде клина), существует объёмное напряжённое состояние всестороннего сжатия, т.е. по всем направлениям действуют напряжения сжатия, причём соотношение между напряжениями таково, что пластическая деформация в них не происходит. Продольные сжимающие напряжения вызваны наличием сил статического трения поверхности контакта металла с поверхностью вала,

сковывающих не только контактные слои, но и слои металла, расположенные несколько глубже (непластичный клин). По вертикальному сечению между вершинами «непластичных» клиньев продольные напряжения распределяются также неравномерно. В этом участке и в зоне опережения (сечение 5-5) промежуточные слои металла имеют повышенную скорость движения. Для этих слоёв схема напряжённого состояния будет разноимённой с наличием продольных растягивающих напряжений.

Во внеконтактной зоне (сечение 6-6) уменьшение неравномерности течения металла приводит к постепенному выравниванию напряжений, при этом напряжения растяжения сохраняются во внутренних слоях. После выхода металла из валков при достижении недеформируемой зоны (сечение 7-7) напряжения будут равны нулю [74].

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D* и создайте новую задачу, нажав кнопку  на **Панели управления**. Нажимайте кнопку **Next** до появления запроса на ввод названия задачи. Дайте название задачи: *ROLLING\_2*. Нажмите кнопку **Finish**, произойдет запуск препроцессора.

Нажмите кнопку **Simulation controls** , появится окно **Simulation controls**, в котором по умолчанию будет активна закладка **Основное** (рисунок 7.24). Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» и выбран режим «Деформирование». Поскольку при холодной листовой прокатке ширина заготовки изменяется незначительно, то деформацию можно считать плоской, т.е. равной нулю в направлении ширины заготовки, поэтому установите тип геометрии – «Плоскодеформированная». Нажмите кнопку **OK**.

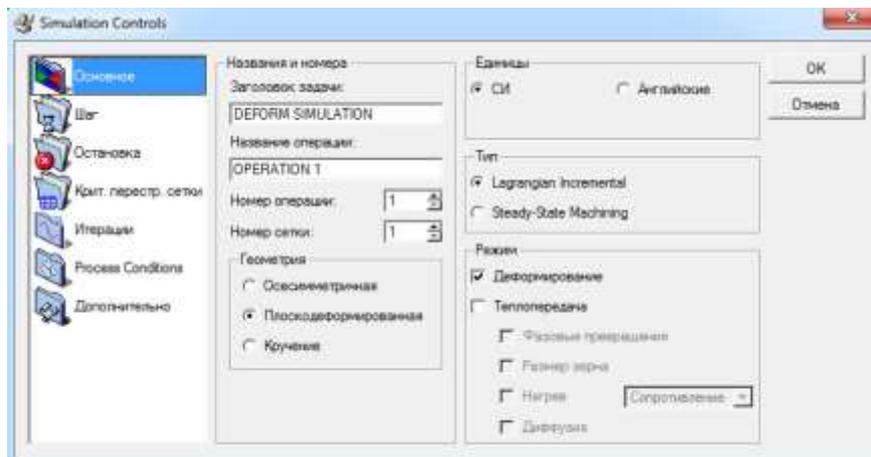
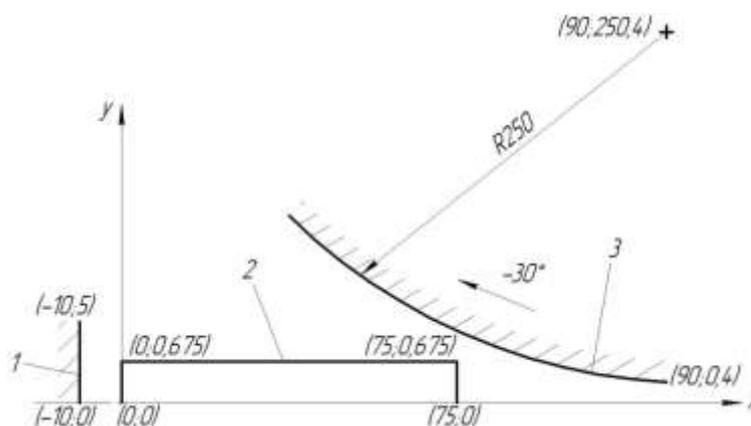


Рисунок 7.24 - Окно **Настройки задачи**

### Построение геометрии инструмента и заготовки

Рассмотрим идеальный процесс холодной прокатки короткой полосы толщиной 1,35 мм с обжатием до толщины 0,8 мм на стане дуо. Т.к. при идеальной прокатке наблюдается ось симметрии, проходящая через центр заготовки, то для моделирования достаточно рассмотреть только верхнюю половину заготовки и один валок. В связи с малой длиной заготовки (75 мм) и большим диаметром рабочих валков ( $\varnothing 500$  мм) ограничимся только частью верхнего валка – дугой в  $30^\circ$  (рисунок 6, без соблюдения масштаба).

Добавьте в **Дерево объектов** верхний инструмент *Top Die* (верхний валок) и нижний инструмент *Bottom Die* (толкатель – применяется для заталкивания заготовки в межвалковый зазор с целью улучшения условий захвата валками), нажимая кнопку **Добавить объект** .



1 – толкатель; 2 – заготовка; 3 – валок

## Рисунок 7.25 - Геометрия заготовки и инструмента до позиционирования

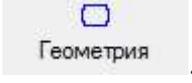
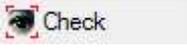
Сделайте активной заготовку *Workpiece* (укажите ЛКМ *Workpiece* в Дереве объектов). Перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия** . В появившееся **Поле ввода геометрии** (таблицу) последовательно введите значения, представленные в таблице 7.2, рисунок 7.24. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить** .

Таблица 7.2 - Координаты точек для построения заготовки

№	X	Y	R
1	0	0	0
2	75	0	0
3	75	0.675	0
4	0	0.675	0
5	0	0	0

Проверьте полученную геометрию на наличие ошибок, для этого нажмите кнопку **Check** , а затем кнопку **Check & Correct Geometry**. В случае верного построения должно появиться сообщение «*Geometry is legal*».

Действуя аналогичным образом, постройте геометрию нижнего инструмента *Bottom Die* по координатам, приведенным в таблице 7.3, рисунок 7.25 (для упрощения изображается только одна грань толкателя).

Таблица 7.3 - Координаты точек для построения толкателя

№	X	Y	R
1	-10	0	0
2	-10	5	0

Сделайте активным верхний инструмент *Top Die*, затем перейдите к закладке **Edit** в пункте **Геометрия**. Построение геометрии верхнего валка произведем в режиме отрезков-дуг, поэтому в блоке **Geo Format** (формат геометрии) установите флажок напротив надписи «*Line-Arc*» (рисунок 7.26). Выберите тип строящейся линии – «*Arc*» (дуга). Введите координаты начальной точки дуги –  $X1 = 90$  мм,  $Y1 = 0,4$  мм (точка от которой откладывается угол дуги); центра –  $X2 = 90$  мм,  $Y2 = 250,4$  мм и угла –  $-30^\circ$  (минус указывается для построения дуги по часовой стрелке) (рисунок 7.26). После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить**.

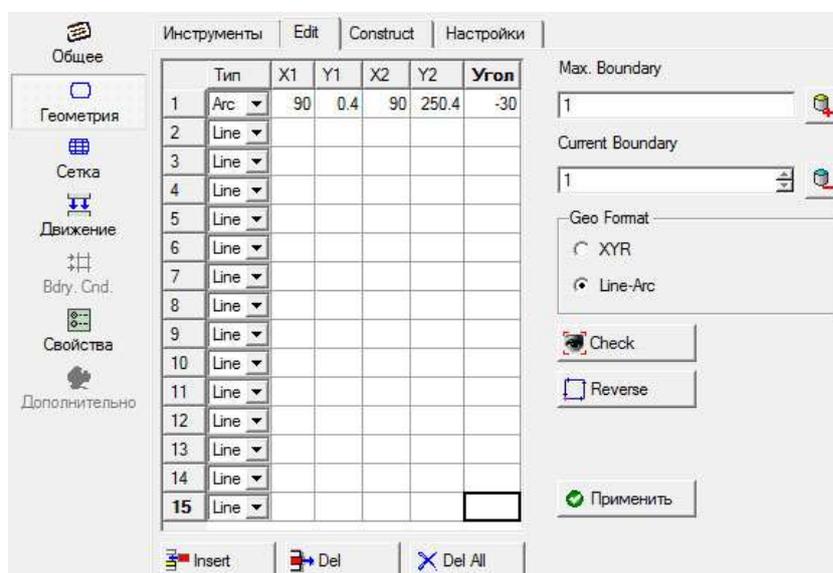


Рисунок 7.26 - Закладка **Edit** пункта **Геометрия** при построении валка

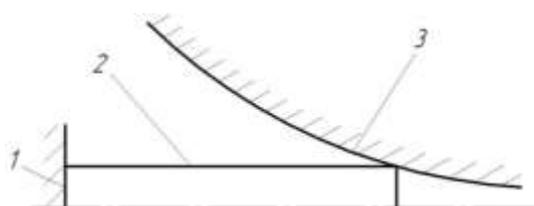
Обратите внимание на то, что серая полоса, определяющая внутреннюю область объекта, располагается с наружной стороны валка (если серую полосу не видно, то необходимо выбрать ЛКМ пункт **Общее**, затем – пункт **Геометрия**). Это связано с тем, что при построении дуги направление обхода от начальной точки к конечной было выбрано по часовой стрелке. Для исправления ошибки геометрии изменим направление обхода, нажав на кнопку **Reverse** (рисунок 7.26).

Конечная геометрия заготовки, толкателя и верхнего валка изображена на

рисунок 7.25.

## Позиционирование объектов

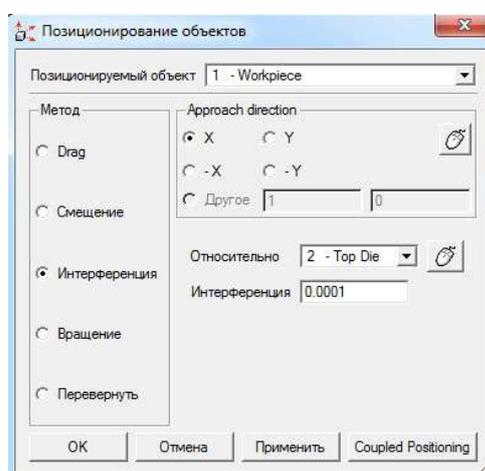
После построения геометрии объектов необходимо выполнить их позиционирование в соответствии с рисунком 7.27. Вызовите окно **Позиционирование объектов** (рисунок 7.28), нажав кнопку **Object positioning** . Для расположения объектов относительно друг друга воспользуйтесь методом **Интерференция**.



1 – толкатель; 2 – заготовка; 3 – валок

Рисунок 7.27 - Расположение объектов после позиционирования

Сначала расположим заготовку и валок по отношению друг к другу. В строке **Позиционируемый объект** выберите *Workpiece*, а в строке **Относительно** – *Top Die* (рисунок 7.28). В блоке **Approach direction** поставьте флажок напротив надписи «X». Для позиционирования нажмите кнопку **Применить**.



## Рисунок 7.28 - Окно **Позиционирование объектов**

По аналогии осуществите позиционирование толкателя. За направление сближения также выберите «X», в качестве позиционируемого объекта установите *Bottom Die*, а в строке **Относительно** – *Workpiece*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунке 7.27.

### **Создание модели заготовки**

Выделите в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece* и убедитесь в том, что в пункте **Общее**  стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** , задайте количество конечных элементов 1500 (4 элемента по толщине) и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**.

Определим свойства материала заготовки, для этого перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library** , расположенную в строке **Материал**. В окне **Material Library** выберите алюминиевый сплав *DINAlMgMn, COLD[70-250F(20-120C)]* (АД31) и нажмите кнопку **Загрузить**.

Т.к. моделируется только верхняя половина заготовки, то необходимо наложить соответствующее граничное условие: узлы конечно-элементной сетки, лежащие на оси симметрии, должны быть зафиксированы от перемещения в направлении оси Y. Для этого выберите пункт **Bdry. Cnd.**

 (граничные условия), укажите тип граничного условия в блоке **В.С. Type** –  *Velocity* (скорость), введите значение скорости 0 мм/с в строку **Velocity**, а в блоке **Направление** поставьте флажок напротив надписи «Y» (рисунок 7.29, а).

Теперь необходимо выбрать узлы, на которые будет наложено граничное условие, т.е. узлы, составляющие нижнюю грань заготовки. Увеличьте объект

при помощи кнопки **Увеличить**  на **Панели управления**, а затем установите прежний тип курсора, нажав на кнопку **Выбрать** . В окне **Pick nodes** (выбор узлов), обычно расположенном в левом нижнем углу экрана, нажмите кнопку **Byedge**  (по грани) для выбора всех узлов какой-либо грани. ЛКМ укажите нижнюю грань заготовки, при этом все узлы грани выделяться красными точками (рисунок 7.30, а).



а



б

Рисунок 7.29 - Пункт **Bdry. Cond.** до (а) и после (б) задания граничных условий

Для применения указанного граничного условия на выбранные узлы нажмите кнопку **Добавить гр. условия**  в пункте **Bdry. Cnd.** При этом

узлы с наложенным граничным условием обозначаться серыми треугольниками (рисунок 7.30, б) и в пункте **Bdry. Cnd.** появится новое граничное условие «Y, Fixed» (рисунок 7.29, б).

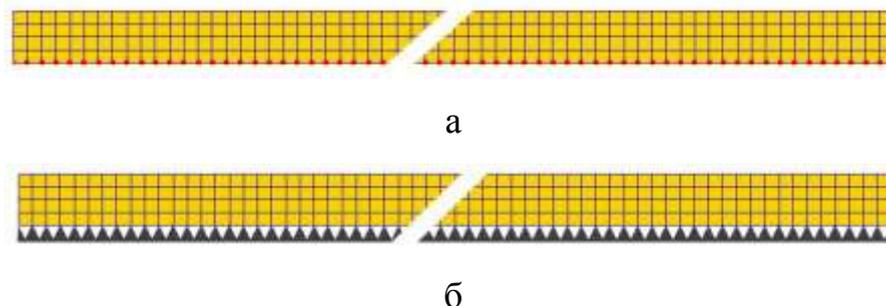


Рисунок 7.30 - Выбор узлов заготовки (а) и наложенное граничное условие симметрии (б)

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

### Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  и в появившемся окне выберите кнопку **Yes** для создания контактных пар. Окно **Взаимодействие объектов** появится с уже определёнными тремя контактными парами (рисунок 7.31).

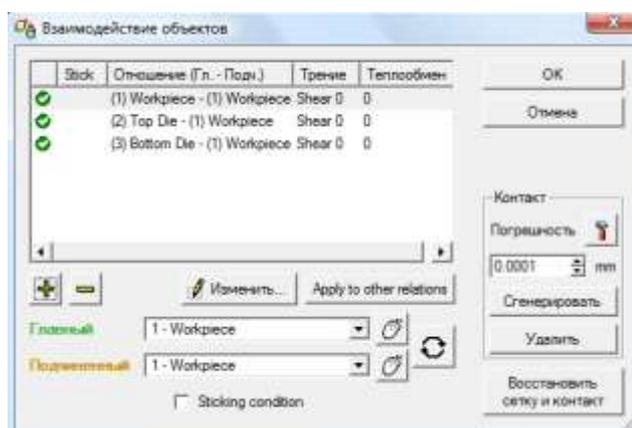
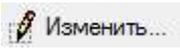


Рисунок 7.31 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

Для определения параметров контакта нажмите кнопку **Изменить** , в появившемся окне **Inter-Object Data Definition** поставьте флажок напротив надписи «*Coulomb*» (трение по закону Кулона), укажите коэффициент трения равный 0,08 (прокатка на шлифованных валках со смазкой) и нажмите кнопку **Заккрыть** (рисунок 7.32).

Т.к. коэффициент трения между заготовкой и обоими инструментами одинаков, то нажатием на кнопку **Apply to other relations** в окне **Взаимодействие объектов** примените параметры первого контакта к остальным.

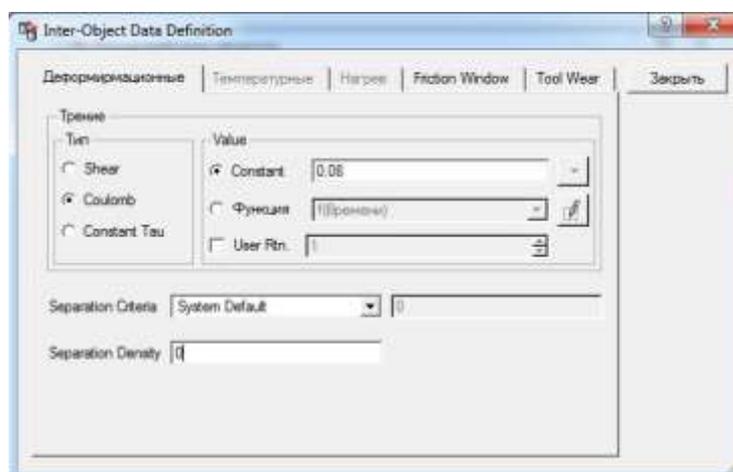
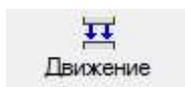


Рисунок 7.32 - Окно **Inter-Object Data Definition**

Для генерации величины точности, с которой компьютер создаст контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта. Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

### Задание движения инструментов

Укажите ЛКМ *Top Die* (валок) в **Дереве объектов** для приложения вращения. Затем перейдите к закладке **Вращение** в пункте **Движение**

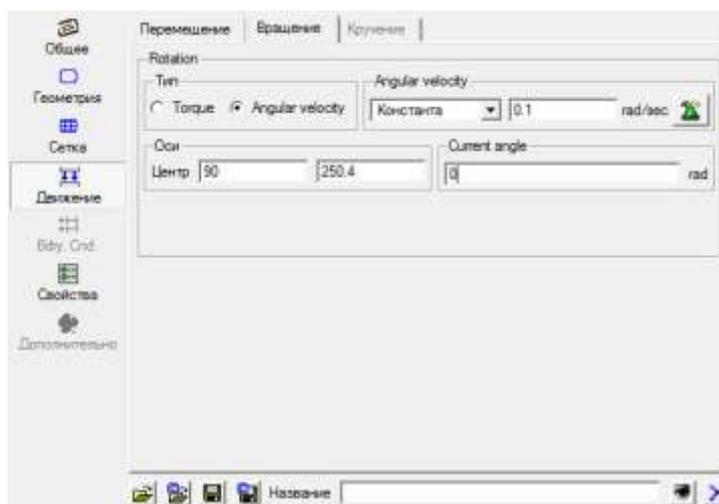


Движение

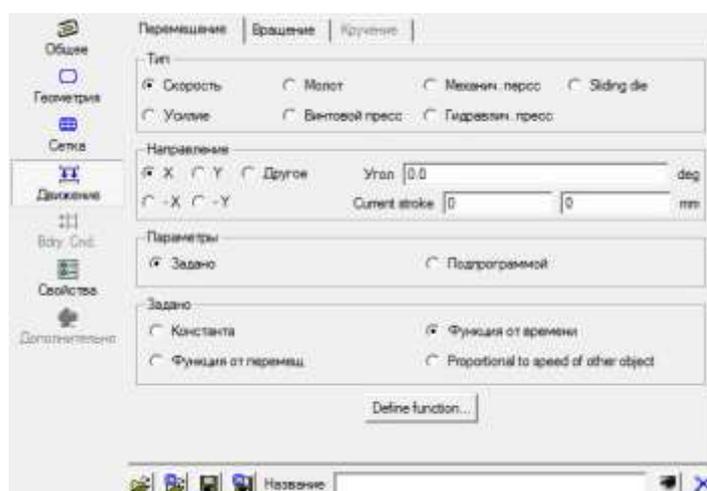
, в блок **Angular velocity** (угловая скорость) введите скорость

вращения валка – 0,1 рад/с, а в строке **Центр** укажите координаты центра оси валка (точка вокруг которой объект вращается) – 90 мм и 250,4 мм соответственно (рисунок 7.33, а).

Определим движение толкателя: укажите ЛКМ *Bottom Die* в **Дереве объектов**, затем нажмите кнопку **Движение**. Убедитесь, что в блоке **Тип** напротив надписи **Скорость** стоит флажок, а в блоке **Направление** установите флажок напротив надписи «X» (движение по оси X). Т.к. толкатель действует на заготовку только в начальный момент прокатки (для улучшения условий захвата), то необходимо задать его скорость как функцию от времени. Для этого в блоке **Задано** установите флажок напротив надписи **Функция от времени** и нажмите кнопку **Define function** (определить функцию) (рисунок 7.33, б).



а



б

### Рисунок 7.33 - Задание вращения валка (а) и движения толкателя (б)

В таблицу появившегося окна **Функция** введите значения, приведенные на рисунок 7.34, что соответствует движению толкателя со скоростью 50 мм/с в течение 0,1 с и уменьшению скорости до полной остановки на 0,15 с. В таблице также дополнительно указывается нулевая скорость на 0,2 с, что необходимо сделать для сохранения нулевого значения при автоматическом линейном экстраполировании при выходе времени за пределы заданного диапазона. После нажатия кнопки **Применить** программа автоматически построит график функции скорости от времени (рисунок 7.34). Для выхода из окна Функция нажмите кнопку **ОК**.

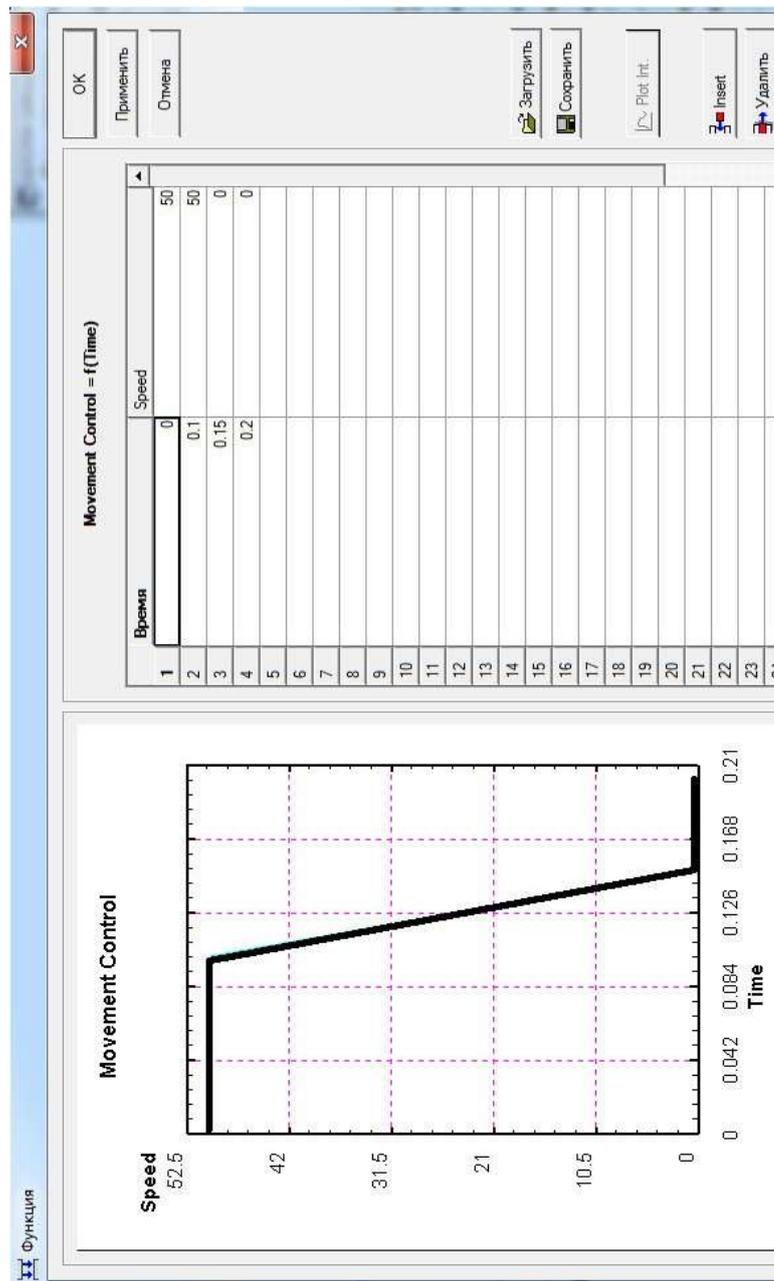


Рисунок 7.34 - Окно **Функция**

### Задание числа шагов расчета

Ограничим шаг решения задачи по времени, для этого нажмите на кнопку **Simulation controls**  и в окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг** . Затем в блоке **Задание шагов решения** установите флажок напротив надписи **With Equal Time Increment** (с равным приращением по времени) и введите величину шага – 0,03 с (при скорости вращения валка 0,1 рад/с за один шаг валок повернется на угол в 10°) (рисунок 7.35).

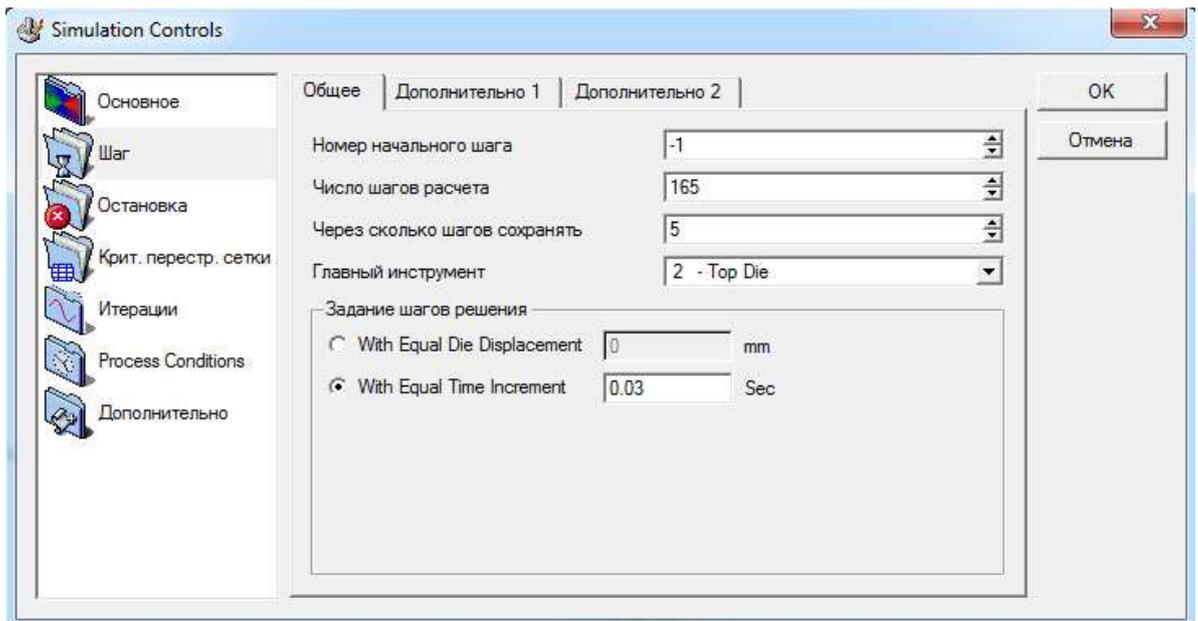


Рисунок 7.35 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Количество шагов определяем исходя из поворота валка на  $30^\circ$  за все время решения. Примем число шагов расчета равным 165 и введем данное значение в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 16).

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *TopDie*. Нажмите кнопку **ОК**.

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**.

### Запись базы данных

Нажмите кнопку **Data base generation** , затем в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки данных произойдет создание базы данных (рисунок 7.36). Для закрытия окна нажмите кнопку **Закреть**.

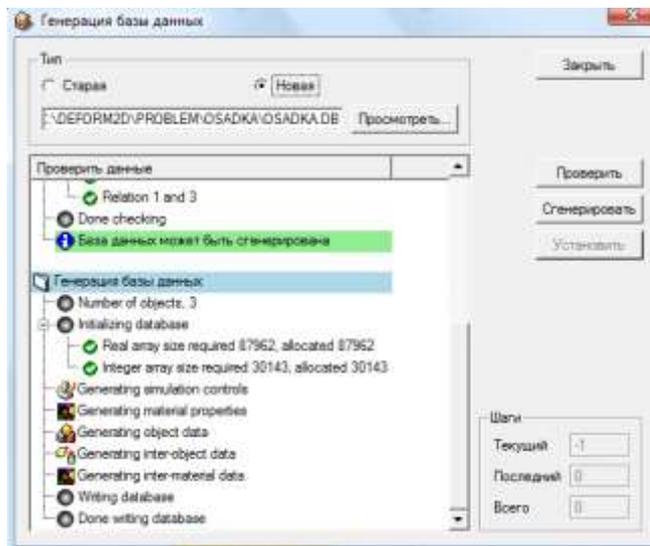


Рисунок 7.36 - Окно Генерация базы данных

Выйдите из препроцессора, нажав на кнопку **Выход** .

### Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** выберите **Старт** или нажмите на кнопку . Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент.

Обратите внимание на то, что файл базы данных скрыт полосой **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается.

### Анализ результатов моделирования

Откройте решаемую задачу в постпроцессоре, нажав ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

Для перемещения по шагам расчета воспользуйтесь кнопками **One step back**  и **One step forward** .

Для начала зеркально отобразим верхнюю половину заготовки относительно оси ее симметрии. Нажмите на кнопке **Зеркальная симметрия**  на **Панели управления**, убедитесь, что в появившемся окне **Symmetry Definition** (задание симметрии) в блоке **Настройки** выбрано «*Add*» (добавить),

а в блоке **Picking option** (опции выбора) – «*System defined*» (определенный системой) (рисунок 7.37). Затем увеличьте заготовку кнопкой **Увеличить**  и верните прежний тип курсора кнопкой **Выбрать** . ЛКМ щелкните по оси симметрии (нижняя грань заготовки), после чего сразу произойдет построение зеркальной части заготовки. Закройте окно **Symmetry Definition**, нажав кнопку **Заккрыть**.

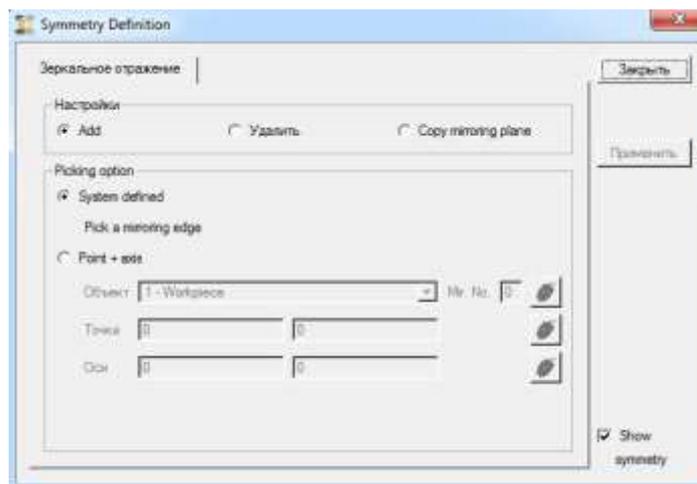


Рисунок 7.37 - Окно **Symmetry Definition**

Для удаления зеркально построенных элементов необходимо, вызвав окно **Symmetry Definition** нажатием кнопки **Зеркальная симметрия** , в блоке **Настройки** поставить флажок напротив надписи «Удалить» (рисунок 7.37), а затем ЛКМ указать удаляемую часть.

Опишите характер изменения усилия прокатки по стадиям процесса (рисунок 7.39). Для построения графика нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** . В окне **Graph (Load-Stroke)** (рисунок 7.38) в разделе **Plot objects** выберите верхний инструмент *Top Die*. По оси абсцисс отложим время процесса, поэтому в разделе **X-axis** установите «*Время*». Для отображения сглаженной кривой в разделе **Smooth** установите «*First order*». Нажмите **ОК**.

Дайте анализ изменения напряженно-деформированного состояния на стадии установившейся прокатки (рисунок 7.41). Для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций нажмите на кнопку

**Параметры** , затем в окне **Параметры** выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain\_Total*») и подтип «*Effective*» («*vonMises*») (рисунок 7.40). В разделе **Экран** установите «*Solid*», а в **Scaling** – «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

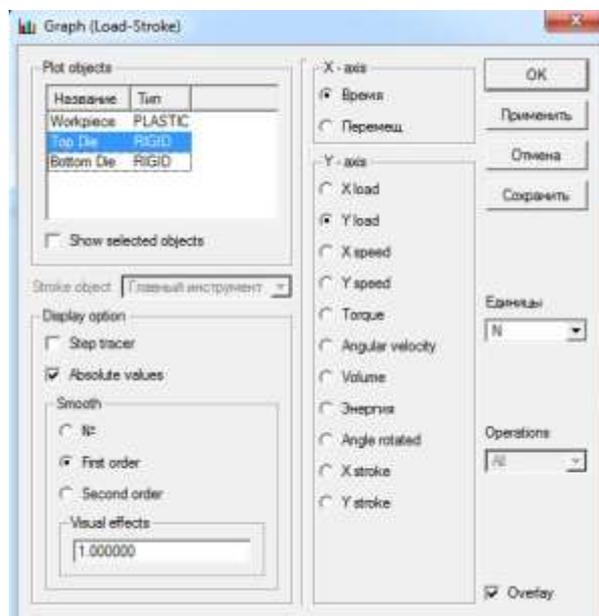


Рисунок 7.38 - Окно **Graph (Load-Stroke)**

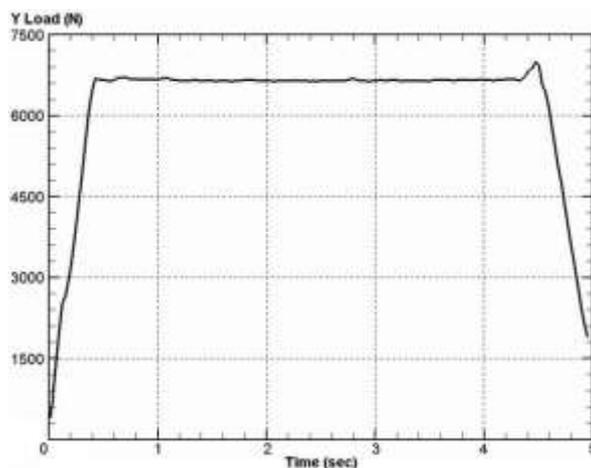


Рисунок 7.39 - Изменение усилия прокатки от времени процесса

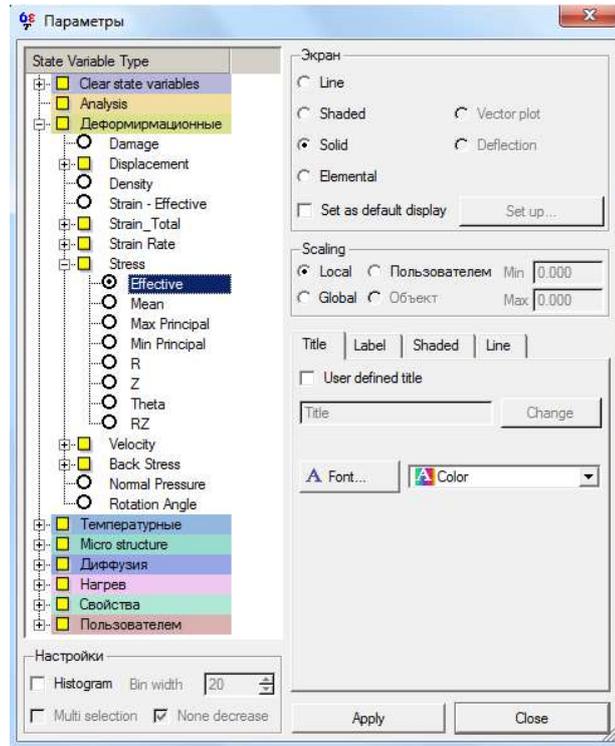


Рисунок 7.40 - Окно **Параметры**

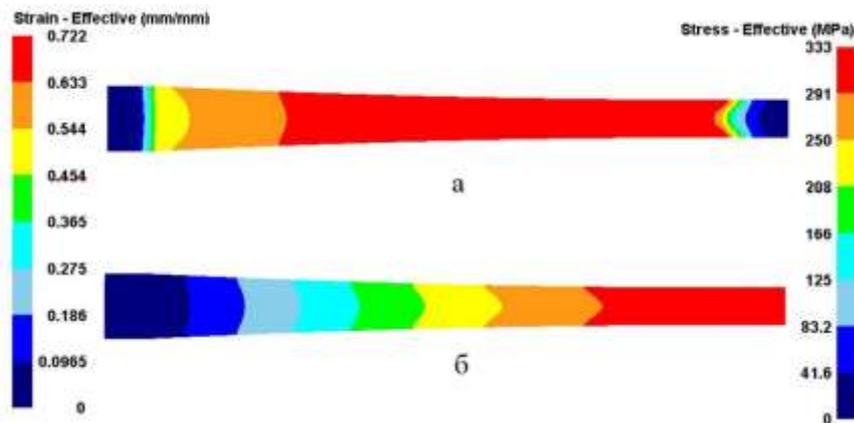


Рисунок 7.41 - Распределение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б)

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 7.43) и векторному полю скоростей (рисунок 7.42).

Для отображения скоростей (рисунок 7.42) нажмите кнопку **Параметры** , выберите тип переменной «*Velocity*» и подтип «*X*» (рисунок 7.40). В разделе **Экран** установите «*Vector plot*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

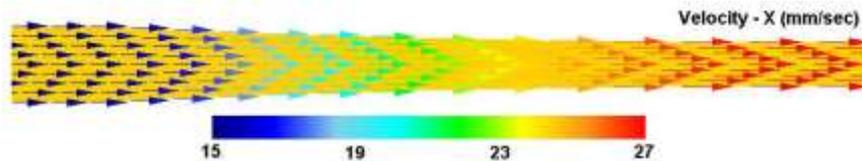


Рисунок 7.42 -Поле скоростей на установившейся стадии прокатки

Для построения координатной сетки (рисунок 7.43) нажмите кнопку **Flow Net**  и в окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* и снова нажмите **Next**. В новом окне введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 180 и 2. Нажмите кнопку **Next**, а затем **Finish**.

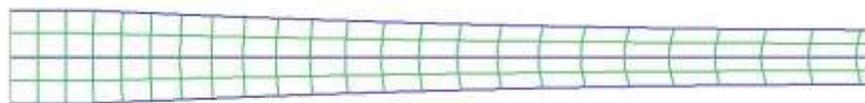
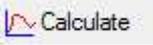
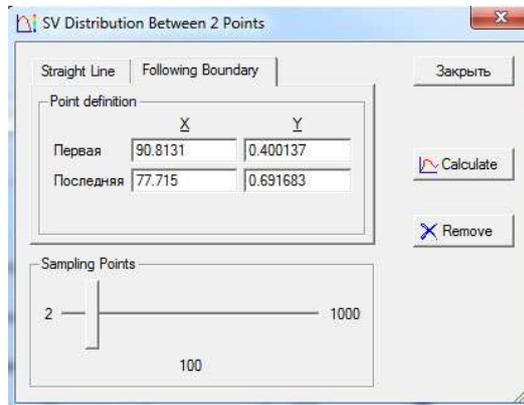


Рисунок 7.43 -Искажение координатной сетки при прокатке

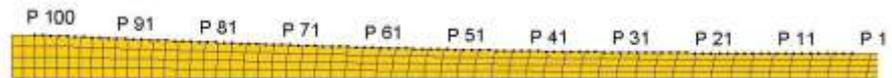
Перед построением графика изменения нормальных напряжений (давления) на контактной поверхности (по дуге захвата) (рисунок 7.45) необходимо отобразить распределение этих напряжений в деформируемой заготовке. Для этого нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Stress*» и подтип «*Y*». Нажмите **Apply**, а затем **Close** (рисунок 7.40).

Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Following Boundary** (по границе) и в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 100 (рисунок 7.44, а).

В окне **Display**, предварительно увеличив ОПД кнопкой **Увеличить** , щелчком ЛКМ укажите крайние точки дуги захвата P1 и P100, начиная с точки выхода заготовки из межвалкового зазора P1 (рисунок 7.44, б). Нажмите на кнопку **Calculate**  (расчет), а затем **Заккрыть**.



а



б

Рисунок 7.44 - Построение графика по точкам

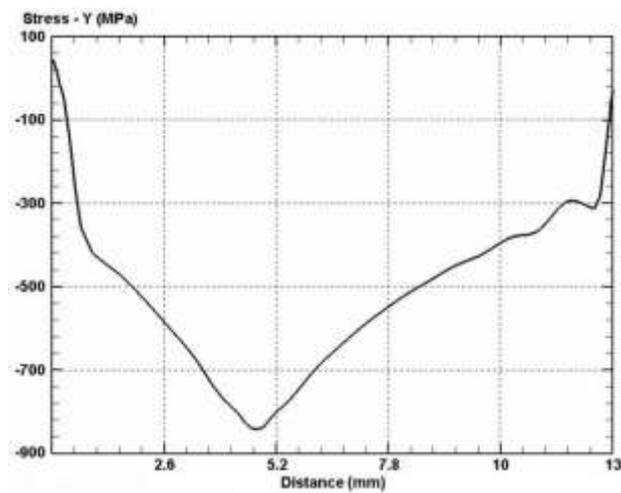


Рисунок 7.45 - Эпюра распределения нормальных (радиальных) давлений по дуге захвата

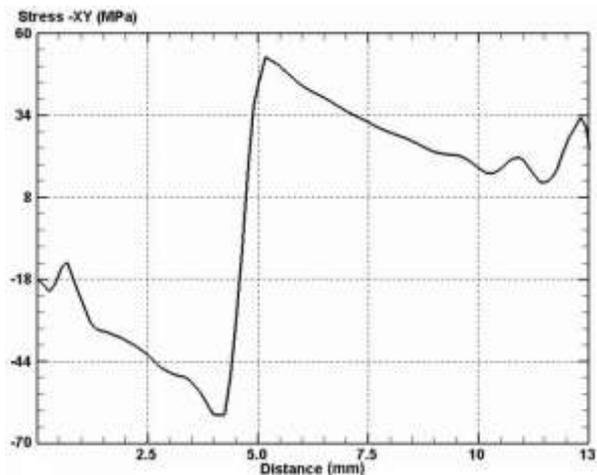


Рисунок 7.46 - Эпюра распределения касательных напряжений (контактных сил трения) по дуге захвата

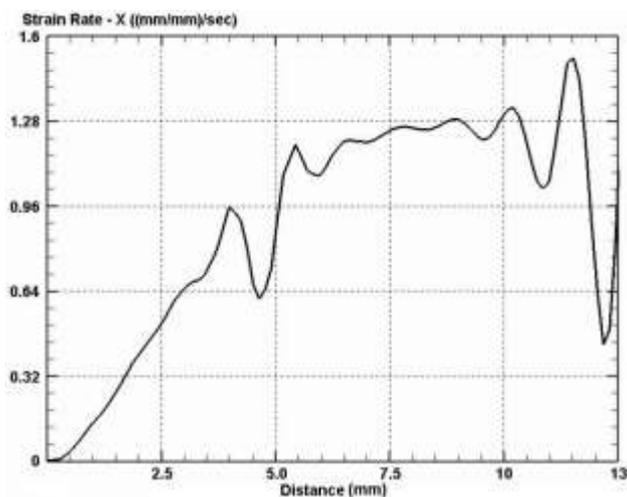


Рисунок 7.47 - Эпюра распределения скорости деформации по дуге захвата

На графике, изображенном на рисунок 26, значение 13 мм по оси абсцисс соответствует точке входа заготовки в ОПД, а 0 мм – точке выхода из ОПД.

Действуя аналогичным образом, постройте эпюры распределения касательных напряжений (контактных сил трения) (рисунок 27) и скорости деформации (рисунок 28) по длине дуги захвата. Для этого достаточно отобразить распределение этих характеристик в деформируемой заготовке и программа автоматически пересчитает ранее построенный график. Вызовите окно **Параметры** (рисунок 21), а затем выберите тип переменной «*Stress*» и подтип «*XY*» или «*Strain Rate*» и «*X*», соответственно.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:
  - сущность процесса прокатки;
  - схема процесса прокатки;
  - напряженно-деформированное состояние при прокатке.
4. Результаты моделирования листовой прокатки:
  - компьютерная модель прокатки;
  - искажение координатной сетки и векторное поле скоростей при прокатке;
  - график усилия прокатки в зависимости от времени процесса;
  - распределение интенсивности напряжений и деформаций при прокатке;
  - эпюры распределения нормальных давлений, касательных напряжений и скорости деформации по дуге захвата.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение процесса прокатки.
2. Перечислите показатели деформации при прокатке
3. Сортамент металлоизделий, получаемый прокаткой
4. В каком случае происходит лучший захват валками: при горячей или холодной прокатке?
5. В каком случае при одинаковой величине обжатия больше сила

прокатки: при большем диаметре валков или меньшем?

6. Различаются ли скорости перемещения заготовки до и после валков?

7. Дайте определение геометрического очага деформации

8. Чем фактический очаг деформации отличается от геометрического очага деформации?

9. Как найти длину геометрического очага деформации?

10. При каких условиях происходит захват заготовки?

11. Опишите характер течения металла вдоль очага деформации

12. Какое сечение называют нейтральным?

13. Из каких участков состоит контактная поверхность валка с прокатываемым металлом?

14. Как соотносятся между собой окружная скорость вращения валков, скорость входа в валки и скорость выхода металла из валков?

15. Дайте анализ эпюр распределения давления и сил трения на контакте валки – металл.

16. Как найти опережение при прокатке?

17. Опишите схему главных деформаций при продольной прокатке

18. Как характеризуется напряжённое состояние в зоне деформации при прокатке?

19. Особенность течения металла в зоне опережения.

20. В каких зонах силы трения активные, в каких реактивные?

21. Опишите напряжённое состояние во внешних внеконтактных зонах при прокатке.

22. Какой участок очага деформации при прокатке называют «мёртвым»?

23. Перечислите причины неравномерности деформаций при прокатке.

24. Что происходит в зоне деформации на участке прилипания?

25. Как задать движение валков в программе *DEFORM-2D*?

26. Как задать граничные условия на осевой симметрии?

27. Как обеспечить захват заготовки валками?

28. Как построить эпюры контактных напряжений на границе валок-металл?

### 7.3 Уширение при прокатке

Цель работы: закрепление знаний по изучению процесса деформирования металла при прокатке путем практического изучения влияния ширины и степени обжатия на величину поперечной деформации; получение навыков работы в программном комплексе DEFORM-3D.

#### Краткие теоретические сведения

При прокатке, наряду с удлинением металла в направлении прокатки, имеет место значительная деформация в поперечном направлении (уширение), оказывающая существенное влияние на характер протекания процесса прокатки. *Поперечной деформацией* или *уширением* при прокатке называется увеличение ширины прокатываемого материала.

Напряженное состояние полосы при прокатке характеризуется трехосным сжатием (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**), причем в обычных условиях прокатки продольное главное напряжение  $\sigma_3$  является минимальным, поперечное  $\sigma_2$  – средним, а вертикальное  $\sigma_1$  – максимальным ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). Т.к. деформация металла происходит главным образом в направлении наименьшего главного напряжения, то обжимаемый металл при прокатке устремляется преимущественно в продольном направлении.

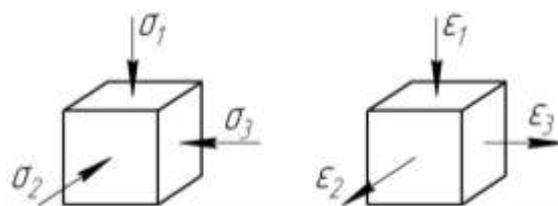


Рисунок 7.48 - Напряженно-деформированное состояние металла при прокатке

Именно по этой причине факторы, влияние которых связано с изменением объемного напряженного состояния при прокатке, прежде всего, отражаются на ходе продольной деформации. Так, при увеличении обжатия избыток металла в большей мере идет на приращение вытяжки и в меньшей –

на увеличение уширения.

Весьма характерно действие таких изменений объемного напряженного состояния, при которых нарушаются условия главным образом по одной из осей деформации. В частности, если увеличивать ширину полосы, то при постоянстве всех прочих условий происходит резкое возрастание поперечных напряжений с соответствующим ростом отношения этого напряжения к продольному. Понятно, что при этом поперечная деформация затрудняется, а продольная облегчается.

Напротив, при прокатке узких полос значения главных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости, уже более близки друг к другу, как и величина соответствующих деформаций. При переходе к еще более узким полосам можно наблюдать смену напряжений среднего и минимального, после чего поперечная деформация происходит уже в большей степени, чем продольная.

Таким образом, на величину уширения влияют следующие факторы: высота и ширина полосы, температура и прочностные характеристики прокатываемого материала, величина обжатия, число проходов, угол захвата, диаметр валков, скорость прокатки, условия смазки и т.п.

Уширение характеризуется показателями: абсолютная деформация  $\Delta B = B_1 - B_0$ , относительная деформация  $\varepsilon_B = ((B_1 - B_0)/B_0)/100\%$  и коэффициент деформации  $\beta = B_1/B_0$ . Величину уширения приближенно можно оценить по следующим теоретическим формулам:

1) по формуле А.И. Целикова

$$\Delta B = \left( l + \frac{\Delta H}{2f} \right) \left[ 2 \left( \frac{H_1}{\Delta H} \right)^2 \ln \frac{H_0}{H_1} - 2 \frac{H_1}{\Delta H} + 1 \right],$$

2) по формуле Б.П. Бахтинова

$$\Delta B = 0,575 \frac{\Delta H}{H_0} \left( l - \frac{\Delta H}{2f} \right),$$

3) по формуле Эжелунда

$$\Delta B = -A - B_0 + \sqrt{A^2 + B_0^2 + 4ml(3H_0 - H_1)},$$

$$A_i = 2m_i (H_{0i} + H_{1i}) \frac{l_i}{B_{0i}}, \quad m_i = \frac{1,6fl_i - 1,2\Delta H_i}{H_{0i} + H_{1i}},$$

где  $l$  – горизонтальная проекция дуги захвата;

$$l = \sqrt{R\Delta H}$$

Формула А.И. Целикова справедлива для высоких и узких полос, а формула Б.П. Бахтинова – для широких и низких. Широкие полосы характеризуются отношением  $B/L > 4$ , узкие полосы – отношением  $B/L < 1$ , где  $B$  – средняя ширина полосы:

$$B = \frac{B_0 + B_1}{2}.$$

Качественное представление о характере течения металла при уширении дано на рисунке 7.49.

Уширение является нежелательным фактором при прокатке, т.к. вызывает появление растягивающих напряжений в боковых кромках полосы и образование трещин. Ошибки в определении уширения при прокатке приводят к снижению производительных прокатных станов и ухудшению качества проката. В связи с этим при прокатке следует стремиться к исключению действия факторов, вызывающих интенсивную деформацию в поперечном направлении. Для этого необходимо оценить влияние на уширение различных технологических факторов. При промышленной прокатке из всех перечисленных выше факторов, влияющих на уширение, большинство жестко задано маркой сплава, конструкцией стана, технологическими ограничениями. Единственным параметром, которым можно реально управлять, является обжатие и число проходов.

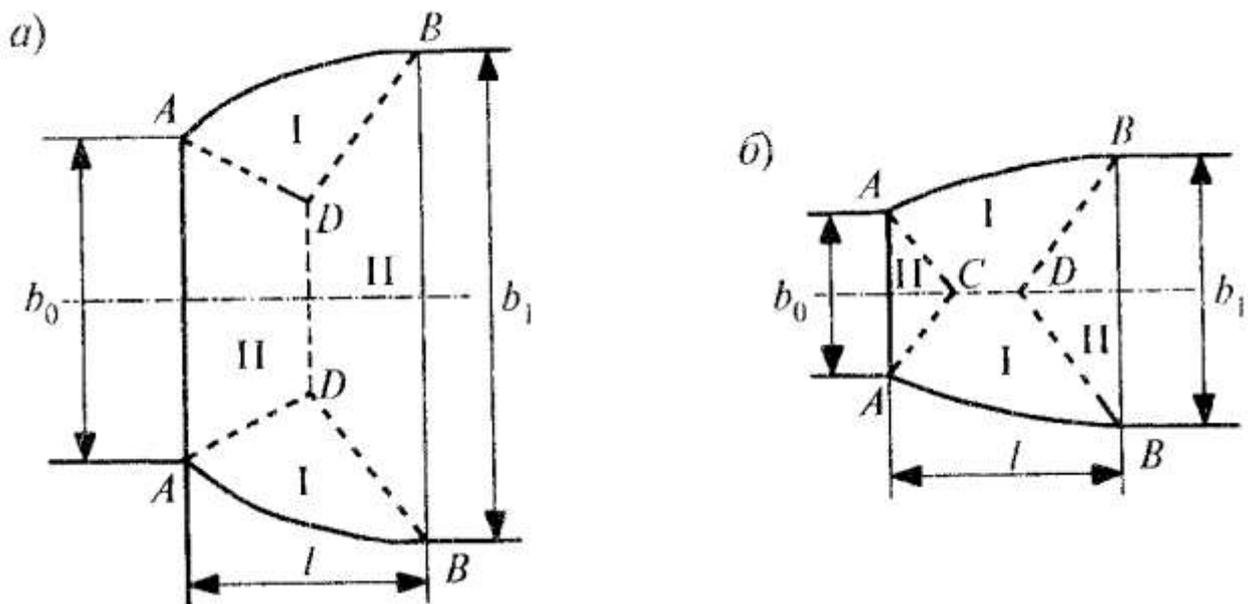


Рисунок 7.49 - Деление очага деформации на зоны преимущественного течения в длину и ширину на широком (а) и узком (б) очаге

Если очаг деформации широкий, то объем металла, смещенный в ширину, будет пропорционален площади треугольника  $ABD$ , а смещаемый в длину площади трапеций  $ADDA$  и  $ВДДВ$ . На узком очаге деформации соотношение между зонами меняется.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Создание новой задачи и базы данных

Рассмотрим процесс холодной прокатки штрипса полосы размерами  $10 \times 30 \times 150$  мм из алюминия в гладких валках диаметром  $300 \times 100$ , вращающихся с угловой скоростью  $0,1 \text{ рад/с}$ . Обжатие производится на 30%.

Откроем программу **DEFORM-3D** и создадим новую задачу аналогичным способом как в предыдущих лабораторных работах. Назовем задачу **ROLLING\_3**.

Нажмите кнопку **Настройки задачи**, появится окно, в котором по умолчанию будет активна закладка **Основное**. Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система "СИ" и выбран режим расчета деформаций. Нажмите **ЛКМ ОК**.

Перейдем к заданию свойств объекта **Workpiece** (Заготовка). Для этого выделим данный объект в поле **Дерево объектов** и перейдем к закладкам поля **Свойства объектов**. Форма заготовки может быть задана на закладке **Geometry** командой **Geo Primitive**. Геометрия заготовки описывается прямоугольником с размерами 10×30×150мм. Следовательно, для объекта **Box** (прямоугольник) в поле **Size** (размеры) введите следующие значения: **Width** (ширина) 30 мм; **Height** (Высота) 10 мм; **Length** (Длина) 150 мм (рисунок 7.50) и нажмите кнопку создать.

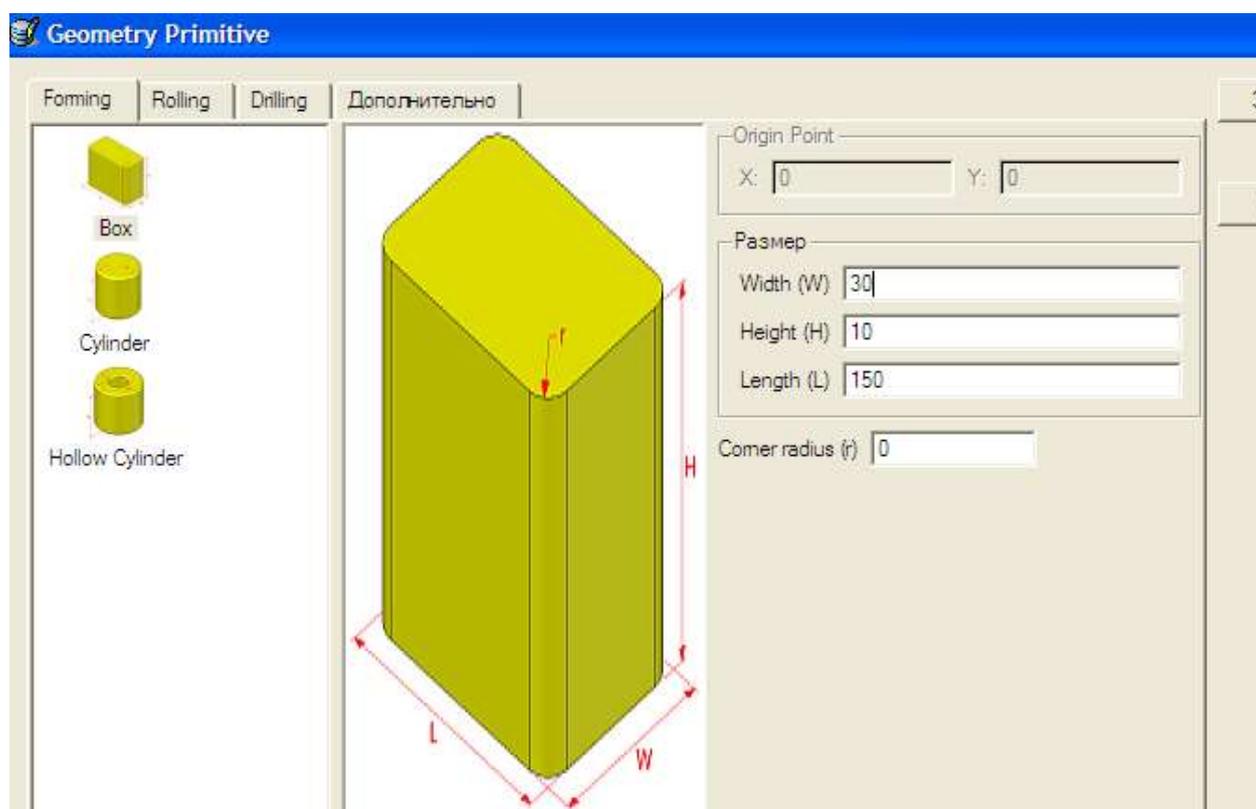


Рисунок 7.50 - Создание геометрии заготовки

На вкладке **General** (Общее) с помощью кнопки **Check GEO** (проверить геометрию) можно проверить геометрию объекта на наличие ошибок построения. Окно с отчетом по проверке заготовки представлено на рисунок 7.51.

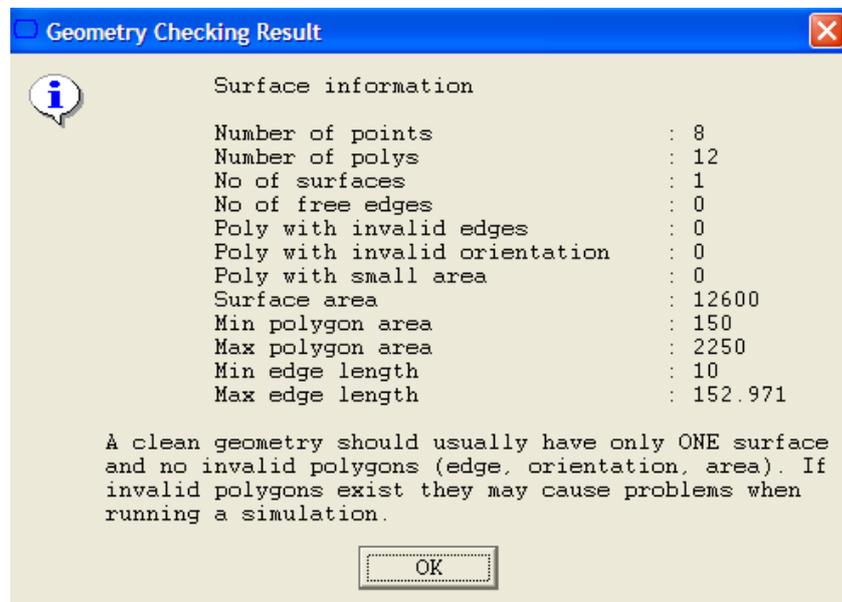


Рисунок 7.51 - Результат проверки геометрии

Значение третьей строки должно быть – 1, о остальных четырех – 0. Если это соответствует полученным результатам, то можно продолжать дальнейшую установку параметров. Если возникли проблемы, то необходимо применить соответствующие меры.

Определимся с материалом заготовки. На закладке **General** (общие свойства) выберем материал **DIN-AL-995[550-950F (300-500C)]**.

Перейдем к созданию сетки КЭ для заготовки с помощью закладки **Mesh**(конечно-элементная сетка). Для задания сетки перейдем на вкладку **Detailed Setting** (Детальные установки). Выставим следующие параметры: **Number of Elements** (Количество КЭ) – 32000; **Size Ratio** (Коэффициент отношения максимального размера элемента к минимальному) – 1. После последовательно нажимаем **Surface Mesh** (Поверхностная сетка КЭ) и **Solid Mesh** (Объемная сетка КЭ). Сгенерированная сетка КЭ имеет вид (рисунок 7.52).

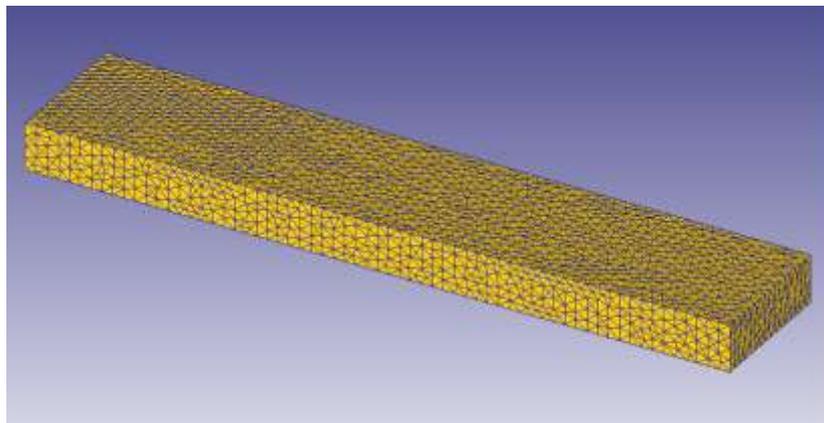


Рисунок 7.52 - Сетка КЭ заготовки

Перейдем к заданию геометрии валков. Два этих объекта задаются аналогично, поэтому сведем описание их моделирование к определенной последовательности действий. Сначала в поле **Дерево объектов** кнопкой **Insert object** (Добавить объект) вставим новые объекты **Top Die** (верхний валок) и **Bottom Die** (нижний валок). На закладке **Generce** (общие свойства) убедимся, что объектом присвоены свойства жесткого тела **Rigid**. Убедимся, что у объекта **Top Die** включена галочка **Primary Die** (Основной инструмент).

Зададим геометрию верхнего валка с помощью команды **Geo Primitive**. Геометрия валка описывается цилиндром с размерами 300×100мм. Следовательно для объекта **Cylinder** введите следующие значения: **Diameter** (Диаметр) 300 мм, **Height** (Высота) 100мм,  $x=y=0$ . В последней строке **of revolved sections** поставьте число 500, определяющее число граней на объекте. Далее нажмите **Create** (рисунок 7.53).

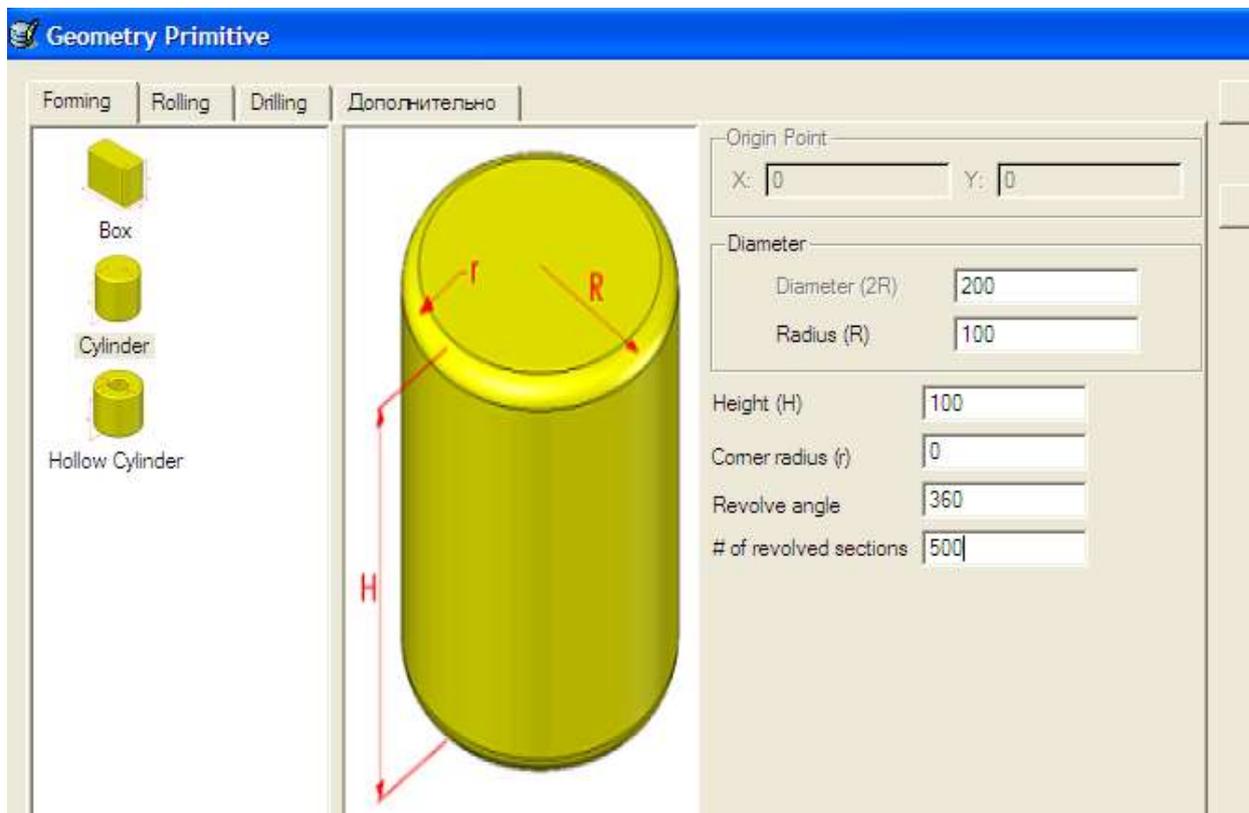


Рисунок 7.53 - Создание геометрии валков

Действуя аналогичным образом постройте геометрию нижнего валка с размерами верхнего валка с тем же числом граней на инструменте 500 при  $x=y=0$ .

После построения геометрии валков необходимо выполнить их позиционирование в соответствии с рисунком 7.55. Центры валков должны располагаться на одной вертикальной линии, совпадающей с осью  $y$ . Сначала расположите валки по отношению друг к другу. Вызовите окно Позиционирование объектов и воспользуйтесь методом Смещение. Позиционируемый объект нижний валок. Сместите его в направлении оси  $-y$  на величину  $-307$  с учетом зазора между валками. Затем расположите заготовку и валки по отношению друг к другу. Примем, что процесс прокатки идет слева направо. Ось прокатки  $x$ , ось вращения валков  $z$ .

При проведении позиционирования и правильности расположения заготовки относительно валков полезно использовать кнопки ориентации вида.

	Вращать вокруг оси X	Эта кнопка позволяет объектам вращаться вокруг оси X в системе координат Объекта или Экрана.
	Вращать вокруг оси Y	Эта кнопка позволяет объектам вращаться вокруг оси Y в системе координат Объекта или Экрана.
	Вращать вокруг оси Z	Эта кнопка позволяет объектам вращаться вокруг оси Z в системе координат Объекта или Экрана.

		Вид YZ	Ось X направлена от Экрана (+) или внутрь Экрана (-)
		Вид XZ	Ось Y направлена от Экрана (+) или внутрь Экрана (-)
		Вид XY	Ось Z направлена от Экрана (+) или внутрь Экрана (-)

С помощью кнопки Изометрия получен изометрический вид расположения валков и заготовки (рисунок 7.54).

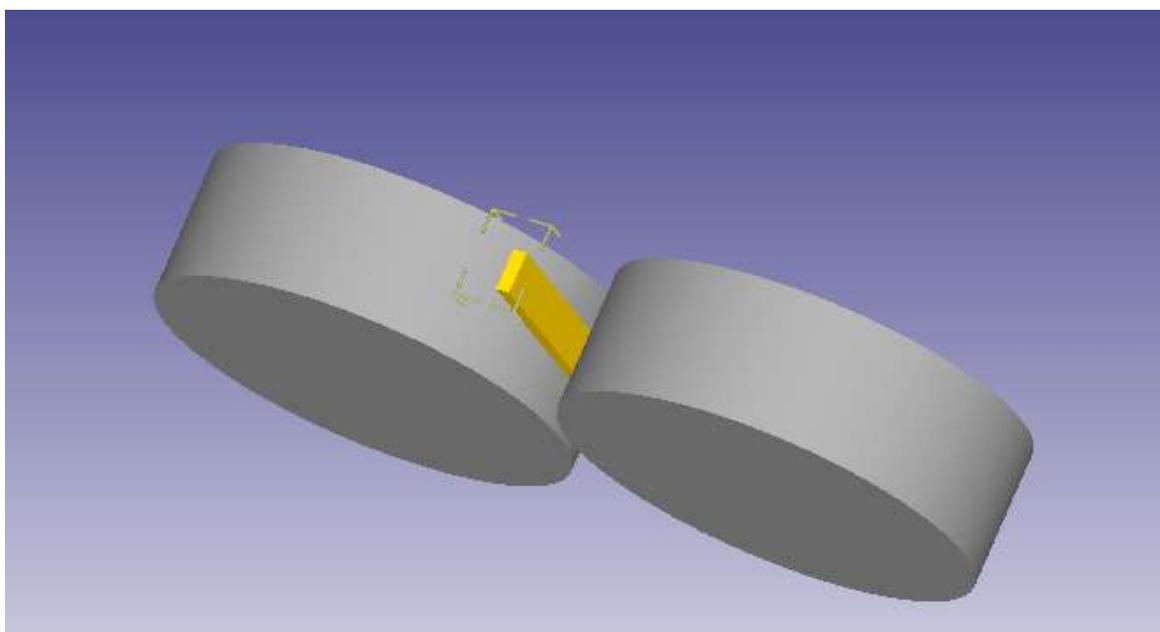


Рисунок 7.54 - Изометрический вид модели процесса прокатки

Нажав ЛКМ на кнопку +Z, получим изображение на рисунок 8.

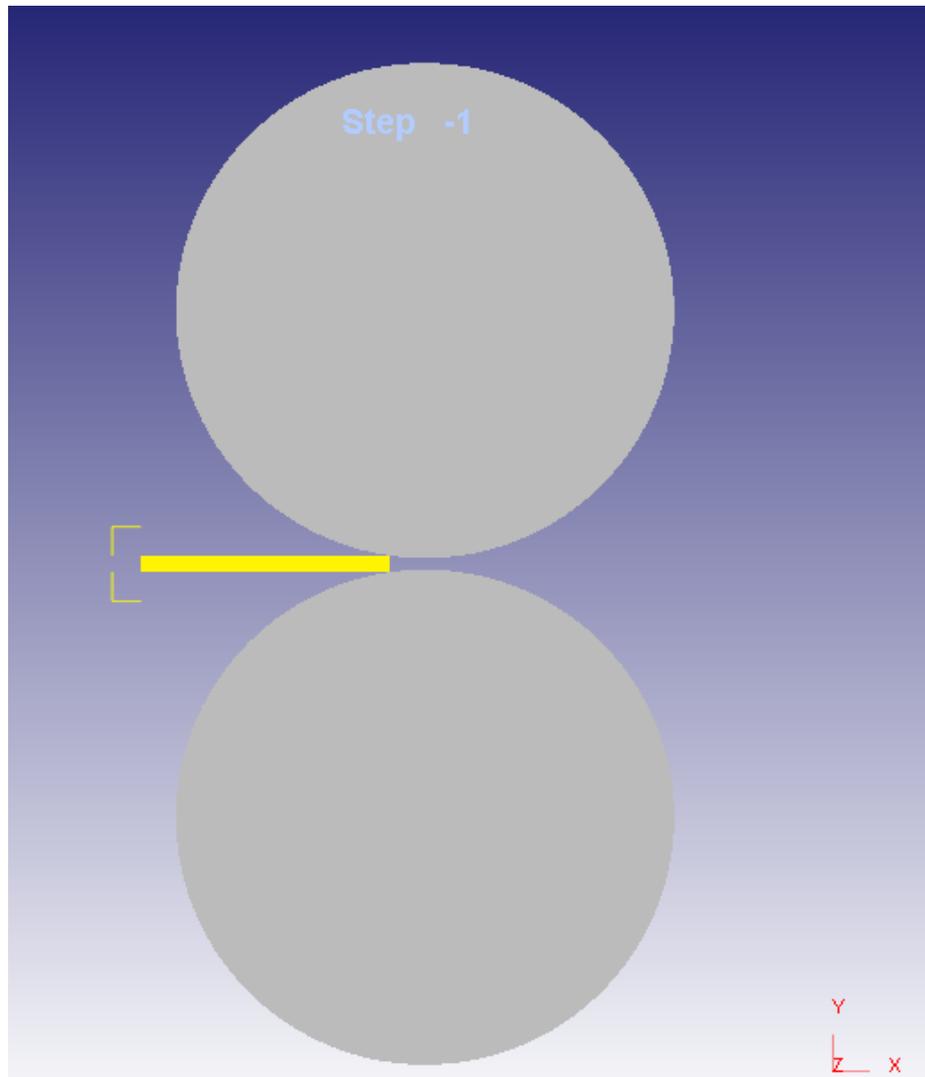
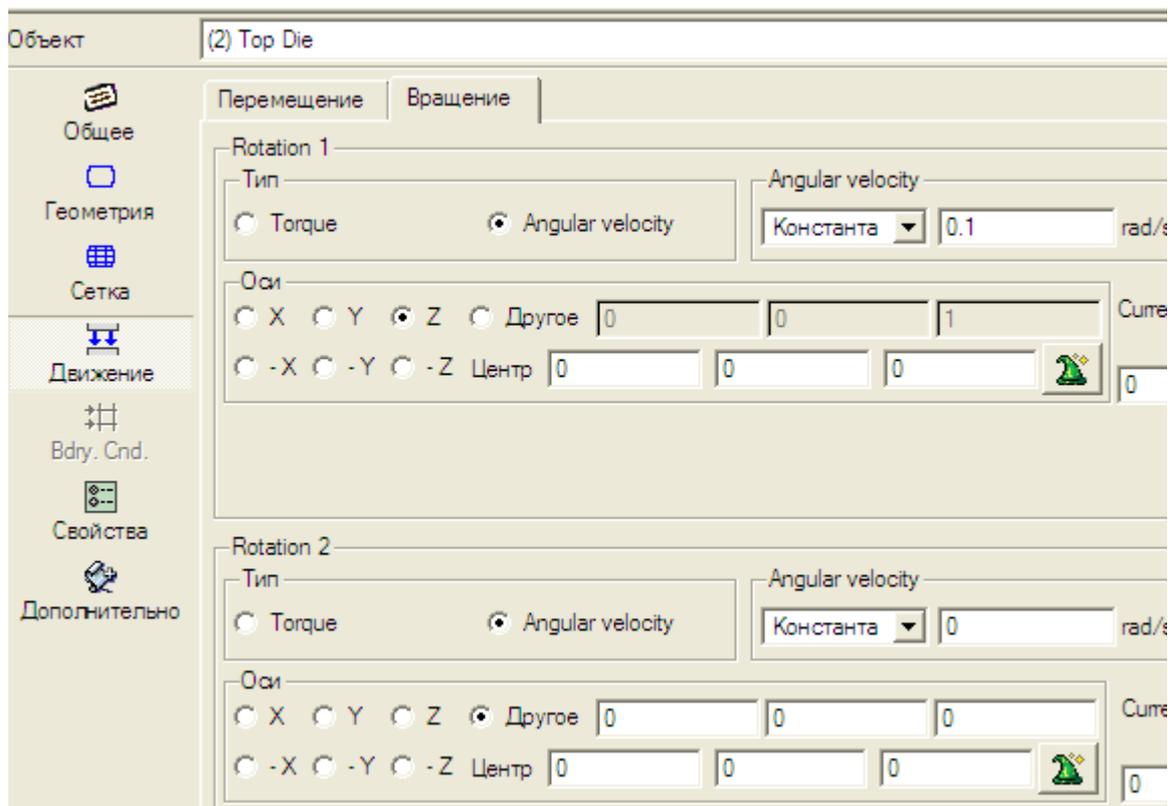
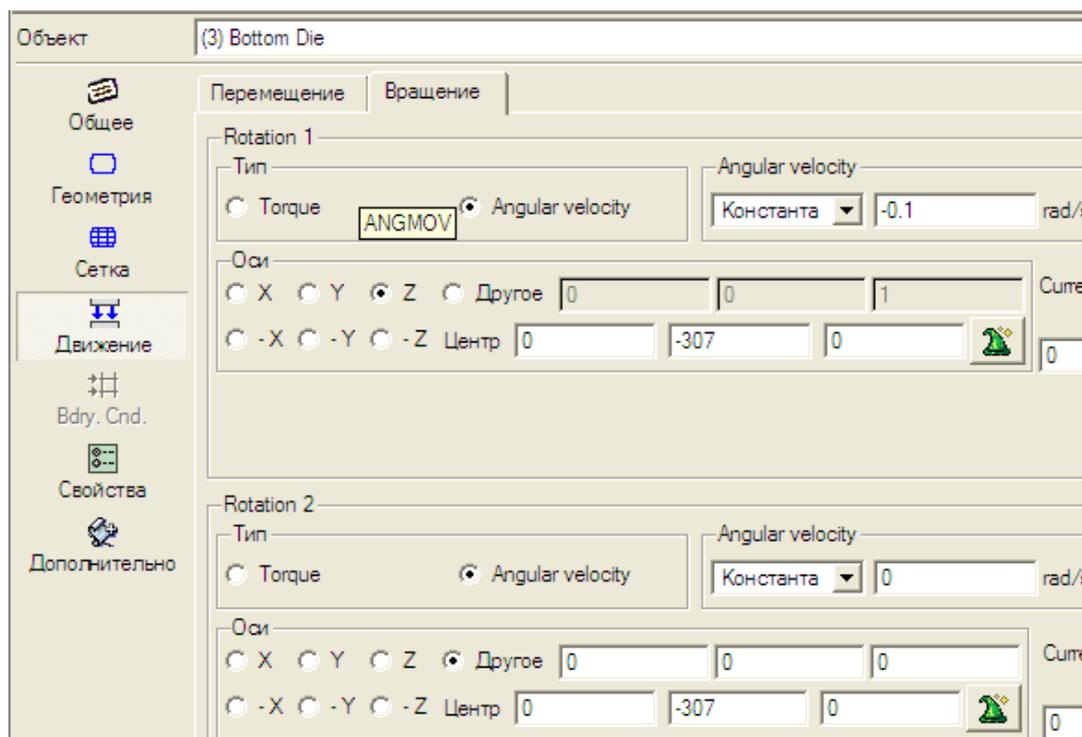


Рисунок 7.55 - Геометрическая модель процесса прокатки полосы в плоскости, перпендикулярной оси Z

Зададим вращение валков с угловой скоростью 0.1 рад/с, что соответствует скорости прокатки 15мм/с. Перейдем на вкладку **Rotation** (вращение) закладки **Movement** (Движение). На этой вкладке зададим параметры вращения в соответствии с рисунком 7.56.



а)



б)

а – верхнего валка; б – нижнего валка

Рисунок 7.56 - Задание вращения прокатных валков

Для задания движения полосы перед захватом в валки укажите ЛКМ в

Дереве объектов **Workpiece** для приложения скорости перемещения. Затем нажмите кнопку **Движение**. Убедитесь, что в блоке **Тип** напротив надписи скорости стоит флажок, а в блоке **Направление** установите флажок напротив надписи **X** (движение по оси **X**) (рисунок 7.57).

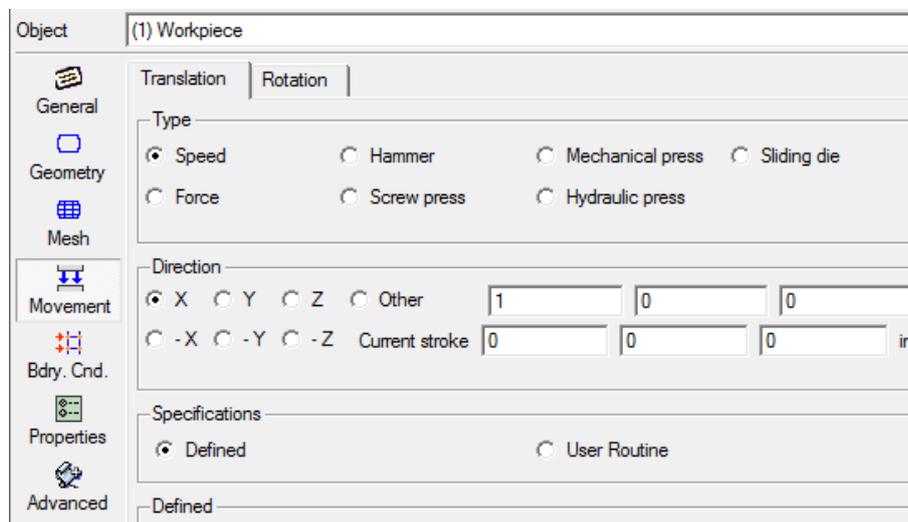


Рисунок 7.57 Задание перемещения заготовки

Теперь необходимо выбрать узлы, на которые будет наложено граничное условие, т.е. узлы, составляющие передней грани заготовки направленной к валкам. Увеличьте объект при помощи кнопки **Увеличить**  на **Панели управления**, а затем установите прежний тип курсора, нажав на кнопку **Выбрать** . В окне **Picknodes** (выбор узлов), обычно расположенном в левом нижнем углу экрана, нажмите кнопку **Задание плоской поверхности**  (по грани) для выбора всех узлов какой-либо грани. ЛКМ укажите переднюю грань заготовки, при этом все узлы грани будут выделяться красными точками (рисунок 7.58). Выберете пункт **Bdry.Cnd.**



**Bdry. Cnd.** (граничные условия), укажите тип граничного условия в блоке **В.С. Type** –  *Velocity* (скорость), введите значение скорости 15 мм/с в строку **Velocity**, а в блоке **Направление** поставьте флажок напротив надписи «X» (рисунок 7.59).

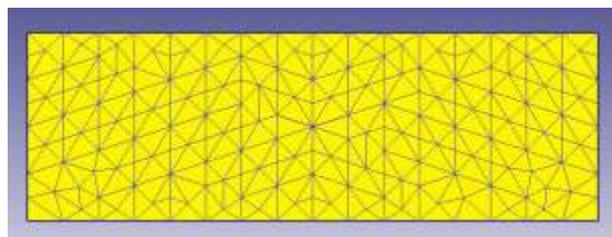


Рисунок 7.58 - Выбор узлов передней грани полосы

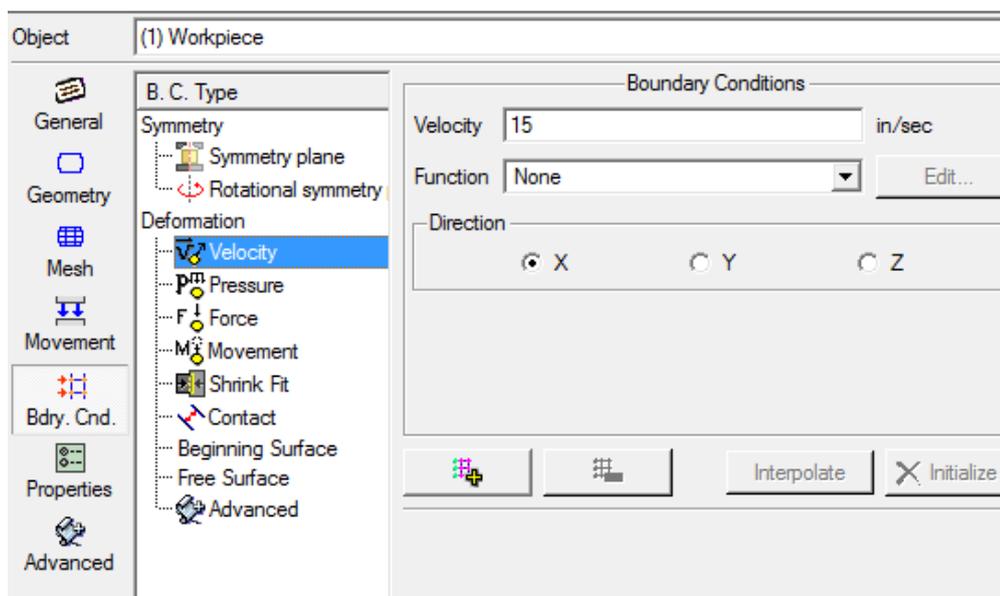


Рисунок 7.59 - Установка граничных условий на передней грани полосы

Для применения указанного граничного условия на выбранные узлы нажмите кнопку **Добавить гр. условия**  в пункте **Boundary Conditione**.

Теперь сформируем параметры взаимодействия объектов между собой. В конечном итоге получаются две пары объектов: заготовка - верхний валок и заготовка – нижний валок. Чтобы задать эти пары, перейдем в меню взаимодействия объектов Inter-object. В открывшемся меню для каждой пары укажем характер взаимодействия по закону трения Зибеля, указав коэффициент трения 0,2 (рисунок 7.60).

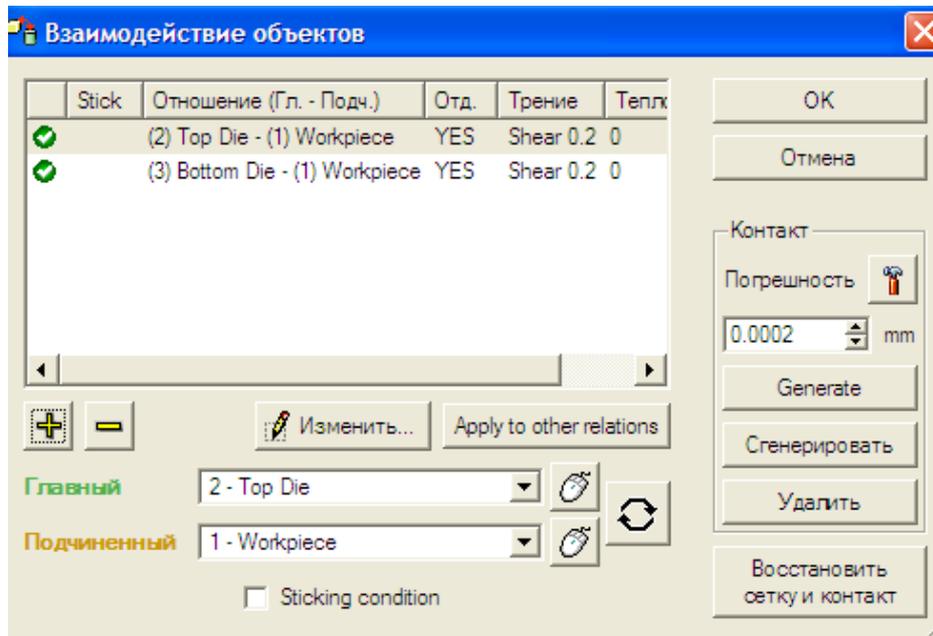


Рисунок 7.60 - Окно взаимодействия объектов

После задания параметров контакта можно генерировать контакт между парами. Для начала зададимся точностью определения, например, 0,0002. Для этого нажмите кнопку **Tolerance** (допускаемое отклонение). После определения допуска генерируем контакты кнопкой **Generate all** (Моделировать все).

Если генерация контактов прошла успешно, внизу основного окна в строке появится сообщение Contact has been generated between object: 2 and 1, 3 and 1 (Контакт был сгенерирован между объектами: 2 и 1, 3 и 1). Узлы контакта инструмента с заготовкой показаны на рисунке 7.61 цветными точками.

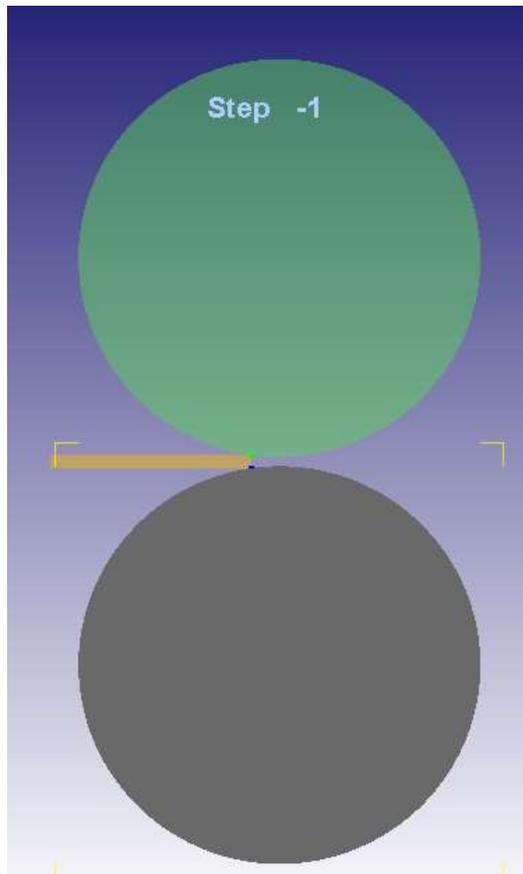


Рисунок 7.61 - Контакт валков с заготовкой

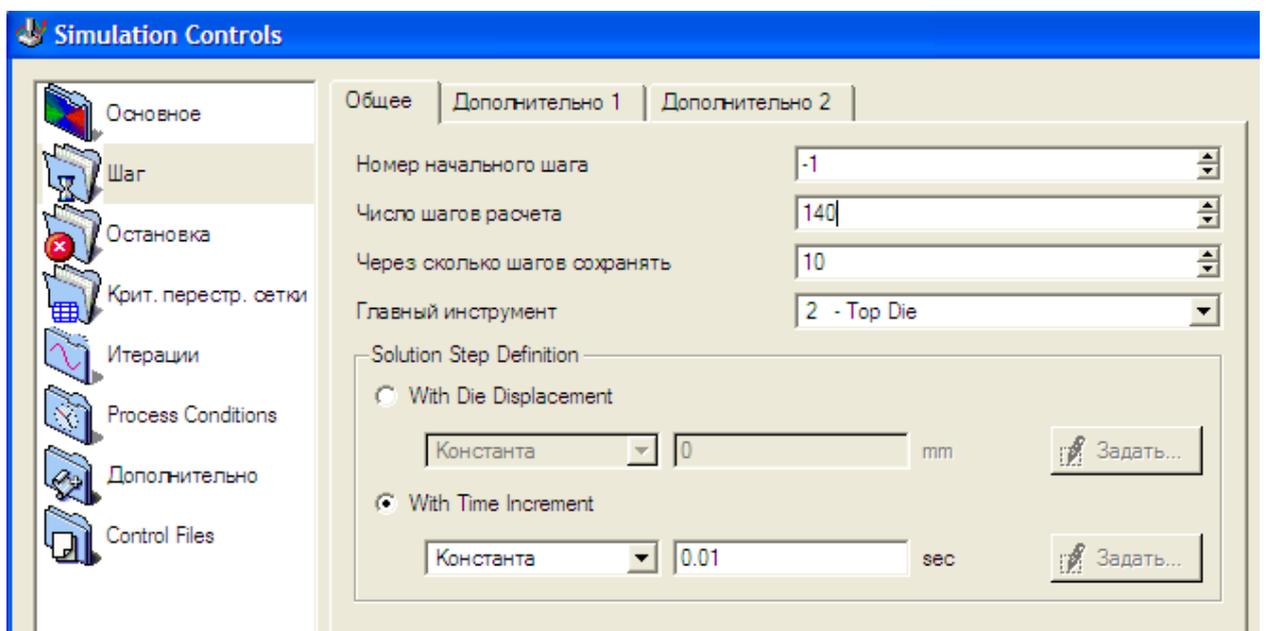


Рисунок 7.62 - Окно Simulation Controls (Параметры моделирования)

Зададим параметры моделирования. В заданной задаче можно ограничить

лишь заданием шага моделирования и общего числа шагов. Войдем в меню Simulation control (параметры моделирования) (рисунок 7.62).

В открывшемся меню перейдем на закладку Step (шаг). Подбираем значение шага из кратности общего количества шагов десяти (интервал сохранения шагов). Величина шага моделирования Solution Step Definition – 0,01с. За один шаг заготовка переместится на величину  $15\text{мм/с} \cdot 0,01\text{с} = 0,15\text{ мм}$ . Длина очага деформации  $L = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{150 \cdot 3} = 21\text{мм}$ . Тогда число шагов, обеспечивающих заполнение очага деформации металлом заготовки, равно  $21/0,15 = 140$ .

Теперь можно перейти к генерации базы данных. Для этого перейдем к меню Database Generation (Генерация базы данных). В этом меню проведем проверку на работоспособность базы, нажав кнопку Check (проверить). В самой нижней строке должна быть запись Data base can be generation (База данных может быть сгенерирована).

После этого нажатием кнопки Generate (Сгенерировать) генерируем базу данных. Строка Done writing data base (Генерация базы данных выполнена) свидетельствует о том, что база сгенерирована успешно. Теперь можно выйти из программы DEFORM-3D Preprocessor.

### **Анализ результатов моделирования**

Чтобы воспользоваться готовым расчетом, его базу данных открываем в программе DEFORM-3D Post Processor. В открывшемся меню увеличьте заготовку в области очага деформации и посмотрите его заполнение по рисунку 16 на последнем шаге. Так как очаг деформации заполнен металлом заготовки, то необходимо выйти из постпроцессора и вернуться в препроцессор для формирования базы данных процесса установившейся прокатки. В модели заготовки необходимо убрать на передней грани граничные условия, определяющие движение заготовки. Целесообразно рассмотреть формирование контактных поверхностей между заготовкой и валками. В окне **Simulation**

**controls** ввести новое число шагов расчетов установившейся прокатки 160, а в окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**, а после закрытия окна продолжить расчет.

По результатам расчета постройте графики изменения крутящего момента на верхнем валке (рисунок 7.63) и распределение интенсивности напряжений (рисунок 7.64). По графикам можно сделать вывод о начале установившейся стадии процесса прокатки и возможности изучения уширения.

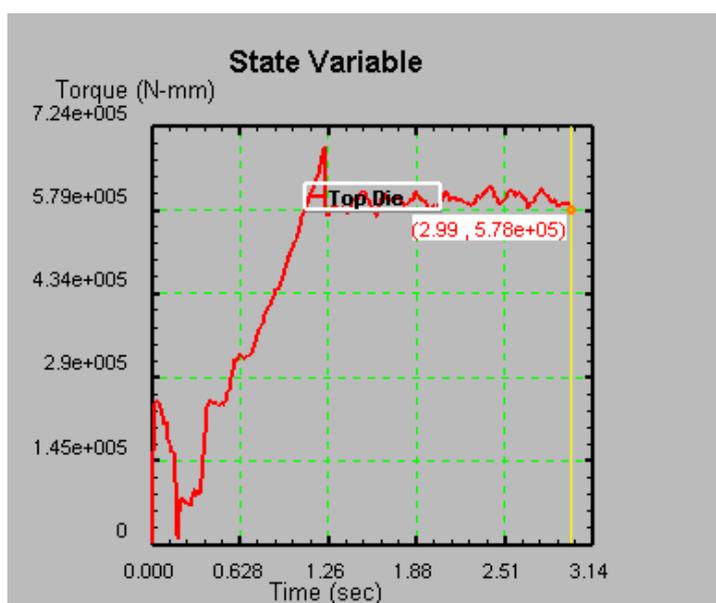


Рисунок 7.63 - Изменение крутящего момента на верхнем валке от времени прокатки

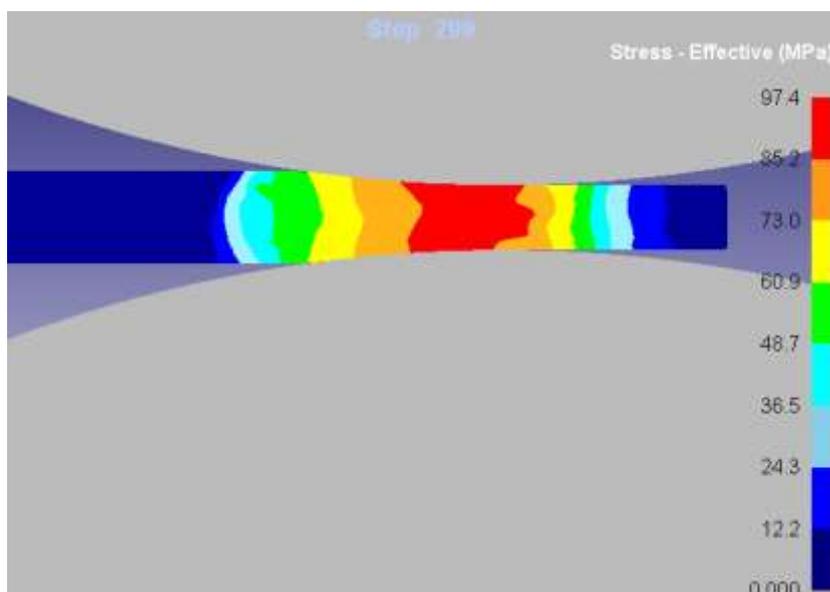


Рисунок 7.64 - Распределение интенсивности напряжений на боковой грани деформируемой полосы.

С помощью команды **Slicing** (разрез) можно сделать любой разрез либо всех сразу объектов на экране монитора, либо часть из них. Плоскость разреза может быть выбрана либо по трем точкам, либо по точке на плоскости P (Point) и нормали N (Normal) (рисунок 7.65).

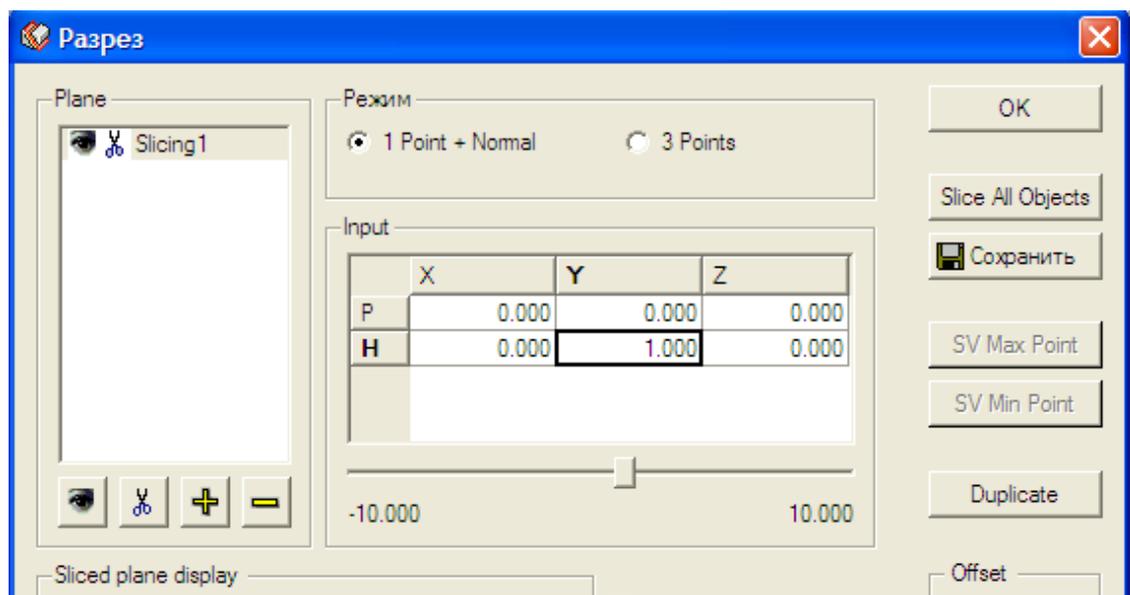
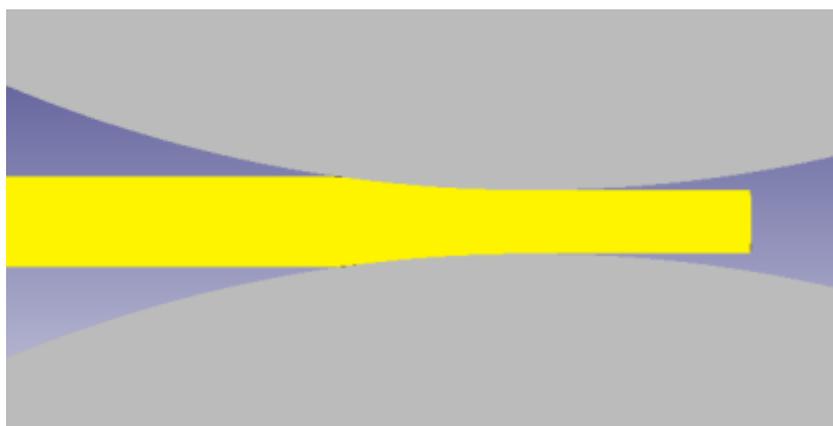


Рисунок 7.65 - Окно команды Разрез

Постройте продольный разрез в плоскости XOZ, проходящей через ось симметрии прокатываемой полосы с помощью нормали N (0.000; 1.000; 0.000) и команды Select (Выбор точки экрана). Точку взять ЛКМ в центральном слое полосы. Далее нажмите ОК.

Внешний вид заготовки до разреза, после и в плане показан на рисунке 7.66. Как видно из рисунка заготовка после выхода из валков получила уширение. С помощью команды Measure (Измерить расстояние между двумя точками) найдите ширину полосы после прокатки 32,8652, а затем и уширение  $\Delta b = 32,8652 - 32,0000 = 2,8652$ мм. В этом же разрезе постройте графики распределения интенсивности напряжений и скорости течения металла заготовки в направлении оси вращения валков Z и проведите их анализ

(рисунок 7.67).



*a)*

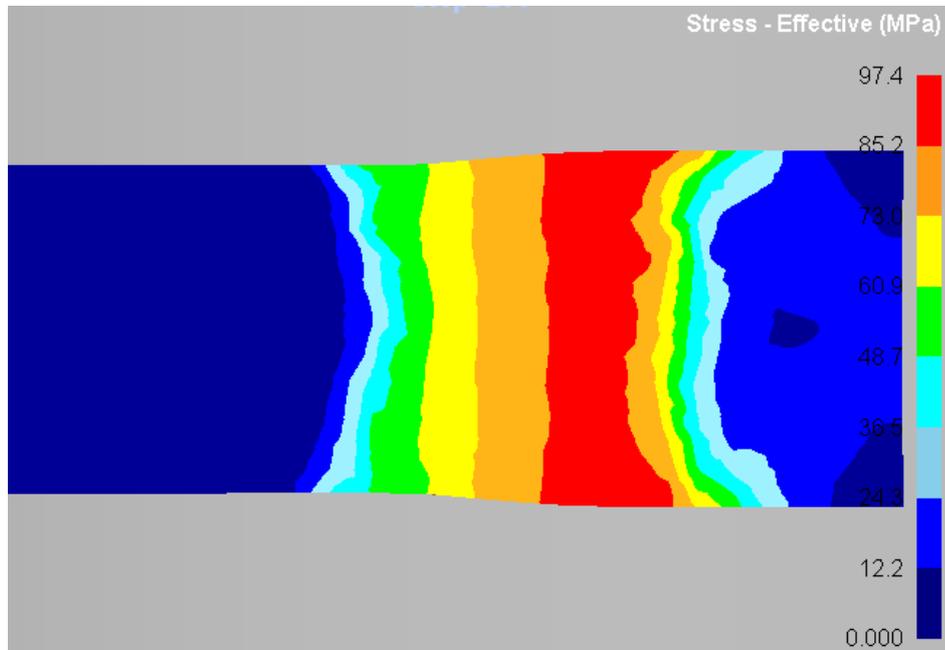


*б)*

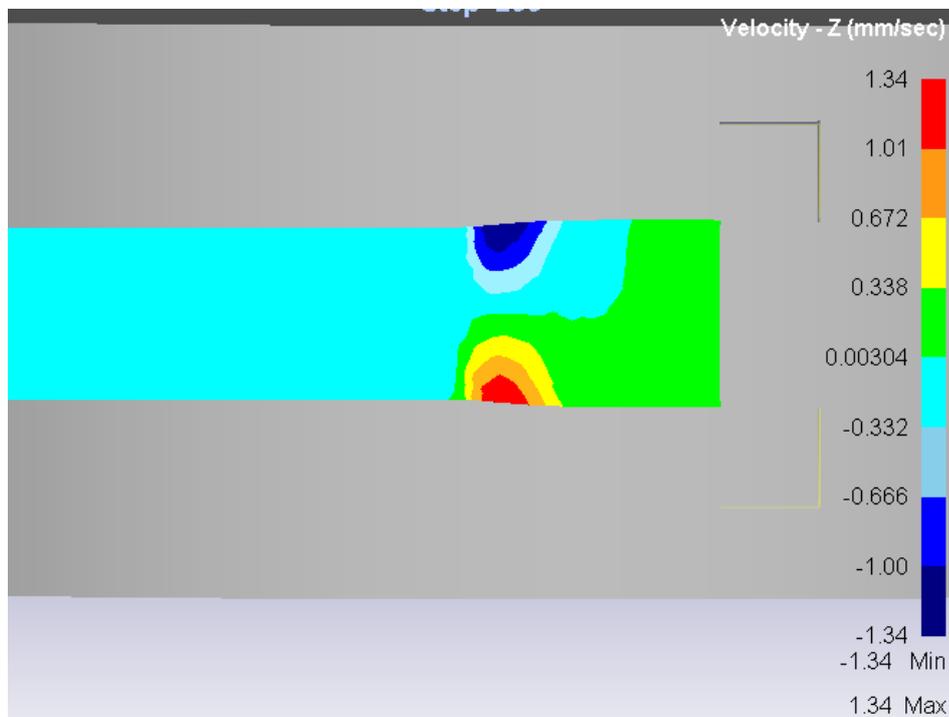


*в)*

Рисунок 7.66 - Вид заготовки до разреза (а), после (б) и в плане (в)



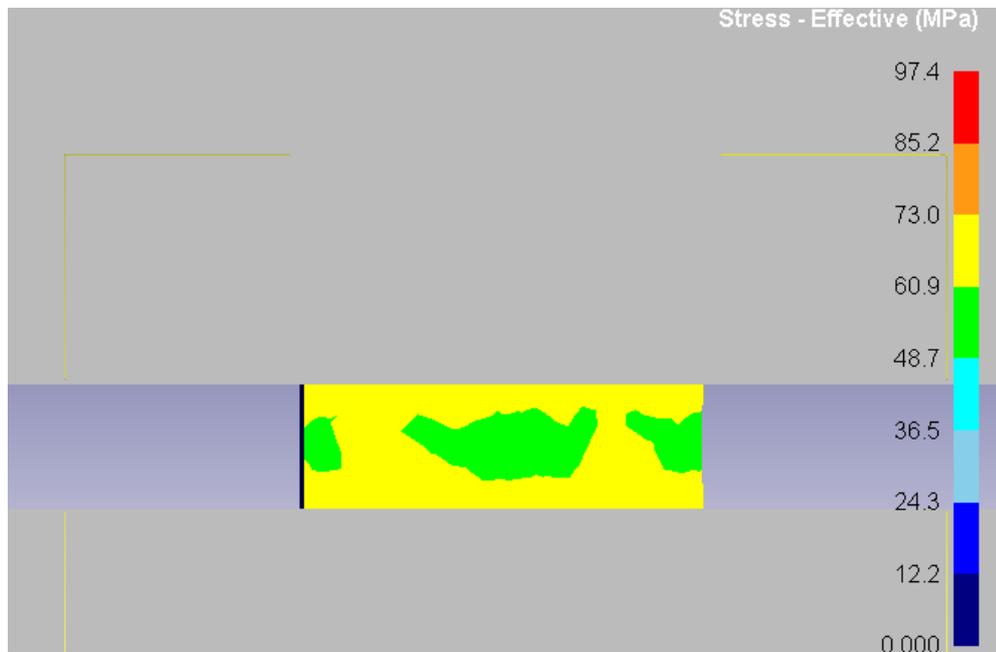
а



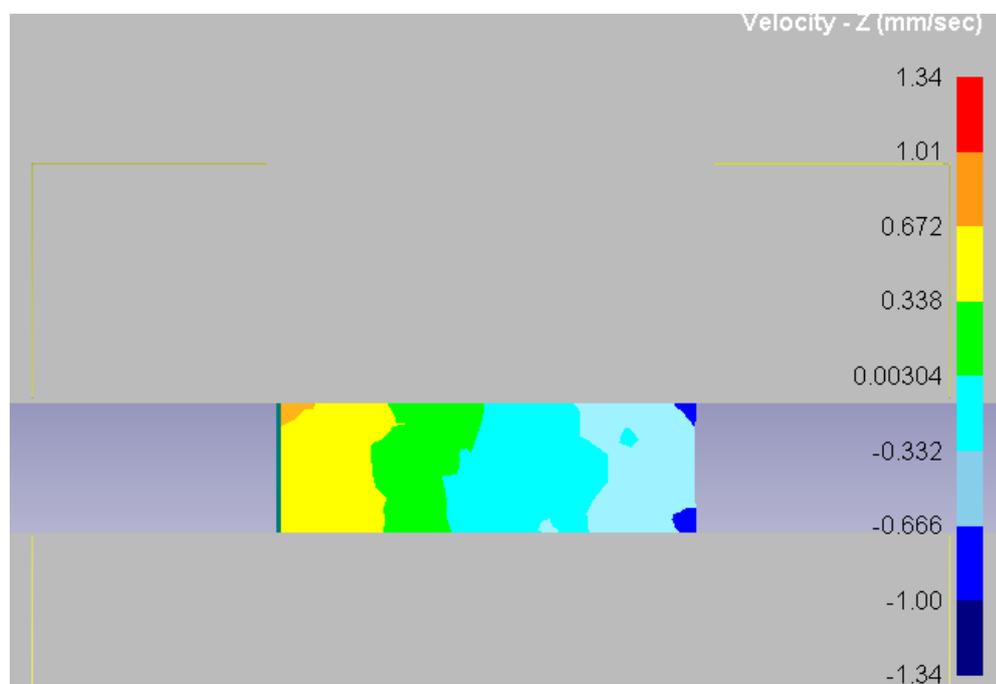
б

Рисунок 7.67 - Распределение интенсивности напряжений (а) и скоростей Z (б) по ширине прокатываемой полосы

По аналогии выполните поперечный разрез полосы на входе в очаг деформации и постройте графики распределения интенсивности напряжений и скоростей Z в направлении уширения (рисунок 7.68).



а



б

Рисунок 7.68 - Распределение интенсивности напряжений (а) и скоростей Z (б) в поперечном сечении, перпендикулярном оси прокатки на входе в очаг деформации

Аналогичным образом решите задачи по прокатке полосы с размерами  $10 \times 20 \times 150$  и  $10 \times 40 \times 150$ , сравните результаты с предыдущей задачей и сделайте **ВЫВОДЫ**.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе MSWord и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Результаты моделирования уширения полосы в установившейся стадии прокатки.
  - компьютерная модель прокатки;
  - поля скоростей в направлении оси Z и графики интенсивности напряжений в различных сечениях очага деформации;
  - график момента прокатки в зависимости от времени процесса.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение уширения при прокатке.
2. Опишите напряженно-деформированное состояние металла при прокатке.
3. В каких случаях при прокатке уширением металла можно пренебречь?
4. Какие показатели характеризуют уширение?
5. Какие факторы оказывают влияние на величину уширения?
6. Какой вид принимают боковые грани при прокатке высоких заготовок?
7. В каком случае уширение больше: при прокатке широких или узких полос?
8. Как влияют на величину уширения степень обжатия, количество проходов?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии дано описание современного программного комплекса Deform и на его основе примеры моделирования традиционных и оригинальных задач проектирования основных технологических процессов обработки металлов давлением.

При ковке и горячей штамповке к таким задачам относятся: определение степеней деформации по объему тела, оптимизация переходов открытой и закрытой штамповки, предотвращение технологических отказов, выявление температурных режимов, нагрузок на инструмент, условия качения металла в облой и связанные с ним возможности уменьшения отходов.

При проектировании процессов прессования рассмотрены следующие задачи: определение скорости деформирования без разрушения, метода прессования, обеспечивающего минимальный отход металла, выбор конструкции матрицы и температурного режима прессования.

При прокатке листовых изделий к оригинальным задачам относятся: условия захвата металла заготовки валками, выбор степени деформации при горячей и холодной прокатке по переходам, усилия и момента прокатки, расчет уширения, факторы и параметры, влияющие на его протекание.

При волочении изделий в холодном состоянии проанализированы такие задачи, как неравномерное упрочнение материала изделия, предельные вытяжки при обычном волочении и волочении с противонатяжением, выбор угла рабочей зоны канала, обеспечивающего минимальное усилие деформирования.

При листовой штамповке особое внимание обращалось на следующие прикладные задачи: получение изделий из листового материала требуемой формы, выбор технологического зазора между матрицей и пуансоном, обеспечивающего качество деталей при врубке и пробивке, распределение толщин по образующей детали.

Приведенные в пособии примеры моделирования могут быть «компасом» при совершенствовании существующих и создании новых

технологических процессов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fluhner, J. DEFORM™ 3D Version 5.0 [Текст]: user's manual/Jeffrey Fluhner. – SFTC, 2003. – 247 с.
2. DEFORM™-3D [Текст]: tutorials. – SFTC, 2003. – 139 с.
3. Бузлаев, Д.В. Применение системы DEFORM для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением [Текст]/Д.В. Бузлаев, В.А. Кропотов, А.А. Сахарчук, А.А. Харламов. – М.: ТЕСИС, 2001. - 13 с.
4. Харламов, А.А. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM [Текст]/А.А. Харламов, А.П. Латаев, В.В. Галкин, П.В. Уланов//САПР и графика. -2005. –№5.- С. 2-4.
5. Харламов, А.А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением [Текст]/А.А. Харламов, А.П. Уваров//САПР и графика. -2003. –№6.- С. 10-15.
6. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением [Текст]/А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст]/Л.Сегерлинд – М.: Мир.1979.
8. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст]/О.Зенкевич, К Морган – М.: Мир, 1986.
9. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением [Текст]/Г.Я. Гун – М.: Металлургия. 1983.
- 10.Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением [Текст]/Ю.И.Рыбин, А.И.Рудской, А.М.Золотов – СПб: Наука.2004-644с.
- 11.Брюханов, А.Н. Ковка и объемная штамповка [Текст]/А.Н. Брюханов – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.
- 12.Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст]/М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.

- 13.Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки [Текст]/Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев – М.: Машиностроение, 1985. – 304 с.
- 14.Зубцов, М.Е. Листовая штамповка [Текст]/М.Е. Зубцов – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
- 15.Семенов, Е.Н. Ковка и штамповка [Текст]: справочник, т. №1/Е.Н. Семенов – М.: Машиностроение, 1985. – 568 с.
- 16.Семенов, Е.Н. Ковка и штамповка [Текст]: справочник, т. №4/Е.Н. Семенов – М.: Машиностроение, 1987 – 544 с.
- 17.Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки [Текст]/Е.А. Попов, В.Г. Ковалёв, И.Н. Шубин – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 480 с.
- 18.Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст]/В.П. Романовский – Л.: Машиностроения, 1979. – 520 с.
- 19.Харламов, А.А. DEFORM-2D: лабораторные работы [Текст]/А.А. Харламов – М.: Артех, 2000. – 93 с.
- 20.Бережной В.Л., Щерба В.Н., Батурич А.И. Прессование с активным действием сил трения. – М.: Металлургия, 1988. -296 с.
- 21.Грабарник Л.М., Нагайцев А.А. Прессование цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 240 с.
- 22.Горячее прессование труб и профилей / Ю.В. Манегин, А.Э. Притоманов, Шмиттель Т. и др. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.
- 23.Гильдергорн М.С., Керров В.Г., Кривонос Г.А. Прессование со сваркой полых изделий из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1975. 239 с.
- 24.Гильдегорн М.С. Основы теории совместного прессования разнопрочных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 144 с.
- 25.Гун Г.Я., Яковлев В.И., Прудковский Б.А. и др. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1974.
- 26.Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков М.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. - 263

- 27.Ерманок М.З. Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 247 с.
- 28.Ерманок М.З. Прессование панелей из алюминиевых сплавов. МС.:Металлургия, 1974. – 231 с.
- 29.Ерманок М.З., Соболев Ю.П., Гельман А.А. Прессование титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.
- 30.Ерманок М.З. Фейгин В. И. Производство профилей из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
- 31.Ерманок М.З. Прессование труб и профилей специальной формы. – М.: металлургия, 1992. – 305 с.
- 32.Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. – М.: Металлургия, 1971. 456 с.
- 33.Жолобов В.В., Зверев Г.И. Инструмент для горячего прессования металлов. – М.: Машиностроение, 1965. - 163 с.
- 34.Жолобов В.В., Зверев Г.И. Оборудование гидропрессовых цехов. – М.: Металлургия, 1974. – 271 с.
- 35.Инструмент для горячего прессования тяжёлых металлов и сплавов / Ю.Ф. Шевакин и др. – М.: Металлургия, 1983. - 217 с.
- 36.Каталог. Прессованные профили. М.: Оборонгиз 1975. - 356 с.
- 37.Каргин В.Р. Процессы получения винтовых профилей и труб. – М.: металлургия, 1994. – 96 с.
- 38.Колпашников А.И., Вялов В.А, Гидропрессование металлов. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
- 39.Корнилов В.Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов. – Красноярск, 1993. – 216 с.
- 40.Кузьменко В.А. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 108 с.
- 41.Матвеев Б.И., Журавский Е.Б. Расчёт и конструирование одноочковых матриц для прессования профилей из деформируемых сплавов.- М.: Оборонгиз, 1951.

- 42.Прозоров Л.В., Костава А.А., Ревтов В.Д. Прессование металлов жидкостью высокого давления. – М.: металлургия, 1972. 152 с.
- 43.Прозоров Л.В. Прессование стали и тугоплавких металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.
- 44.Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
- 45..Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 350 с.
- 46.Прессование алюминиевых сплавов / Г.Я. Гун, В.Н. Яковлев, Б.А., Прудковский и др. – М.: Металлургия, 1974. - 336 с.
- 47.Профили, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. ГОСТ 8617-81. М.: Изд-во стандартов, 1984. – 25с.
- 48.Профили прессованные из алюминиевых и магниевых сплавов. Кн. 1. Справочник-каталог /Б.И. Бондарев, Г.В. Лытнева, Ф.В. Николаев и др. - М.: Металлургия, 1989. – 560 с.
- 49.Райтбарг Л.Х. Прессование лёгких сплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 160 с.
- 50.Райтбарг Л.Х. Производство прессованных профилей. – М.: Металлургия 1984. - 264 с.
- 51.Старостин Ю.С., Головинов М.Ф., Каргин В.Р. Ребристые трубы из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 134 с.
- 52.Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / А.В. Зиновьев, А.И. Колпашников, П.И. Полухин и др. – М.: Металлургия. 1992. – 512 с.
- 53.Шевакин Ю.Ф., Грибарник Л.М., Нагайцев А.А. Прессование тяжёлых цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1987. – 246 с.
- 54.Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 768 с.
- 55.Шур И.А. Технологическое оборудование для прессования металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.

- 56.Эверхарт Г. Холодное прессование металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 174 с.
- 57.Перлин, И. Л. Теория волочения[Текст]/И. Л. Перлин, М. З. Ерманок – М.: Metallurgy, 1971. -448 с.
- 58.Шефтель, Г. Л. Производство стальных калиброванных прутков[Текст]/Н. И Шефтель – М.: Metallurgy, 1970. – 432 с.
- 59.Колмогоров, Г. Л. Инструмент для волочения[Текст]/Г. Л. Колмогоров, С. И. Орлов, В. Ю. Шевляков – М.: Metallurgy, 1992. – 356 с.
- 60.Каргин, В. Р. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM – 2D[Текст]/В. Р. Каргин, А. П. Быков, Б. В. Каргин, Я. А. Ерисов – Самара: Изд-во МИР, 2011. – 170 с.
- 61.Барановский, М.А. Лабораторный практикум по теории пластической деформации, технологииковки, горячей и холодной штамповки. [Текст]: учебное пособие/М.А. Барановский, Добровольский И.Г. – М.: Высшая школа, 1987. – 232с.
- 62.Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства [Текст]: учебное пособие/Я.М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1989. – 500с.
- 63.Семенов, Е.И. Горячая объемная штамповка [Текст]: учебное пособие/ Е.И Семенов. – М.: Машиностроение, 1986. – 592с.
- 64.Ковка и штамповка: Справочник/под ред. Е.И. Семенова, т.2 – М.: Машиностроение. 1986.
- 65.Целиков, А.И. Теория продольной прокатки [Текст]/А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян – М.: Metallurgy, 1980. – 320 с.
- 66.Паршин, В.С. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов [Текст]/В.С. Паршин, В.П. Костров, Б.С. Сомов – М.: Metallurgy, 1988. – 400 с.
- 67.Грудев, А.П. Технология прокатного производства [Текст]/А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. –М.: Metallurgy, 1994. – 656 с.

- 68.Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (резервы интенсификации) [Текст]/Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
- 69.Смирнов, В.С. Теория прокатки [Текст]/В.С. Смирнов – М.: Metallurgy, 1967. – 460с.
- 70.Грудев, А.П.Теория прокатки [Текст]/А.П. Грудев – М.: Интернет Инжиниринг, 2001 – 280с.
- 71.Смирнов, В.К. Калибровка прокатных валков [Текст]/В.К. Смирнов, В.И. Шилов, Ю.В. Игнатович – М.: Metallurgy, 1987. – 368с.
- 72.Тарковский, И.Я. Продольная прокатка профилей переменного сечения [Текст]/И.Я. Тарковский, В.К. Смирнов, С.Л. Коцарь – Свердловск: Metallurgizdat. Свердл.отд-ние, 1962 – 366с.
- 73.Илюкович, Б.М. Прокатка и калибровка фасонных профилей [Текст]/Б.М. Илюкович – М.: Metallurgy, 1989 – 309с.
- 74.Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства. Учеб. пособие [Текст] А.И. Рудской, В.А. Лунев – СПб: Наука, 2008-527с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Кнопки Панели управления препроцессора

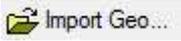
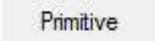
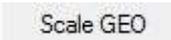
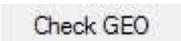
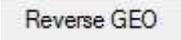
Кнопка	Название	Описание
1	2	3
Кнопки описания процесса		
	<i>Simulation controls</i> (настройки задачи)	Кнопка, обеспечивающая доступ к меню, в котором осуществляется задание параметров моделирования и определение критериев его остановки
	Материал	Кнопка, обеспечивающая доступ к меню, в котором определяются свойства материалов
	<i>Object positioning</i> (позиционирование объектов)	Кнопка, обеспечивающая доступ к меню, в котором осуществляется управление расположением объектов относительно начала координат и друг друга
	<i>Inter-object</i> (взаимодействие объектов)	Кнопка, обеспечивающая доступ к меню, в котором определяются отношения между объектами (контактные поверхности и их характеристики)
	<i>Data base generation</i> (генерация базы)	Кнопка, обеспечивающая доступ к меню, в котором

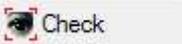
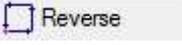
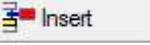
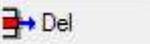
	данных)	создается и проверяется база данных, требующаяся для решения
	Выход	Выход из препроцессора и возврат в главное окно
Кнопки управления изображением на экране		
	Переместить	Позволяет динамически перемещать объекты в окне <b>Display</b> , с помощью перемещения мыши при удерживании ЛКМ
	Приблизить/удалить	Позволяет динамически масштабировать окно <b>Display</b> , при удержании ЛКМ и перемещении мыши вверх или вниз
	Увеличить	Часть окна <b>Display</b> может быть увеличена. Для этого необходимо щелкнуть ЛКМ и, не отпуская ее, растянуть рамку на всю увеличиваемую область
	Шейдирование	Полутоновое изображение объектов без сетки.
	<i>Wireframe</i> (сетка)	Изображаются только контуры объектов и сетка
	<i>Shading and wireframe</i> (шейдирование и сетка)	Полутоновое изображение объектов с наложением сетки

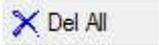
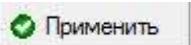
	<i>Surface patch</i> (только грани)	Показываются только линии объектов
	Перерисовать	Перерисовать окно <b>Display</b> и очистить экран от предыдущих линий измерения
	<i>View Fit</i> (вписать)	Вписать все объекты в окно <b>Display</b>
1	2	3
	<i>View Back</i> (предыдущий вид)	Возврат к предыдущему виду
	<i>Capture Image</i> (захват экрана)	Захватить содержимое окна <b>Display</b> и сохранить его в файл
	Печать	Захватить содержимое окна <b>Display</b> и послать его на принтер
	Измерить	Позволяет осуществлять замер расстояния между любыми двумя точками. Линия измерения останется на экране до тех пор, пока не будет нажата кнопка <b>Перерисовать</b>
	Выбрать	Это основной режим работы, он используется для выбора и получения информации о гранях элемента и узлах. Этот режим, используемый при измерении

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Кнопки пункта Геометрия Панели инструментов

Кнопка	Название	Описание
1	2	3
<b>Закладка Инструменты</b>		
	<i>Import Geo</i> (загрузить)	Позволяет загрузить геометрию из файла с расширениями «igs», «geo», «dxf»
	<i>Primitive</i> (примитивы)	Создает геометрию с помощью геометрических примитивов
	<i>Scale GEO</i> (масштабировать)	Позволяет изменить размеры геометрии с заданным масштабом
	<i>Check GEO</i> (проверить)	Вызов окна <b>Check &amp; Correct Geometry</b> позволяющего исправлять геометрию объектов в автоматическом режиме
	<i>Reverse GEO</i> развернуть)	Разворачивает направление обхода (направление построения геометрии тела). Используется для определения внутренней (сплошной) области тела, которая в окне <b>Display</b> показана серой полосой
<b>Закладка Edit</b>		

	<i>Add another boundary</i> (добавить границу)	Добавление геометрических границ моделируемого объекта
	<i>Current boundary</i> (текущая граница)	Переключение между геометрическими границами моделируемого объекта
	<i>Delete the current boundary</i> (удалить границу)	Удаление текущей границы геометрической модели
-	<i>XYR</i>	Построение геометрии в формате точек
1	2	3
-	<i>Line-Arc</i>	Построение геометрии в формате дуг, отрезков
	<i>Check</i> (проверить)	Вызов окна <b>Check &amp; Correct Geometry</b> позволяющего исправлять геометрию объектов в автоматическом режиме
	<i>Reverse</i> (развернуть)	Разворачивает направление обхода (направление построения геометрии тела). Используется для определения внутренней (сплошной) области тела, которая в окне <b>Display</b> показана серой полосой
	<i>Insert</i> (вставить)	Позволяет вставить (удалить) строку в <b>Поле</b>
	<i>Del</i> (удалить)	

		<b>ввода геометрии</b>
	<i>Del All</i> (удалить всё)	Удаляет всю геометрию объекта
	Применить	Позволяет применить все изменения произведенные над геометрией

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Команды окна Позиционирование объектов

Название	Описание
<i>Drag</i> (перемещение мышкой)	Размещение объекта осуществляется с помощью мышки
Смещение	Объекты перемещаются на заданное расстояние определением вектора перемещения или с помощью указания начального и конечного значений перемещаемой точки объекта
Интерференция	Перемещение объектов до создания наложения их друг на друга. Данная команда используется для быстрого определения контактных поверхностей
Вращение	Позволяет поворачивать объекты относительно заданной точки на любой угол
Перевернуть	Позволяет зеркально отразить объекты относительно осей $X$ , $Y$ или какой либо заданной оси

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Кнопки Панели управления постпроцессора

Кнопка	Название	Описание
Команды управления анимацией		
	<i>Play backward (forward)</i>	Воспроизведение анимации назад (вперёд)
	<i>One step back (forward)</i>	Пошаговое воспроизведение анимации назад (вперёд)
	<i>First (last) step</i>	Перемещение в начало и конец последовательности обработанных шагов
	<i>Stop playing</i>	Остановка воспроизведения анимации на текущем шаге
	Настройки шагов	Настройка последовательности вывода шагов расчета
Команды визуализации результатов расчета		
	Зеркальная симметрия	Позволяет отобразить обе части симметричного объекта
	Параметры	Строит графическое распределение переменных (напряжение, деформация, температура и т.п.) в деформируемой заготовке на текущем шаге
	<i>Flow Net</i> (динамическая сетка)	Позволяет наложить координатную сетку на заготовку и проследить за изменениями сетки в

		процессе деформации
	Отслеживание точек	Отслеживает изменение заданного параметра (напряжения, степени деформации, температуры и т.п.) в выбранных точках в процессе деформации
	График (Усилия-Перемещения)	Строит график усилия, скорости, крутящего момента в зависимости от времени или перемещения главного инструмента
	Узлы/элементы/кромки объекта	Отображает информацию (граничные условия, параметры и т.п.) о выбранном узле/элементе/кромке текущего объекта
	Параметры между двумя точками	Строит распределение выбранного параметра (напряжения, степени деформации, температуры и т.п.) между двумя заданными точками
	Animation set up (настройки анимации)	Записывает изображения указанных шагов в
	Управление анимацией	графический файл. Полученную последовательность изображений можно

		просмотреть с помощью специального проигрывателя без использования программы <i>DEFORM-2D</i>
--	--	--

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Команды окна Параметры постпроцессора

Название	Описание
1	2
Переменные	
<i>Displacement</i>	Перемещение
<i>Velocity</i>	Скорость
<i>Strain</i>	Степень деформации
1	2
<i>Strain rate</i>	Скорость деформации
<i>Stress</i>	Напряжение
<i>Normal Pressure</i>	Нормальное давление
<i>Density</i>	Плотность
<i>Temperature</i>	Температура
<i>Damage</i>	Критерий разрушения
Параметры переменных	
<i>Effective (von Mises)</i>	Интенсивность
<i>Total</i>	Суммарное значение
<i>Mean</i>	Среднее значение
<i>Max (min) Principal</i>	Максимальное (минимальное) главное
<i>R/Z/Theta/RZ</i>	Действующее в направлении <i>R/Z/Theta/RZ</i> в полярной системе координат

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Образец оформления титульного листа отчета

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)»

Инженерно-технологический факультет  
Кафедра обработки металлов давлением

ОТЧЕТ

по лабораторной работе на тему

---

(наименование темы)

Студент \_\_\_\_\_

(фамилия, инициалы)

Преподаватель \_\_\_\_\_

(фамилия, инициалы)

Самара 2013

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

### Команды главного окна

№	Команда	Название	Для чего используется
1			Для создания новой задачи
2			Для открытия окна позволяющего изменить текущую директорию проекта
3			Для возвращения в директорию ранее установленную как «домашняя»
4			Для перемещения на директорию «выше» текущей.
5			Для обновления информации отображаемой в главном окне
6			Для изменения частоты автоматического обновления осуществляемого при расчете задачи
7			Для поиска файлов
8			Для запуска расчета текущей задачи
9			Для «аварийного» завершения расчета задачи
10			Для добавления задачи в очередь задач
11			Для вызова окна очереди задач, которые будут рассчитываться на данном компьютере
12			Для задания настроек решения задачи

13			Для вызова окна рассчитываемых в текущий момент задач (в том числе и на других компьютерах)
14			Вызов подсказки указанием
15			Выхода из программы
16	Надпись <b>Running</b>		Идет расчет выделенной задачи
17	меню <b>File</b>		Создать новую задачу, навигация директориях, выход
18	Меню <b>Simulation</b>		Позволяет задавать очередность решения задач, контролировать их текущее выполнения, осуществлять остановку и запуск задач
19	Меню <b>Tool</b>		Вызывать окно менеджера базы данных, которое позволяет редактировать текущую базу данных и удалить вспомогательные файлы создаваемые в ходе расчета
20	меню <b>Option</b>		Вызвать окно позволяющее выбрать систему единиц измерения языковые настройки и пр. Сохранять текущие настройки интерфейса
21	Меню <b>Pre Processor</b>		Запуск препроцессора программы и специальных приложений для задания исходных данных
22	Меню <b>Post Processor</b>		Запуск постпроцессора программы и специальных приложений для просмотра

			результатов расчета
23	Символ 		Файл является - Key файлом
24	Символ 		Файл является – файлом базы данных
25	Надпись *** Simulation Aborted by User ***		Расчет выполнен и завершен в соответствии с заданными пользователем настройками
26	Закладка  Preview ?		Для предварительного просмотра изображения задачи сохраненного перед выходом из пре или постпроцессора
27	Закладка  Message ?		Для просмотра сообщений сформированных автоматически в результате выполнения расчета
28	надпись ***** ERROR ***** Inconsistent Step No! Please Go Through Preprocessor to Prepare Data!		Ошибка! Неверно задан шаг расчета!
29	Надпись  Aborting... ?		По команде пользователя идет завершение расчета решателем
30	Надпись STEP NUMBER = 26		Осуществляется расчет 26 шага

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Тест для проверки знаний "Команды знаний"

№	Команда	Варианты ответов		
1	Что позволяет команда  ?	Сдвинуть изображение	Увеличить изображение	Сдвинуть окно
2	Что позволяет команда  ?	Уменьшить или увеличить	Увеличить	Уменьшить
3	Что позволяет команда  ?	Указать рамкой область для увеличения изображения	Указать рамкой область для удаления	Сдвинуть изображение
4	Что позволяет команда  ?	Показать полутоновое изображение объектов	Показать текущее тело	Создать базу данных
5	Что позволяет команда  ?	Показать изображение сетки конечных элементов	Задание свойств материала	Добавить объект
6	Что позволяет команда  ?	Показать сетку и полутоновое изображение объектов	Показать только полутоновое изображение	Перейти к базе данных
7	Что позволяет команда  ?	Показать только границы объектов	Показать контактные поверхности	Оставить только объекты с конечно-элементной сеткой
8	Что позволяет команда  ?	Показать границы и	Показать контактные	Оставить только объекты с

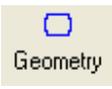
		поверхность	поверхности	конечно-элементной сеткой
9	Что позволяет команда  ?	Обновить изображение	Удалить часть детали	Закрасить объект
10	Что позволяет команда  ?	Врисовать изображение показанных деталей	Увеличить изображение	Сдвинуть изображение
11	Что позволяет команда  ?	Вернуться к предыдущему изображению на экране	Вращать изображение	Задать точку вращения вида
12	Что позволяет команда  ?	Сохранить изображение в файл	Сохранить текущие настройки изображения	Скопировать изображение в буфер обмена
13	Что позволяет команда  ?	Вывести на печать принтер изображение	Сохранить изображение в файл	Распечатать в файл
14	Что позволяет команда  ?	Скопировать изображение в буфер обмена	Сохранить изображение в файл	Сохранить и выслать изображение по электронной почте
15	Что позволяет команда  ?	Импортировать данные из базы данных	Импортировать данные из KEY файла	Создать базу данных
16	Что позволяет команда  ?	Импортировать данные из KEY	Импортировать данные из файла	Создать KEY файл

		файла	DB	
17	<p>Что позволяют команды</p>  <p>?</p>	<p>Приведение изображения к стандартным видам</p>	<p>Вращения изображения вокруг заданной точки</p>	<p>Изменения ориентации направления движения главного инструмента</p>
18	<p>Что позволяет команда  ?</p>	<p>Измерить расстояние в любом направлении между любыми частями объектов</p>	<p>Измерить расстояние между объектами</p>	<p>Измерить высоту длину или ширину объекта.</p>
19	<p>Что позволяет команда  ?</p>	<p>Выбрать режим указания объектов</p>	<p>Указать траекторию передвижения объектов</p>	<p>Сдвинуть изображение</p>
20	<p>Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?</p>	<p>Вызвать подсказку указанием</p>	<p>Вызвать справку</p>	<p>Отметить объект</p>
21	<p>Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?</p>	<p>Осуществить выход из пре или постпроцессора</p>	<p>Сохранить и выйти из пре и постпроцессора</p>	<p>Открыть пре или пост процессор</p>
22	<p>Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?</p>	<p>Вызвать окно «настройки задачи»</p>	<p>Подключить джойстики</p>	<p>Вызвать окно с настройками изображения</p>

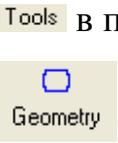
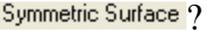
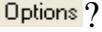
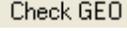
23	Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?	Вызвать окно «редактирование свойств материала»	Вызвать окно позволяющее построить сетку конечных элементов	Вызвать окно позволяющего задать размеры заготовки
24	Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?	Осуществить вызов окна позволяющего определить положение объектов относительно друг друга	Осуществить перемещение изображения объектов на экране	Осуществить масштабирование (увеличение) геометрии объектов
25	Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?	Осуществить вызов окна «взаимодействие объектов»	Осуществить смещение изображения объектов	Осуществить изменение геометрии объекта
26	Какое действие позволяет выполнить кнопка  ?	Вызов окна Генерация базы данных	Вызов окна позволяющего определить положение объектов относительно друг друга	Сохранить и выйти из пре и постпроцессора
27	Что обозначает значок  ?	Тип объекта - жесткий	Тип объекта - пластичный	На объекте построена сетка конечных элементов
28	Что обозначает значок  ?	Тип объекта - пластичный	Тип объекта - жесткий	Объект является главным

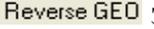
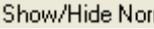
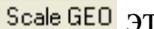
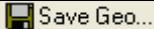
				инструментом
29	Что обозначает значок  ?	Тип объекта - упругий	Тип объекта - жесткий	Тип объекта - пористый
30	Что обозначает значок  ?	Тип объекта – упруго-пластичный	Тип объекта - жесткий	Тип объекта - пористый
31	Что обозначает значок  ?	Тип объекта - пористый	Добавить объект в дерево процесса	Показать на экране только текущий объект
32	Что обозначает значок  ?	На объекте построена сетка конечных элементов	Объект скрыт	На заготовке отображается сетка конечных элементов
33	Что означает надпись [PDie]?	Объект является главным инструментом	Объект не участвует в процессе деформирования	Объект упругий
34	Что означает надпись Geo - Poly 12?	Геометрия содержит 12 вершин	В 12 вершинах геометрии есть ошибки построения	Сетка конечных элементов содержит 12 узлов
35	Что означает надпись Mesh - Elem 71663?	Сетка конечных элементов содержит 71663 узлов	Геометрия всех объектов в задаче содержит 71663	Геометрия всех объекта в задаче содержит 71663
36	Что означает надпись Total object(s): 5?	В процессе участвует 5 объектов	5 объектов не участвует в процессе	Геометрия объекта содержит 5 вершин (точек)

37	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Добавить объект в дерева проекта	Удалить из дерева проекта объект	Добавить граничное условие
38	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Удалить из дерева проекта объект	Добавить объект в дерева проекта	Удалить граничное условие
40	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Показать (скрыть) объект	Добавить объект	Показать (скрыть) сетку
41	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Показать (скрыть) сетку	Показать (скрыть) объект	Удалить из дерева проекта объект
42	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Показать (скрыть) геометрию объекта	Показать (скрыть) объект	Показать (скрыть) объект
43	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Показать (скрыть) контактные узлы	Показать (скрыть) геометрию объекта	Показать (скрыть) объект
44	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Показать на экране только текущий объект	Показать на экране все объекты	Сделать прозрачным текущий объект
45	Что позволяет выполнить	Показать на экране все	Сделать прозрачным	Показать на экране только

	нажатие на кнопку  ?	объекты	текущий объект	текущий объект
46	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  ?	Сделать прозрачным текущий объект	Показать на экране все объекты	Показать на экране только текущий объект
47	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  General ?	Переход к закладке панели инструментов для задания основных свойств объекта	Переход к закладке панели инструментов для построения сетки конечных элементов	Переход к закладке панели инструментов для задания основных свойств объекта
48	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  Geometry ?	Переход к закладке панели инструментов для работы с геометрией объекта	Переход к закладке панели инструментов для задания основных свойств объекта	Переход к закладке панели инструментов для построения сетки конечных элементов
49	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  Mesh ?	Переход к закладке панели инструментов для построения сетки конечных элементов	Переход к закладке панели инструментов для работы с геометрией объекта	Переход к закладке панели инструментов для задания граничных условий для объекта
50	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  Bdry. Cnd. ?	Переход к закладке панели инструментов для задания граничных	Переход к закладке панели инструментов для построения сетки конечных	Переход к закладке панели инструментов для задания основных

		условий для объекта	элементов	свойств объекта
51	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  Movement ?	Переход к закладке панели инструментов для задания параметров перемещения (силовых условий) объекта	Переход к закладке панели инструментов для задания основных свойств объекта	Переход к закладке панели инструментов для работы с геометрией объекта
52	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  Properties ?	Переход к закладке панели инструментов для задания специальных свойств в целом для объекта	Переход к закладке панели инструментов для задания основных свойств объекта	Переход к закладке панели инструментов для построения сетки конечных элементов
53	Что позволяет выполнить нажатие на кнопку  Advanced ?	Переход к закладке панели инструментов для задания свойств отдельных узлов и элементов объекта	Переход к закладке панели инструментов для построения сетки конечных элементов	Переход к закладке панели инструментов для задания основных свойств объекта
54	К какому меню будет осуществлен	Меню в закладке панели геометрия	Меню в закладке панели геометрия	Меню в закладке панели геометрия

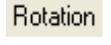
	переход при нажатии на изображении  ?	позволяющее выполнять команды экспорта и проверки геометрии	позволяющее выполнять команды задания условий симметрии	позволяющее выполнять команды задания условий симметрии
55	К какому меню будет осуществлен переход при нажатии на изображении  ?	Меню в закладке панели геометрия позволяющее выполнять команды задания условий симметрии	Меню в закладке панели геометрия позволяющее выполнять команды экспорта и проверки геометрии	Меню в закладке панели геометрия позволяющее выполнять команды задания условий симметрии
56	К какому меню будет осуществлен переход при нажатии на изображении  ?	Меню в закладке панели геометрия позволяющее выполнять команды задания условий симметрии	Меню в закладке панели геометрия позволяющее выполнять команды задания условий симметрии	Меню в закладке панели геометрия позволяющее выполнять команды экспорта и проверки геометрии
57	 это ...	Команда позволяющая вставить геометрию объекта	Команда позволяющая сохранить геометрию объекта	Команда позволяющая удалить геометрию у объекта
58	 это ...	Команда	Команда	Команда

		позволяющая выполнить проверку геометрии	позволяющая удалить геометрию у объекта	позволяющая изменить направление обхода у геометрии объекта
59	 Reverse GEO это ...	Команда позволяющая изменить направление обхода у геометрии объекта	Команда позволяющая удалить геометрию у объекта	Команда позволяющая выполнить проверку геометрии
60	 Show/Hide Normal это ...	Команда позволяющая показать (скрыть нормаль к поверхности)	Команда позволяющая изменить направление обхода у геометрии объекта	Команда позволяющая масштабировать размеры геометрии объекта
61	 Scale GEO это ...	Команда позволяющая масштабировать размеры геометрии объекта	Команда позволяющая изменить направление обхода у геометрии объекта	Команда позволяющая выполнить проверку геометрии
62	 Save Geo... это ...	Команда позволяющая сохранить	Команда позволяющая масштабировать	Команда позволяющая удалить

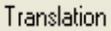
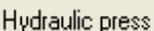
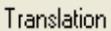
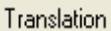
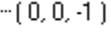
		геометрию объекта	размеры геометрии объекта	геометрию у объекта
63	 Delete Geo это ...	Команда позволяющая удалить геометрию у объекта	Команда позволяющая сохранить геометрию объекта	Команда позволяющая масштабировать размеры геометрии объекта
64	 Geo Primitive ... это ...	Команда позволяющая вызвать окно для задания геометрических примитивов	Команда позволяющая удалить геометрию у объекта	Команда позволяющая масштабировать размеры геометрии объекта
65	К какому меню будет осуществлен переход при нажатии на изображении  Tools в панели  Mesh	Меню в закладке панели построения сетки позволяющее выполнять команды построения сетки «по умолчанию»	Меню в закладке панели построения сетки позволяющее выполнять построение сетки с учетом особенностей задаваемых пользователем	Меню в закладке панели построения сетки позволяющее задавать критерии автоматическог о перестроения сетки
66	К какому меню будет осуществлен переход при	Меню в закладке панели построения сетки	Меню в закладке панели построения сетки	Меню в закладке панели построения сетки

	<p>нажатии на изображении</p> <p>Detailed Settings</p>	<p>позволяющее выполнять построение сетки с учетом особенностей задаваемых пользователем</p>	<p>позволяющее выполнять команды построения сетки «по умолчанию»</p>	<p>позволяющее задавать критерии автоматического о перестроения сетки</p>
67	<p>К какому меню будет осуществлен переход при нажатии на изображении</p> <p>Remesh Criteria</p>	<p>Меню в закладке панели построения сетки позволяющее задавать критерии автоматического о перестроения сетки</p>	<p>Меню в закладке панели построения сетки позволяющее выполнять построение сетки с учетом особенностей задаваемых пользователем</p>	<p>Меню в закладке панели построения сетки позволяющее выполнять команды построения сетки «по умолчанию»</p>
68	<p>Что означает число расположенное справа от надписи</p> <p>Number of: Nodes</p>	<p>Число узлов в построенной сетке</p>	<p>Примерное число элементов, которое Вы задаете для построения сетки конечных элементов</p>	<p>Число элементов в построенной сетке</p>
69	<p>Что означает число расположенное справа от</p>	<p>Число элементов в построенной сетке</p>	<p>Число узлов в построенной сетке</p>	<p>Примерное число элементов, которое Вы</p>

	надписи <b>Elements</b>			задаете для построения сетки конечных элементов
70	Что означает число расположенное справа от надписи <b>Number of Elements</b>	Примерное число элементов, которое Вы задаете для построения сетки конечных элементов	Число элементов в построенной сетке	Число узлов в построенной сетке
71	Зачем используется кнопка <b>Generate Mesh ?</b>	Для построения сетки конечных элементов	Для построения геометрии объекта	Для задания граничных условий
72	Зачем используется кнопка <b>Check Mesh</b>	Для проверки построенной или импортированной сетки	Для построения сетки конечных элементов	Для задания граничных условий
73	 <b>Import Mesh...</b>	Для загрузки сетки построенной в другой программе	Для проверки построенной или импортированной сетки	Для построения сетки конечных элементов
74	Какой из типов построения сетки <b>System Setup</b> или <b>User Defined</b>	<b>System Setup</b>	<b>User Defined</b>	Данные команды не имеют отношение к

	автоматизирован с учетом влияния температурных, деформационных и пр. особенностей процесса?			особенностям построения сетки
75	В чем особенности задания движения в меню  закладки инструментов 	Оба описанных ниже пункта	Меню позволяет задавать перемещение с постоянной скоростью или приложить к объекту определенную силу	Меню позволяет использовать библиотеку с оборудованием.
76	В чем особенности задания движения в меню  закладки инструментов 	Меню позволяет задавать только вращение объекта путем указания момента или скорости вращения	Меню позволяет задавать только момент	Меню позволяет задавать только скорость вращения объекта
77	Что означает флажок напротив	Задание перемещения объекта будет	Задание перемещения объекта будет	Задание условий перемещения

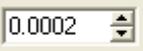
	<p>надписи <b>Speed</b></p> <p>движения в меню <b>Translation</b></p> <p>закладки инструментов</p> <p> <b>Movement ?</b></p>	<p>осуществляться за счет указания скорости движения объекта</p>	<p>осуществляться за счет приложения заданной величины силы</p>	<p>объекта будет определяться данными характеризующими специфику молота</p>
78	<p>Что означает флажок напротив надписи <b>Force</b></p> <p>движения в меню <b>Translation</b></p> <p>закладки инструментов</p> <p> <b>Movement ?</b></p>	<p>Задание перемещения объекта будет осуществляться за счет приложения заданной величины силы</p>	<p>Задание перемещения объекта будет осуществляться за счет указания скорости движения объекта</p>	<p>Объект не будет двигаться</p>
79	<p>Что означает флажок напротив надписи <b>Hammer</b></p> <p>движения в меню <b>Translation</b></p> <p>закладки инструментов</p> <p> <b>Movement ?</b></p>	<p>Задание условий перемещения объекта будет определяться данными характеризующими специфику работы молота</p>	<p>Задание перемещения объекта будет осуществляться за счет приложения заданной величины силы</p>	<p>Задание перемещения объекта будет осуществляться за счет указания скорости движения объекта</p>
80	<p>Что означает флажок напротив надписи</p>	<p>Задание условий перемещения объекта будет</p>	<p>Задание перемещения объекта будет осуществляться</p>	<p>Задание условий перемещения объекта будет</p>

	 движения в меню  закладки инструментов  Movement ?	определяться данными характеризующ ими специфику работы кривошипного пресса	за счет приложения заданной величины силы	определяться данными характеризующ ими специфику молота
81	Что означает флажок напротив надписи  движения в меню  закладки инструментов  Movement ?	Задание условий перемещения объекта будет определяться данными характеризующ ими специфику работы гидравлическог о пресса	Задание условий перемещения объекта будет определяться данными характеризующ ими специфику работы кривошипного пресса	Задание условий перемещения объекта будет определяться данными характеризующ ими специфику молота
82	Что означает надпись  движения в меню  закладки инструментов  Movement ?	Область меню, в которой задается направление перемещения объекта	Область меню, в которой задаются данные по оборудованию	Область меню, в которой задаются скоростные и деформационны е характеристики процесса
83	Что означает надпись  Symmetry plane  ( 0, 0, -1 )	По координатам (0,0,-1) т.е. перпендикулярн о оси z задана	По координатам (0,0,-1) т.е. перпендикулярн о оси z задана	По координатам (0,0,-1) т.е. перпендикулярн о оси z задана

		плоскость симметрии объекта	ось симметрии объекта	ось вращения объекта
84	<p>Что означает надпись</p> 	<p>Между объектами 2 (Top Die) и 4 (Object 4) заданна контактная поверхность объект 2 главный</p>	<p>Между объектами 2 (Top Die) и 4 (Object 4) заданна контактная поверхность объект 4 главный</p>	<p>Между объектами 2 (Top Die) и 4 (Object 4) в процессе деформирования взаимодействия не будет</p>
85	<p>Что означает надпись</p> 	<p>Задана граница, по которой движение узлов по оси x осуществляться не будет.</p>	<p>Задана граница, по которой движение узлов будет осуществляться только по оси x.</p>	<p>Все узлы тела в ходе деформирования не будут перемещаться по оси x</p>
86	<p>Что означает постанова флажка напротив надписи Drag (смещение) в окне Позиционирование объектов</p>	<p>Текущий объект будет перемещаться с помощью манипулятора мышью</p>	<p>Текущий объект будет размещаться относительно другого объекта с помощью интерференции (наложения)</p>	<p>Текущий объект будет перемещаться в заданном направлении путем указания точных координат</p>
87	<p>Что означает постанова флажка</p>	<p>Текущий объект будет перемещаться в</p>	<p>Текущий объект будет перемещаться с</p>	<p>Текущий объект будет вращаться относительно</p>

	напротив надписи <b>Offset</b> в окне Позиционирова ние объектов	заданном направлении путем указания точных координат	помощью манипулятора мышь	заданной оси
88	Что означает постановка флажка напротив надписи <b>Interference</b> в окне Позиционирова ние объектов	Текущий объект будет размещаться относительно другого объекта с помощью интерференции (наложения)	Текущий объект будет вращаться относительно заданной оси	Текущий объект будет перемещаться с помощью манипулятора мышь
89	Что означает постановка флажка напротив надписи <b>Rotational</b> в окне Позиционирова ние объектов	Текущий объект будет вращаться относительно заданной оси	Текущий объект будет размещаться относительно другого объекта с помощью интерференции (наложения)	Текущий объект будет перемещаться в заданном направлении путем указания точных координат
90	Что означает надпись (2) Top Die - (1) Workpiece в окне взаимодействие объектов	Задано взаимодействие между объектами 2 и 1. Объект 2 является главным. Коэффициент трения по	Между объектами 2 и 1 задана поверхность теплообмена. Коэффициент теплообмена 0.25	Задана поверхность трения между объектами 2 и 1. Терние по которой подчиняется закону Кулона, коэффициент

		закону Зибеля равен 0.25		трения 0.25
91	Зачем используются кнопки  в окне взаимодействие объектов?	Для создания и удаления контактного взаимодействия	Для редактирования параметров текущего взаимодействия объектов	Для добавления объектов в дерево объектов
92	Зачем используется кнопка  Edit... в окне Взаимодействи е объектов	Для редактирования параметров текущего взаимодействия объектов	Для создания и удаления контактного взаимодействия	Для задания рекомендуемого значения погрешности контактного взаимодействия
93	Зачем используется кнопка  в окне Взаимодействи е объектов	Для задания рекомендуемого значения погрешности контактного взаимодействия	Для редактирования параметров текущего взаимодействия объектов	Для создания и удаления контактного взаимодействия
94	Зачем используется кнопка  в окне Взаимодействи е объектов	Для создания (запоминания) заданных данных о контактном взаимодействи объектов	Для задания рекомендуемого значения погрешности контактного взаимодействия	Для редактирования параметров текущего взаимодействия объектов
95	Какая	Информация о	Информация о	Информация о

	<p>информация находится в окошке  расположенном под надписью <b>Tolerance</b> в окне взаимодействие объектов</p>	<p>точности создания контактного взаимодействия</p>	<p>размерах сетки конечных элементов</p>	<p>величине перестроения сетки при создании контактной пары.</p>
96	<p>Зачем используется кнопка <b>Apply to other relations</b> в окне Взаимодействи е объектов</p>	<p>Для присвоения свойств текущего взаимодействия объектов другим «взаимодействи ям»</p>	<p>Для редактирования параметров текущего взаимодействия объектов</p>	<p>Для создания (запоминания) заданных данных о контактном взаимодействии объектов</p>
97	<p>О чем говорит флажок напротив надписей <b>Old</b> и <b>New</b> в окне Генерация базы данных?</p>	<p>О том, что база данных будет создана в старом или новом файле</p>	<p>О том, что база данных будет создаваться в старой или новой директории</p>	<p>О том что база данных будет создаваться одновременно с сохранением данных в КЕУ файл</p>
98	<p>Для чего используется команда <b>Check</b> в окне Генерация базы данных</p>	<p>Для проверки корректности задания исходных данных</p>	<p>Для создания файла базы данных</p>	<p>Для задания названия файла базы данных</p>

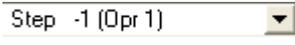
99	<p>Для чего используется команда <b>Generate</b> в окне Генерация базы данных</p>	<p>Для создания файла базы данных</p>	<p>Для проверки корректности задания исходных данных</p>	<p>Для сохранения данных в КЕУ файл</p>
100	<p>О чем говорится в окне</p> 	<p>Последний шаг в текущей базе данных 425. Если Вы создадите базу данных с текущим шагом -1 то все шаги после текущего будут удалены. Хотите ли вы выполнить удаление шагов после -1 шага?</p>	<p>Окно информирует о том, что запись в базу данных будет осуществлена после 425 шага, при этом следующий за 425 шагом будет шаг -1. И запрашивает разрешение на внесение подобного изменения.</p>	<p>Окно запрашивает разрешение на корректировку базы данных в связи с тем, что число шагов будет увеличено на 425</p>
101	<p>Что означает белый восклицательный знак, в красном кружке появляющийся в окне</p>	<p>При задании исходных данных в данном пункте была допущена ошибка, или данные были не введены. База</p>	<p>Не указаны данные задание, которых не является критичным для осуществления расчета.</p>	<p>Не правильно задана система единиц измерения.</p>

	Генерации базы данных в различных пунктах?	данных не была создана.		
102	Что означает желтый вопросительный знак, появляющийся в каком либо из пунктов при генерации базы данных в окне Генерация базы данных	Не указаны данные задание, которых не является критичным для осуществления расчета.	При задании исходных данных в данном пункте была допущена ошибка, или данные были не введены.	Граничные условия не могут быть интерпретированы для данной сетки.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Тест проверки знаний "Постпроцессор"

№	Команда	Варианты ответов		
1	Для чего используется кнопка 	Для того чтобы показать (скрыть) окно с деревом объектов	Для того чтобы показать (скрыть) окно с настройками отображения параметров процесса и интерфейса	Для синхронизации текущего отображения шага расчета во всех окнах программы
2	Для чего используется кнопка 	Для того чтобы показать (скрыть) окно с настройками отображения параметров процесса и интерфейса	Для синхронизации текущего отображения шага расчета во всех окнах программы	Для того чтобы показать (скрыть) окно с деревом объектов
3	Для чего используется кнопка 	Для отображения на экране одновременно нескольких окон с различными параметрами процесса	Для того чтобы показать (скрыть) окно с настройками отображения параметров процесса и интерфейса	Для синхронизации текущего отображения шага расчета во всех окнах программы
4	Для чего используется	Для синхронизации	Для того чтобы показать	Для отображения на

	кнопка 	текущего отображения шага расчета во всех окнах программы	(скрыть) окно с деревом объектов	экране одновременно нескольких окон с различными параметрами процесса
5	Для чего используется кнопка 	Для отображения в различных окнах изображения с одного вида	Для того чтобы показать (скрыть) окно с деревом объектов	Для отображения на экране одновременно нескольких окон с различными параметрами процесса
6	Для чего используется кнопка 	Для открытия окна с информацией о выполненных шагах расчета	Для последовательн ого просмотра результатов расчета по шкам в обратной последовательн ости	Для того чтобы показать (скрыть) окно с настройками отображения параметров процесса и интерфейса
7	Для чего используется кнопка 	Для выбора из выпадающего меню интересующего шага расчета	Для последовательн ого просмотра результатов расчета по	Для просмотра результатов расчета по шкам в последовательн

			шагам в обратной последовательн ости	ости от наименьшего шага к наибольшему.
8	Для чего используется кнопка 	Для перехода к первому имеющемуся в базе данных шагу расчета	Для остановки просмотра	Для последовательн ого просмотра результатов расчета по шагам в обратной последовательн ости
9	Для чего используется кнопка 	Для возвращения к предыдущему шагу расчета	Для перехода к первому имеющемуся в базе данных шагу	Для остановки просмотра
10	Для чего используется кнопка 	Для последовательн ого просмотра результатов расчета по шагам в обратной последовательн ости	Для возвращения к предыдущему шагу расчета	Для просмотра результатов расчета по шагам в последовательн ости от наименьшего шага к наибольшему.
11	Для чего используется кнопка 	Для остановки просмотра	Для перехода к последнему рассчитанному	Для просмотра результатов расчета по

			шагу	шагам в последовательности от наименьшего шага к наибольшему.
12	Для чего используется кнопка 	Для просмотра результатов расчета по шагам в последовательности от наименьшего шага к наибольшему.	Для перехода к первому имеющемуся в базе данных шагу	Для перехода к последнему рассчитанному шагу
13	Для чего используется кнопка 	Для перехода к последующему шагу расчета	Для перехода к последнему рассчитанному шагу	Для остановки просмотра
14	Для чего используется кнопка 	Для перехода к последнему рассчитанному шагу	Для остановки просмотра	Для просмотра результатов расчета по шагам в последовательности от наименьшего шага к наибольшему.
15	Для чего используется	Для просмотра сводных данных	Для отправки по интернету	Для создания файла отчета

	кнопка 	по результатам расчета	отчета производителю программного обеспечения в случае возникновения ошибки связанного с недоработкой программы.	при возникновении ошибки расчета
16	Для чего используется кнопка 	Для построения графиков	Для построения столбчатой диаграммы	Для отслеживания изменения параметров в между двумя точками.
17	Для чего используется кнопка 	Для задания команды Отслеживание точки	Для отслеживания изменения параметров в между двумя точками.	Для фиксации точки отсчета
18	Для чего используется кнопка 	Для отслеживания изменения параметров в между двумя точками.	Для построения столбчатой диаграммы	Для построения графика
19	Для чего используется	Для построения симметричной	Для отображения	Для рассеечения тела на две

	кнопка 	(не рассчитываемой) части тела	оси симметрии	равные части
20	Для чего используется кнопка 	Для вызова окна с краткой информацией о результатах расчета	Для вывода данных о результатах расчета на печать	Для сохранения результатов расчета в формате MSWord
21	Для чего используется кнопка 	Для открытия Окна Параметры	Для вывода редактора позволяющего корректировать полученные значения параметров	Для задания исходных значений параметров расчета с учетом которых будет выполнен новый расчет
22	Для чего используется кнопка  расположенная правее кнопки 	Для выбора из выпадающего меню наиболее часто используемых параметров описывающих процесс деформирования	Данная надпись говорит об отсутствии результатов расчета в базе данных.	О необходимости задания дополнительных исходных данных
23	Что обеспечивает постановка галочки напротив	Вывод в окне с изображением детали	Создание ранее не существующей	Автоматическое определение центра тяжести

	надписи <input checked="" type="checkbox"/> Ось	вспомогательны х осей определяющих направление системы координат	оси симметрии детали	выбранного объекта
24	Что обеспечивает постановка галочки напротив надписи <input checked="" type="checkbox"/> Ruler	Вывод по границам окна с изображением детали линейки автоматически учитывающей перемещение изображения детали и изменение масштаба изображения	Автоматическое определение центра тяжести деформируемой заготовки	Отображение изменения центра тяжести заготовки по ходу процесса
25	Что означает надпись Deformation в окне Параметры	Что в данной области окна Параметры можно выбрать целый ряд показателей характеризующ их напряженно — деформированн ое состояние заготовки	В данной области окна параметры сосредоточены только показатели определяющие значение деформаций	Такого названия в окне Параметры нет

26	Что означает надпись Displacement окне Параметры	В данной области окна Параметры сосредоточен ряд показателей определяющих перемещение элементов заготовки	В данной области окна Параметры сосредоточен ряд показателей определяющих деформацию элементов заготовки	В данной области окна Параметры сосредоточен ряд показателей определяющих напряжение в заготовке
27	Что означает надпись Strain – Effective окне Параметры	Интенсивность деформаций	Интенсивность деформаций по Мизесу	Среднее значение деформации
28	Что означает надпись Strain – Total окне Параметры	Область, в которой расположен ряд деформационных показателей	Область в которой расположены показатели напряженного состояния	Область в которой расположены скоростные показатели
29	Что означает надпись Strain – VonMises в окне Параметры	Интенсивность деформаций по Мизесу	Интенсивность деформаций	Глобальная деформация
30	Что означает надпись Strain – Mean в окне Параметры	Среднее значение деформации	Интенсивность деформаций	Наибольшая главная деформация
31	Что означает надпись Strain – Maxprincipal в	Наибольшая главная деформация	Наибольшее главное напряжение	Среднее значение деформации

	окне Параметры			
32	Что означает надпись Strain – Minprincipal в окне Параметры	Наименьшая главная деформация	Наименьшая главная деформация	Наименьшая главная скорость деформации
33	Что означает надпись Strain – RateMean в окне Параметры	Средняя скорость деформации	Среднее главное напряжение	Среднее значение деформации
34	Что означает надпись Strain – RateMaxprincipal в окне Параметры	Наибольшая главная скорость деформации	Наибольшая главная деформация	Наибольшее главное напряжение
35	Что означает надпись Strain – RateMinprincipal в окне Параметры	Наименьшая главная скорость деформации	Наименьшая главная деформация	Интенсивность напряжений
36	Что означает надпись StressEffective в окне Параметры	Интенсивность напряжений	Интенсивность деформаций	Наибольшая скорость
37	Что означает надпись StressMean в окне Параметры	Среднее главное напряжение	Среднее значение деформации	Средняя скорость деформации
38	Что означает надпись StressMaxprincipal	Наибольшее главное напряжение	Наибольшая главная деформация	Наименьшая главная деформация

	I в окне Параметры			
40	Что означает надпись StressMinprincipal в окне Параметры	Наименьшее главное напряжение	Наименьшая главная деформация	Наименьшая главная скорость деформации
41	Что означает надпись Temperature в окне Параметры	Температура	Прочность	Давление
42	Что означает надпись Hardness в окне Параметры	Прочность	Скорость	Гидростатическое давление
43	Что означает надпись Velocity в окне Параметры	Скорость	Прочность	Ускорение
44	Что означает отметка напротив надписи  Line в области display окна Параметры?	На экран выводиться изображение в виде линий с постоянным значением величины	На экран выводиться изображение интересующего параметра с плавным (полутоновым) переходом	На экран выводиться изображение интересующего параметра с округлением величины по границам элементов
45	Что означает отметка напротив	На экран выводиться	На экран выводиться	изображение интересующего

	надписи <input type="radio"/> Shaded в области display окна Параметры?	изображение интересующего параметра с плавным (полутоновым) переходом	информация о рассматриваемой величине в векторном виде	параметра с дискретным переходом от одного значения к другому
46	Что означает отметка напротив надписи <input type="radio"/> Solid в области display окна Параметры?	На экран выводиться изображение интересующего параметра с дискретным переходом от одного значения к другому	На экран выводиться информация о рассматриваемой величине в векторном виде	На экран выводиться изображение интересующего параметра с округлением величины по границам элементов
47	Что означает отметка напротив надписи <input type="radio"/> Elemental в области display окна Параметры?	На экран выводиться изображение интересующего параметра с округлением величины по границам элементов	На экран выводиться изображение интересующего параметра с плавным (полутоновым) переходом	изображение интересующего параметра с дискретным переходом от одного значения к другому
48	Что означает отметка напротив надписи <input type="radio"/> Vector plot в области display окна Параметры?	На экран выводиться информация о рассматриваемой величине в векторном виде	На экран выводиться изображение интересующего параметра с округлением	изображение интересующего параметра с дискретным переходом от одного значения

			величины по границам элементов	к другому
49	Что означает отметка напротив надписи <input type="radio"/> Global в области display окна Параметры?	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по наибольшему и наименьшему значению величины, возникающему в ходе всего процесса	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по значениям заданным пользователем	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по наибольшему и наименьшему значению величины, возникающему на данном шаге процесса
50	Что означает отметка напротив надписи <input type="radio"/> Local в области display окна Параметры?	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по наибольшему и наименьшему значению величины, возникающему на данном шаге процесса	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по значениям заданным пользователем	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по наибольшему и наименьшему значению величины, возникающему в ходе всего процесса
51	Что означает отметка напротив надписи <input type="radio"/> User в области display окна Параметры?	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по значениям	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по наибольшему	Масштабирование цветовой шкалы осуществляется по наибольшему

		заданным пользователем	и наименьшему значению величины, возникающему на данном шаге процесса	и наименьшему значению величины, возникающему в ходе всего процесса
--	--	---------------------------	--	--