

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

## **Теория и технология горячей штамповки**

Электронные методические указания  
к лабораторным работам

САМАРА

2012

Т 338

Составители: **Костышев Вячеслав Александрович,**  
**Ненашев Валерий Юлианович**

Рецензент: Заббаров Р., доцент кафедры ТМиАМ.

**Теория и технология горячей штамповки** [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В.А. Костышев, В.Ю. Ненашев. - Электрон. текстовые и граф. дан. (9,14 Мбайт). - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 150400.62 «Металлургия», специализирующихся по профилю «Обработка металлов давлением» и изучающих дисциплину «Технологические процессы кузнечноштамповочного производства», в 7 семестре (Федеральный Государственный образовательный стандарт третьего поколения - ФГОС-3), и по направлению 150700.62 «Машиностроение», специализирующихся по профилю «Машины и технология обработки металлов давлением» и изучающих дисциплину «Технологияковки и объемной штамповки», в 6 семестре (Федеральный Государственный образовательный стандарт третьего поколения - ФГОС-3).

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением СГАУ.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

1.Лабораторная работа № 1. Изучение технологического процессаковки тонкостенного кольца.....	4
2.Лабораторная работа № 2. Исследование течения металла при протяжке под плоскими бойками.....	40
3.Лабораторная работа № 3. Исследование формоизменения заготовок в подкатных ручьях молотового штампа.....	53
4.Лабораторная работа № 4. Исследование процесса штамповки в закрытом штампе.....	63
5.Лабораторная работа № 5. Изучение характера формоизменения заготовки при заполнении открытого штампа.....	79

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОВКИ ТОНКОСТЕННОГО КОЛЬЦА

Цель работы: экспериментально изучить особенности выполнения всех основных операций технологического процессаковки тонкостенного кольца и влияние параметров процесса на особенности формоизменения заготовки на каждой операции.

### 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗУЧАЕМОМ ПРОЦЕССЕ

Технологический процесс получения свободной ковкой тонкостенного кольца состоит из ряда операций, выполняемых в определенной последовательности (рис. 1). Исходная заготовка высотой  $H_{заг}$  и диаметром  $D_{заг}$  осаживается под плоскими плитами до необходимой высоты  $h_i$  с образованием бочки по наружному диаметру. Средний диаметр осаженной заготовки без учета бочкообразования может быть определен из равенства объемов:

$$\frac{\pi D_{заг}^2}{4} H_{заг} = \frac{\pi D_{icc}^2}{4} h_i = const.$$

Однако если осадка является окончательной операцией технологического процесса, необходимо учитывать объем металла, затраченный на образование бочки. Этот объем зависит от размеров исходной заготовки, степени деформации, условий трения и может быть оценен коэффициентом бочкообразования

$$K = \frac{V_b}{V_{заг}} 100\%.$$

где  $V_b$ -объем металла, затраченный на образование бочки,  $V_{заг}$ - объем исходной заготовки.

Объем заготовки с учетом бочкообразования определяется из выражения

$$V_{заг} = V_{нок} + V_b.$$

На следующей операции в осаженной заготовке прошивается сквозное отверстие. Эта операция выполняется в два перехода. На первом переходе в заготовке делается "глухое" отверстие до толщины перемычки  $h_n \approx 1/3h$ . На втором переходе делается сквозное отверстие путем просечки перемычки на подкладном кольце. При этом перемычка удаляется в отход, который называется "выдрой". Объем отхода рассчитывается исходя из фактических размеров перемычки:

$$V_{отх} = (\pi d_n^2)/4 h_n.$$

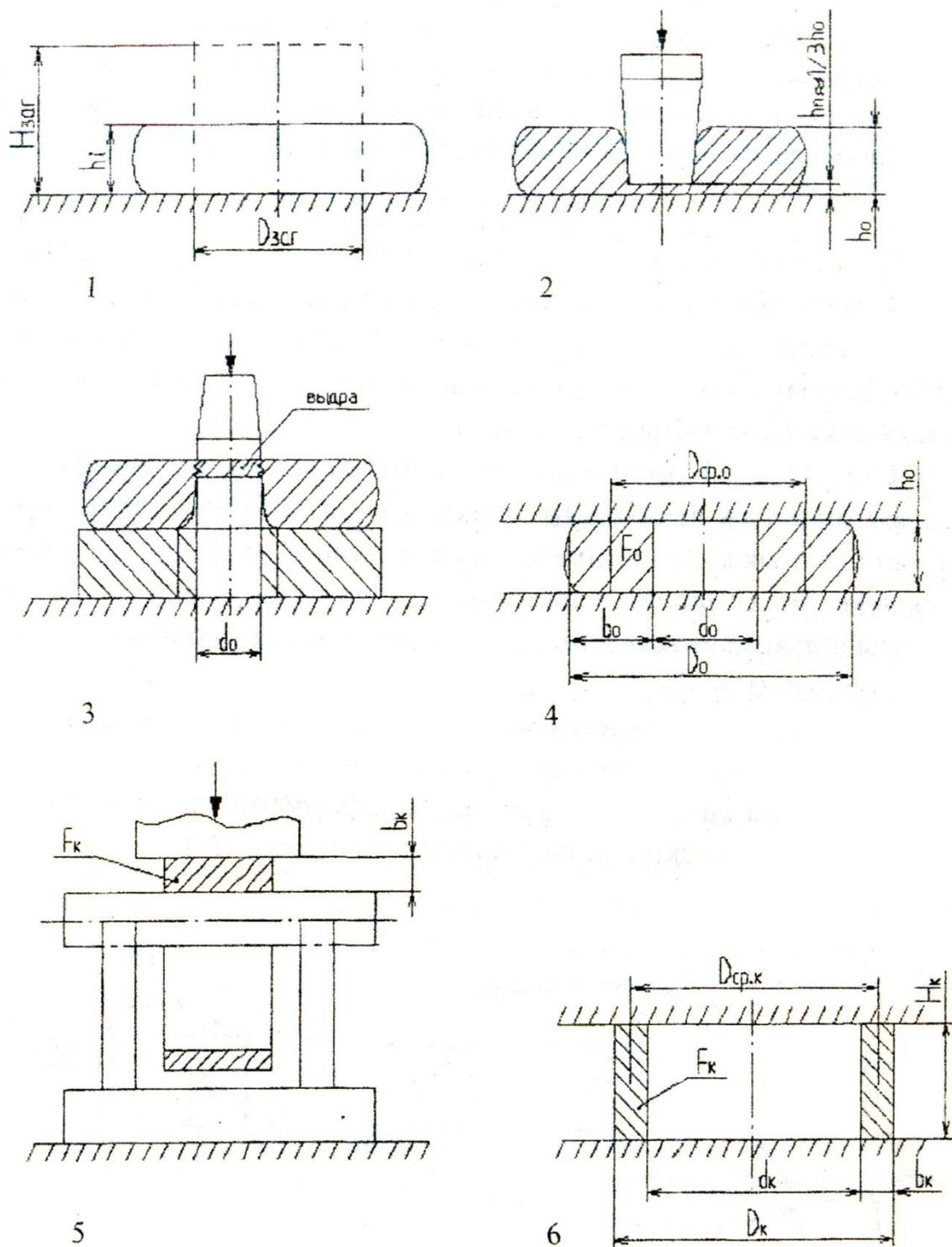


Рис. 1. Схема операцийковки тонкостенного кольца: 1 - осадка; 2 - первый переход прошивки; 3 - второй переход прошивки; 4 - правка; 5 - раскатка на оправке; 6 - готовое кольцо.

Качество тьюковки после прошивки зависит от соотношения диаметров получаемого кольца. Если  $D_0/d_0 > 2 \dots 2,5$ , то кольцо не имеет существенных геометрических искажений и может быть использовано как готовая поковка для последующей механической обработки (толстостенное кольцо).

При  $D_0/d_0 < 2$  прошивка не применяется ввиду значительных геометрических искажений стенки кольца. Поэтому для получения тонкостенных колец применяется следующая операция: раскатка на оправке. Эта операция аналогична протяжке заготовки бесконечной длины под комбинированными бойками: верхний - плоский, нижний - выпуклый (рис. 2).

Операция выполняется многократными обжатиями с промежуточным поворотом кольца. За несколько оборотов заготовки с постепенным увеличением степени деформации можно получить кольцо практически с любой толщиной стенки ( $b_1$ ).

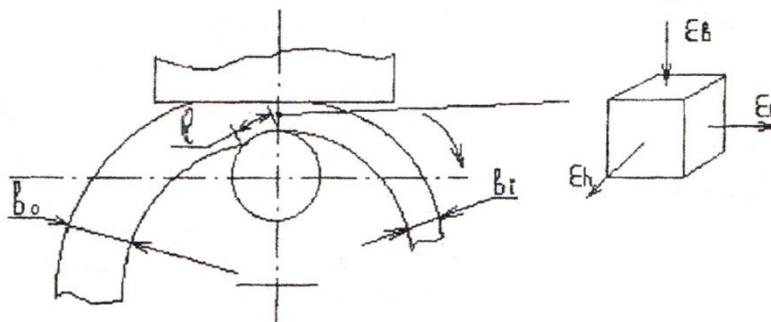


Рис. 2. Схема раскатки кольцевой заготовки:  
а - наладка инструмента; б - схема деформированного состояния

Операция протекает в условиях объемной схемы деформированного состояния: деформация укорочения в направлении толщины кольца удлинения в направлении высоты кольца ( $\epsilon_h$ ) и удлинения в тангенциальном направлении ( $\epsilon_D$ ). Такая схема деформаций не позволяет рассчитать размеры кольца после раскатки, опираясь только на условие постоянства объема.

В качестве дополнительного условия можно использовать уравнение изменения поперечного сечения заготовки, характерное для операции протяжки:

$$F_K = F_0(1 - \epsilon_b(1 - f)), \quad (1)$$

где  $F_0$  - площадь поперечного сечения кольца в начале процесса раскатки,  $\text{мм}^2$ ;

$F_K = H_K b_K$  - площадь поперечного сечения кольца в конце любого этапа процесса раскатки,  $\text{мм}^2$ ;

$\epsilon_b = \frac{b_0 - b_K}{b_0}$  - относительная степень деформации на любом этапе раскатки;

$f = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_h}$  - коэффициент интенсивности уширения кольца.

Коэффициент  $f$  является переменной величиной и в общем случае зависит от величины подачи, условий трения и степени деформации. При раскатке заготовки (рис. 2) величина  $f$ , в свою очередь, изменяется в зависимости от степени деформации, диаметра оправки и ряда других параметров.

Большое число параметров, влияющих на интенсивность уширения, затрудняет получение теоретических зависимостей для расчета ее величины. Поэтому на практике используются экспериментальные значения коэффициента  $f$ , полученные для одного или нескольких наиболее значимых факторов.

Из уравнения (1) имеем:

$$f = 1 - \frac{F_0 - F_k}{F_0 \varepsilon_b}, \quad (2)$$

что позволяет, изменяя  $\varepsilon_b$  получить экспериментальную зависимость коэффициента интенсивности уширения от степени деформации по толщине кольца.

Знание величины коэффициента  $f$  необходимо для расчета размеров исходной кольцевой заготовки перед раскаткой ( $D_0; d_0; h_0$  - рис. 1) по известным размерам готового кольца ( $D_K; d_K; h_K$ ). Действительно, задавшись степенью деформации при раскатке ( $\varepsilon_b$ ) по уравнению (1) можно рассчитать площадь поперечного сечения исходного кольца:

$$F_0 = \frac{F_k}{1 - \varepsilon_b(1 - f)}$$

Из равенства объемов:

$$\pi D_{cp.0} F_0 = \pi D_{cp.K} F_k$$

имеем:

$$D_{cp.0} = \frac{F_k}{F_0} D_{cp.K},$$

где

$$D_{cp.0} = (D_0 + d_0)/2; D_{cp.K} = (D_K + d_K)/2.$$

Учитывая, что  $b_0 = \frac{b_K}{1 - \varepsilon_b}$  определяются диаметры исходной кольцевой заготовки:

$$D_0 = D_{cp.0} + b_0;$$

$$d_0 = D_{cp.0} - b_0.$$

## 2. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА БОЧКООБРАЗОВАНИЯ

### 2.1. Оборудование, оснастка, приборы

В качестве исходной заготовки используется слиток из свинца диаметром  $D_{заг} = 50$  мм; длиной  $H_{заг} = 110 \dots 120$  мм.

Осадка производится на гидравлическом прессе, поэтапно с постепенным увеличением степени деформации. Измерение геометрических размеров осаженой заготовки выполняется штангенциркулем с точностью до 0,1 мм.

### 2.2. Порядок проведения эксперимента и обработка экспериментальных данных

1. Измерить размеры исходной заготовки  $D_{заг}, H_{заг}$  и рассчитать ее объем:  $V_{заг} =$

$$\frac{\pi D_{заг}^2}{4} H_{заг}.$$

2. Принять, что окончательная высота заготовки после осадки  $h_0 = 18 \dots 22$  мм.

3. Наметить 5-6 этапов дробной деформации при осадке и рассчитать высоту заготовки после каждого этапа:

$$h_1 = H_{заг} - \frac{(H_{заг} - h_0)}{5};$$

$$h_2 = H_{заг} - \frac{2(H_{заг} - h_0)}{5};$$

$$h_3 = H_{заг} - \frac{3(H_{заг} - h_0)}{5};$$

и т.д.

4. После каждого этапа осадки произвести измерения (рис. 3) следующих размеров:  $h_i$ ;  $D_T$ . За диаметр торца ( $D_T$ ) принять среднеарифметическое значение нескольких замеров по верхнему и нижнему торцам заготовки.

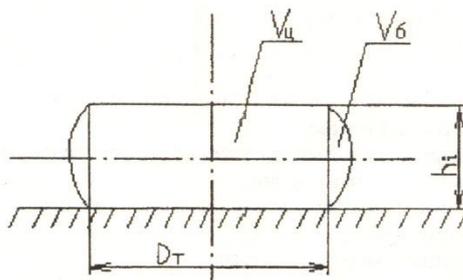


Рис. 3. Схема замеров осаженной заготовки

5. Рассчитать для каждого этапа осадки объем цилиндрической части заготовки:

$$V_{ц} = \frac{\pi D_T^2}{4} h_i;$$

объем металла, затраченного на бочкообразование:

$$V_{б} = V_{заг} - V_{ц};$$

коэффициент бочкообразования:  $K = \frac{V_{б}}{V_{заг}} 100\%$ .

6. Результаты экспериментов и расчетов представить в виде сводной таблицы (табл. 1).

7. Построить график изменения коэффициента бочкообразования в зависимости от степени деформации при осадке:  $K = f(\epsilon_H)$ .

Таблица 1

*Результаты экспериментальных исследований по осадке заготовки*

Исходная заготовка									
$H_{заг}$ , мм	$D_{заг}$ , мм	$V_{заг}$ , мм <sup>3</sup>	№ этапа	$h_j$ , мм	$\epsilon_H = \frac{H_{заг} - h}{H_{заг}}$	$D_T$ , мм	$V_{ц}$ , мм <sup>3</sup>	$V_{б}$ , мм <sup>3</sup>	$K = \frac{V_{б}}{V_{заг}} 100\%$
			1						
			2						
			3						
			4						
			5						

8. Сформулировать выводы о проделанной работе, в которых осветить следующие вопросы:

- Каков характер изменения коэффициента бочкообразования с увеличением степени деформации?
- Как влияет бочкообразование на расчет размеров и объема исходной заготовки?
- Каковы причины бочкообразования?
- Какими способами можно уменьшить бочкообразование или полностью устранить на готовой поковке?

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСКАТКЕ КОЛЬЦА НА ОПРАВКЕ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА УШИРЕНИЯ ЗАГОТОВКИ

#### 3.1. Оборудование, оснастка, мерительный инструмент

Исходной заготовкой является свинцовый слиток диаметром  $D_{заг}=50$  мм,  $H_{заг}=110...120$  мм.

Процессковки тонкостенного кольца выполняется на гидравлическом прессе по схеме, показанной на рис. 1. Для прошивки заготовки используется прошивень и подкладное кольцо. Раскатка кольца производится на специальной оснастке. В качестве измерительного инструмента используется штангенциркуль. Поворот кольца при раскатке выполняется с помощью кузнечных клещей.

#### 3.2. Порядок проведения работ и обработка экспериментальных данных

1. Замерить диаметр и высоту исходной заготовки.
2. В соответствии со схемой и рекомендациями (рис.1) выполнить первые три операции технологического процесса: осадку, прошивку, правку. При этом конечная высота кольца должна быть  $18 \div 22$  мм.
3. Рассчитать объем кольца ( $V_{кольца}$ ) без выдры.
4. Замерить толщину ( $h_0$ ) и внутренний диаметр ( $d_0$ ) кольца. Наружный диаметр ( $D_0$ ) рассчитать из выражения

$$\frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_0^2) h_0 = V_{кольца}$$

Тогда толщина кольца  $b_0 = \frac{D_0 - d_0}{2}$ , а площадь его поперечного сечения  $F_0 = b_0 h_0$ .

5. Приняв общую степень деформации при раскатке  $\varepsilon_b = 50-60$  %, рассчитать конечную толщину кольца  $b_k = b_0(1 - \varepsilon_b)$ , что соответствует общему обжатию  $\Delta b = b_0 - b_k$ .

Раскатка может производиться за несколько этапов (полных оборотов кольца вокруг оправки) так, чтобы  $\Delta b = \Delta b_1 + \Delta b_2 + \dots + \Delta b_n$ .

Каждый этап раскатки исследуется отдельной бригадой студентов.

6. После каждого этапа раскатки путем прямых измерений определяются все размеры кольца и рассчитываются :

$F_k$ - конечная площадь поперечного сечения;

$\varepsilon_b$ - накопленная степень деформации.

7. По формуле (2) рассчитать коэффициент уширения заготовки.

8. Результаты проделанной работы представить в виде сводной таблицы (табл.2).

Таблица 2

*Результаты экспериментальных исследований по раскатке кольца*

Исходная заготовка			Кольцевая заготовка						Готовое кольцо					$\varepsilon_b$	$f$
$D_{заг}$	$H_{заг}$	$V_{заг}$	$V_{кольца}$	$D_0$	$d_0$	$h_0$	$b_0$	$F_0$	$D_k$	$d_k$	$h_k$	$b_k$	$F_k$		

9. Построить график изменения коэффициента уширения заготовки в зависимости от степени деформации, если исследовалась поэтапная раскатка кольца несколькими бригадами студентов.

10. Сформулировать выводы о проделанной работе, в которых отразить ответы на следующие вопросы:

- Как сильно влияет степень деформации на коэффициент уширения и возможно ли в технологических расчетах использовать среднее значение этой величины?

- Для каких расчетов необходим коэффициент уширения?
- Что влияет на выбор величины общей степени деформации при раскатке колец?
- Какие факторы влияют на величину бочкообразования при осадке?
- Чем объясняется ограничение минимальной толщины перемычки при прошивке заготовки?

### 3.3. Анализ процесса осадки, прошивки и разгонки с помощью программного комплекса DEFORM 2D/3D

#### Осадка

##### Характеристики процесса осадки

Осадкой называют формоизменяющую технологическую операцию, при помощи которой уменьшают высоту исходной заготовки с одновременным увеличением площади ее поперечного сечения.

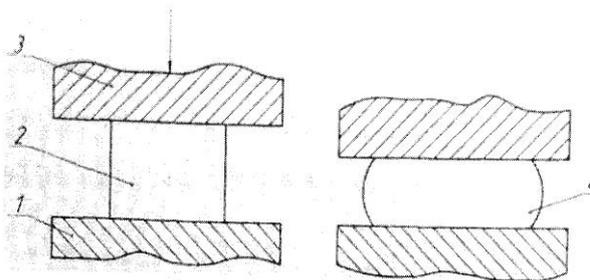


Рис. 1. Схема осадки. 1 — нижний неподвижный боек, 2 — заготовка, 3 — верхний подвижный боек, 4 — деталь

Осадку применяют, когда необходимо: получить поковку или участок ее с поперечным сечением большим, чем сечение заготовки или слитка; увеличить уковку; уменьшить анизотропию механических свойств и улучшить эти свойства в осевом и поперечных направлениях поковки; более равномерно распределить и оптимизировать структурно-фазовое состояние в очаге деформации; выровнять торцевые поверхности заготовки и увеличить поперечное сечение перед прошивкой.

Для предварительных формоизменяющих операций достаточно рассмотреть силовые параметры с учетом неоднородности деформации. Все эти формоизменяющие операции имеют в очаге деформации близкие схемы напряженного состояния. Так как деформация происходит при наличии внутреннего трения, то в зоне деформации образуются зоны затрудненной деформации.

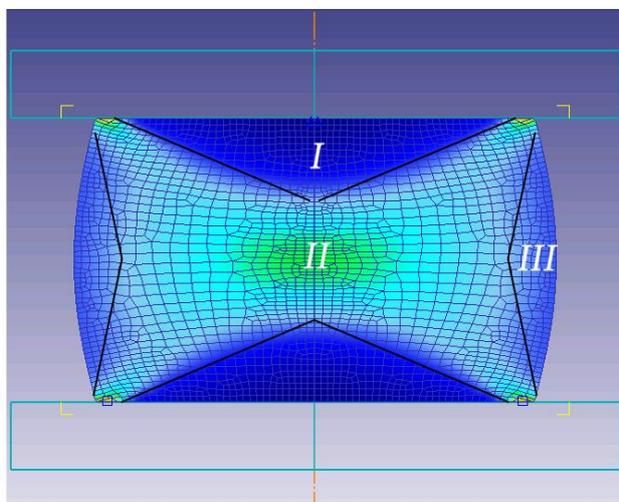
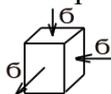
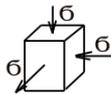


Рис. 2. Пример осадки в Deform 2d.

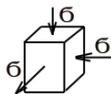
Хорошо различимы зоны, сильно отличающиеся по своим характеристикам друг от друга. Напряжённно-деформированное состояние этих зон также различно.



В зоне I деформация почти не происходит. Эта зона является как бы продолжением деформирующего инструмента, представляя собой конус с начальным радиусом  $R_0$ . По мере осаживания заготовки высота зоны I уменьшается незначительно при весьма малом увеличении радиуса  $R_0$ .



Зона II испытывает давление зоны I, осаживается и выдавливается наклонными поверхностями от центра к периферии. В этой зоне напряжения максимальные, температура возрастает. Это зона интенсивной деформации, схема напряжённного состояния представляет собой всестороннее сжатие.



Зона III подвергается тангенциальным растягивающим напряжениям от выдавливаемого объема второй зоны. В этой зоне, как и в первой, деформация почти не происходит.

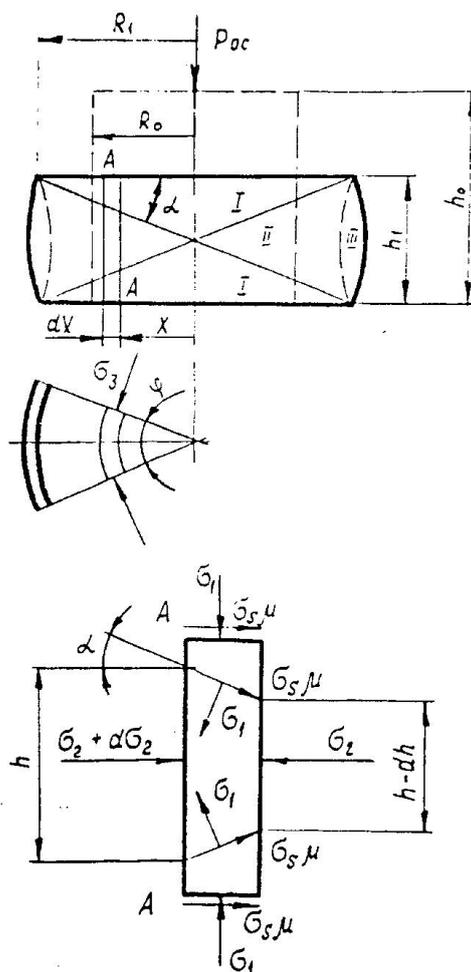


Рис. 3 — Модель очага деформации при осадке цилиндра [1]

При краевых условиях  $x=R_1$ ;  $\sigma_1=\sigma_s$ ;  $h=h_1$  вертикальное напряжение  $\sigma_1$  при осадке определяется следующей формулой:

$$\sigma_1 = 2\sigma_s[(K \operatorname{tg} \alpha + \mu) \left( \frac{R_1}{h_1} - \frac{x}{h} \right) + 1]$$

Где  $\sigma_s$  – предел текучести при заданных температурно-скоростных условиях;  $h$  – высота заготовки после осаживания;  $R_0$  – внешний радиус заготовки до деформации;  $R_1$  – внешний радиус заготовки после деформации;  $K$  – коэффициент, учитывающий анизотропию,  $\mu$  – коэффициент трения.

Зная  $\sigma_1$  можно определить усилие осаживания  $P_{oc}$  [2]

$$P_{oc} = \pi R_1^2 \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 \right)$$

Отсюда напряжение осаживания:

$$\sigma_{oc} = \frac{P_{oc}}{\pi R_1^2} = \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 \right)$$

Рабочее напряжение  $\sigma_p$ , равное сумме напряжения осаживания  $\sigma_{oc}$  и величины тангенциального растяжения третьей зоны, определяется по следующей формуле [1]:

$$\sigma_p = \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 + 1,1 \ln \frac{R_1}{R_0} \right)$$

Полное усилие осаживания заготовки:

$$P = \pi R_1^2 \sigma_p$$

#### Осадка заготовки в Deform 2D.

Осадку можно смоделировать в *Deform 2D/3D*. Осадка цилиндрической заготовки является осесимметричной задачей, и её с достаточной точностью можно реализовать в *Deform 2D*. Часть пунктов являются общими для любого процесса.

Запускаем *Deform 2D*. В зависимости от операционной системы схема может незначительно меняться. Возможен выбор русского языка интерфейса по желанию во вкладке *options (опции)*.



Рис. 4. Окно настроек интерфейса.

2. Для того, что бы создать новую задачу в программе *Deform 2D* надо выбрать в главном меню *file => new problem* (для удобства лучше использовать сочетание клавиш 'ctrl' и 'n').

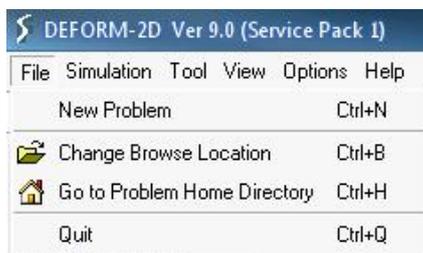


Рис. 5. Создание новой задачи.

Откроется диалоговое окно '*problem setup*' с выбором настроек.

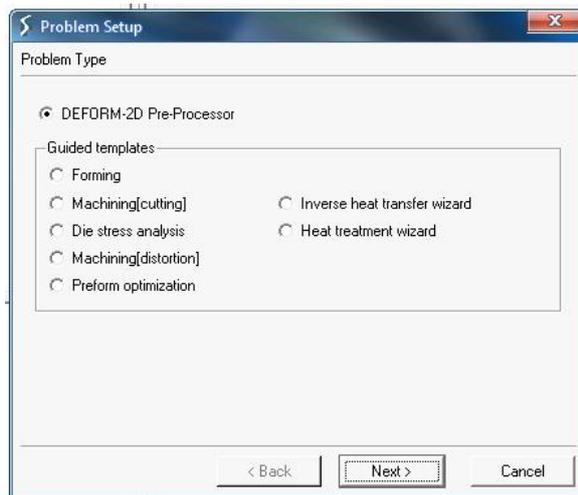


Рис. 6. Выбор режима ввода информации.

Стоит выбрать *DEFORM 2D Pre-processor* (по умолчанию).

В следующем окне предлагается выбор места локации файлов процесса. Рекомендуется оставить место хранения по умолчанию. Выбор места хранения по умолчанию можно изменять в настройках (*options*) программы.

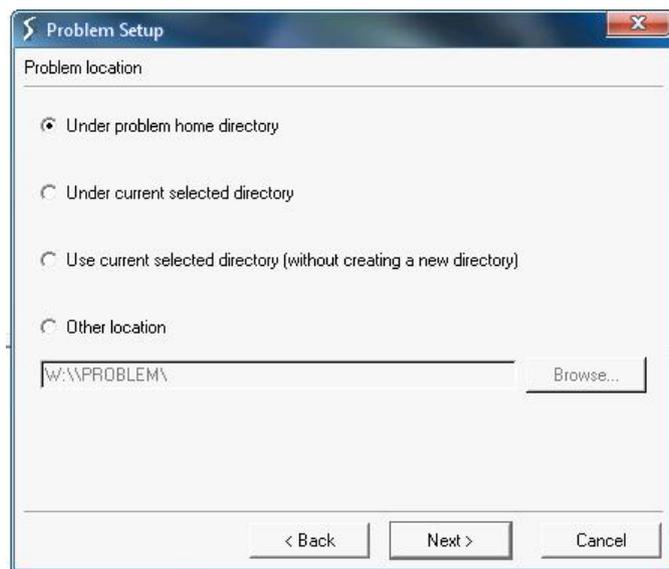


Рис. 7. Расположение файлов.

Далее предлагается обозначить задачу. Под этим названием в дальнейшем она будет выводиться в корневой папке. Если предполагается много работы в программе *Deform*, желательно ответственно отнестись к названиям во избежание путаницы.

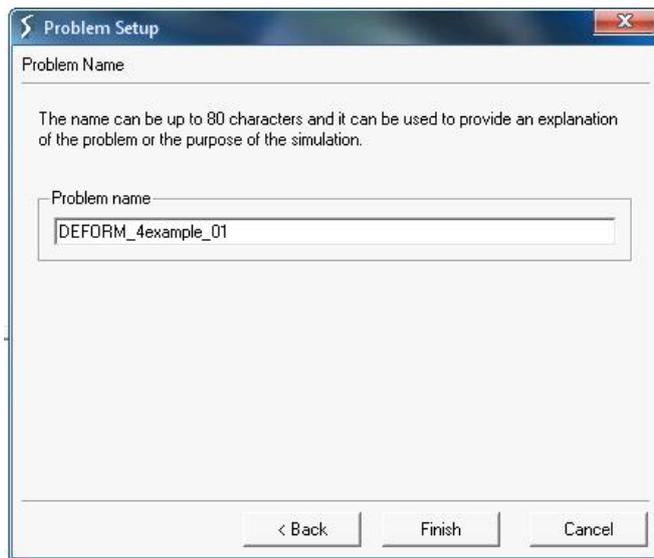


Рис. 8. Название задачи.

Основными рычагами управления программой являются следующие команды:



Рис. 9. Основные инструменты. 1 – настройки симуляции, 2 – материалы, 3 – позиционирование, 4 – взаимодействие, 5-база данных.

В первую очередь в *simulations controls* (настройках симуляции) стоит убедиться в том, что значения измеряются в системе СИ (**Units = SI**), а также в том, что выбраны **режимы (mode)**: деформации (*deformation*) и теплопередачи (*heat transfer*). Эти настройки можно выставить по умолчанию во вкладке меню *options => environment settings* (опции => конфигурации). По желанию можно ввести заголовок задачи и операции.

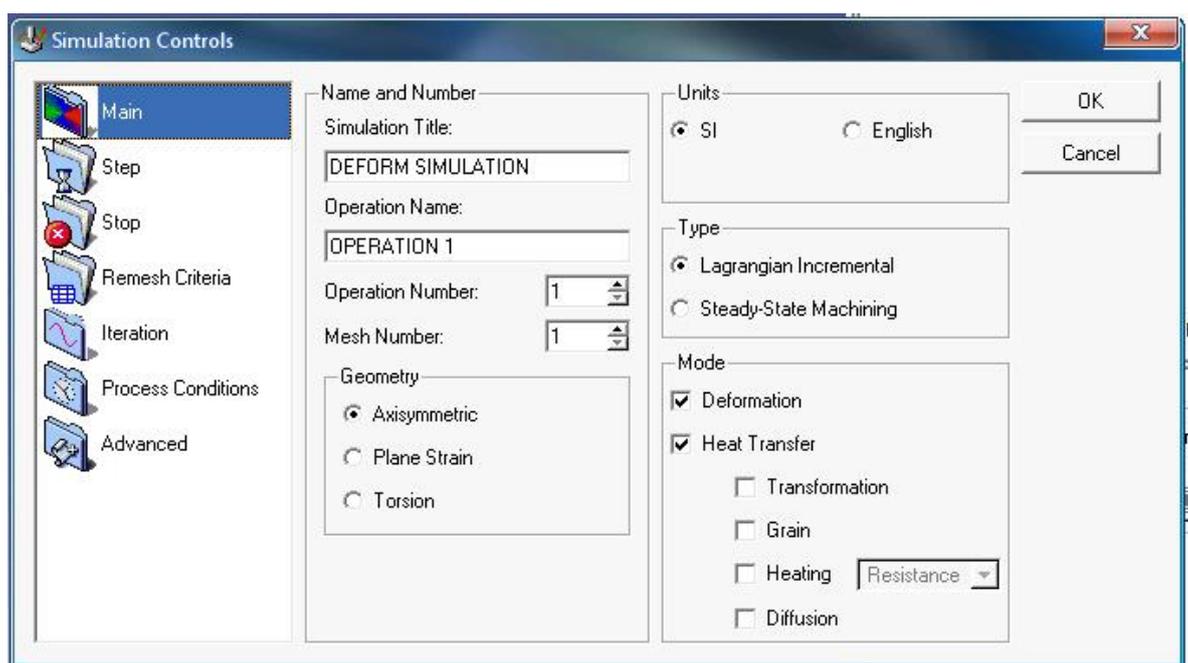


Рис.10. Настройки задачи.

В дереве объектов следует создать два новых  элемента: *top die* и *bottom die*. Геометрия объектов может быть создана несколькими способами: *импортом (import geo)* геометрии из файлов в формате \*.stp, \*.iges и некоторых других, замкнутым контуром (во вкладке *edit*) и геометрическими примитивами (цилиндр, полый цилиндр, тор, сфера, полая сфера).

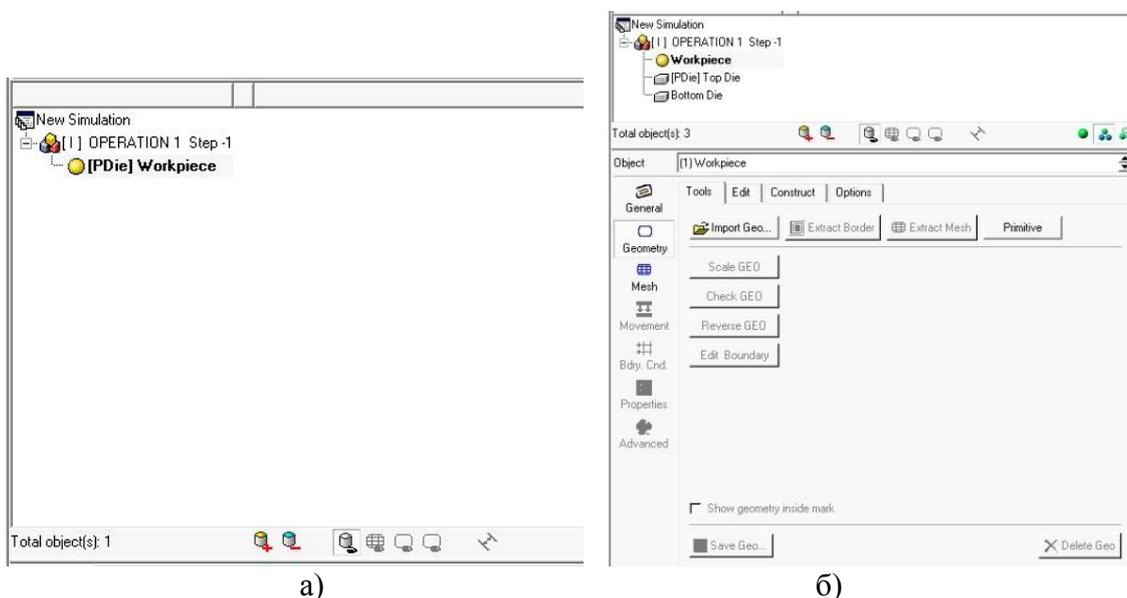


Рис. 11. Дерево объектов – а) изначальное б) после создания инструмента.

В случае простой осадки целесообразнее пользоваться геометрическими примитивами. В качестве примера можно рассмотреть процесс применительно к изделиям швеллерного типа с внутренними фланцами из цилиндрической заготовки. В диалоговом окне во вкладке *Цилиндр (Cylinder)* вводим значения *высоты (height (H))* и ширины профиля, *радиуса (width (W))*, полученные в предыдущих расчётах. Например, для заготовки  $W=59$ ,  $H=115$ . Все значения размеров в системе СИ задаются в миллиметрах.

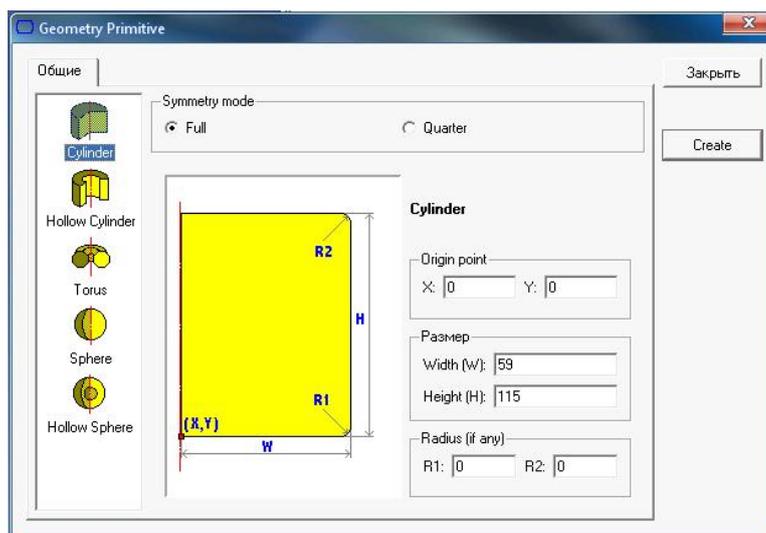


Рис. 12. Создание геометрии при помощи примитивов.

После создания геометрии необходимо создать т.н. *сетку*. В *Deform* расчет идёт по границам сетки, чем больше элементов сетки, тем точнее расчёт, но тем большее время он

займёт. Для того чтобы наблюдать все процессы, происходящие во время осадки достаточно будет не большого количества элементов, например *1000*. Создание сетки необходимо только заготовке.

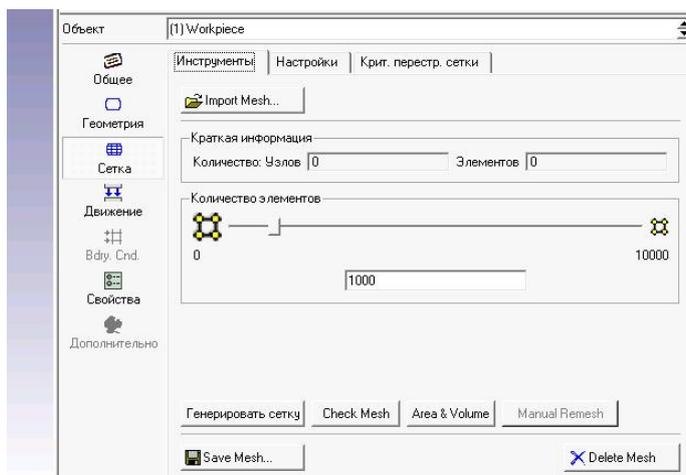


Рис. 13. Создание сетки конечных элементов.

В главном окне программы должно получиться следующее:

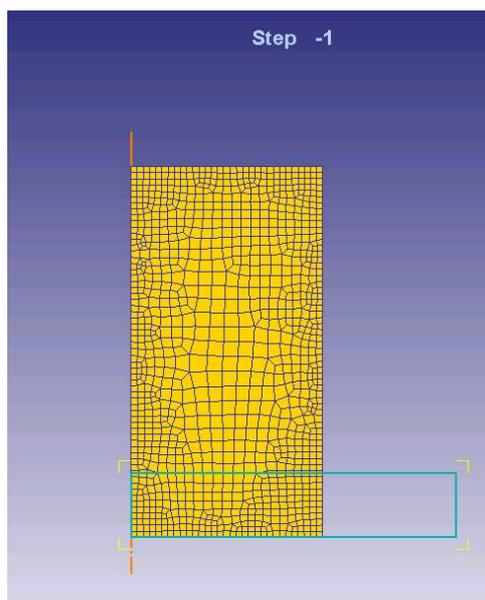


Рис. 14. Отображение геометрии всех элементов до позиционирования.

Далее следует задать материал и температуру заготовки и инструмента. Это можно сделать во вкладке 'общее'.

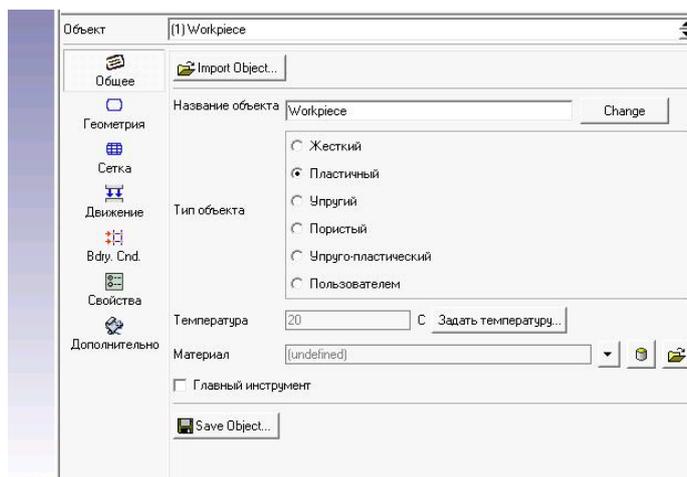


Рис. 15. Меню объекта.

К сожалению, стандартный марочник программы *Deform* содержит мало материалов по российским стандартам. Для некоторых материалов можно найти соответствие между отечественным и зарубежным стандартом. Однако программа *Deform* позволяет создать материал по заданным параметрам и соответствующим физико-механическим свойствам сплавов. Одним из материалов выполненных по ГОСТ в стандартной библиотеке является титановый сплав ВТ9. После выбора материала следует задать температуру заготовки (например, 1000С) и инструмента, для предотвращения захлаживания заготовки в местах контакта, например 400С.

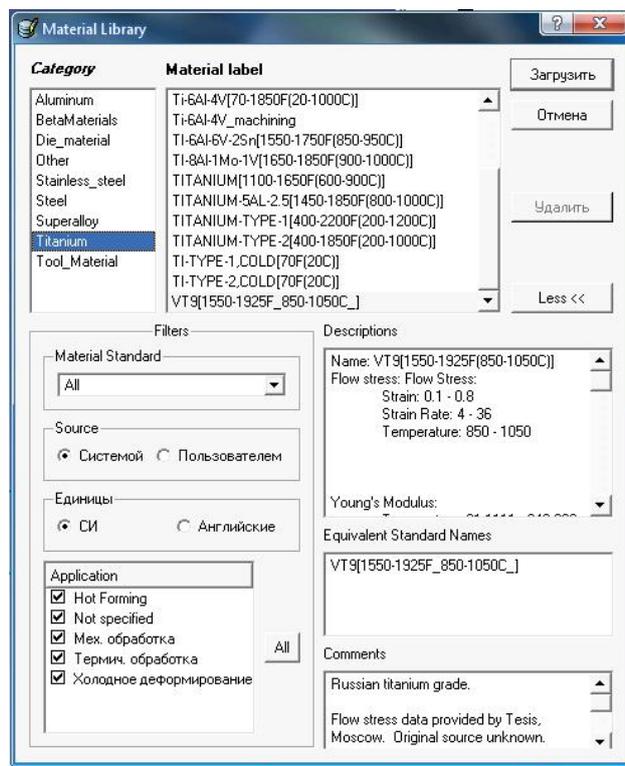


Рис. 16. Библиотека материалов.

Выстраивание объектов на заданные позиции производится в подменю *object positioning* (позиционирование объектов). Для того чтобы top die располагался над заготовкой, а bottom die – ниже, надо во вкладке *interference* (интерференция) выбрать

инструмент позиционируемым объектом, и по  $-Y$  и  $Y$  соответственно расположить их относительно workpiece.

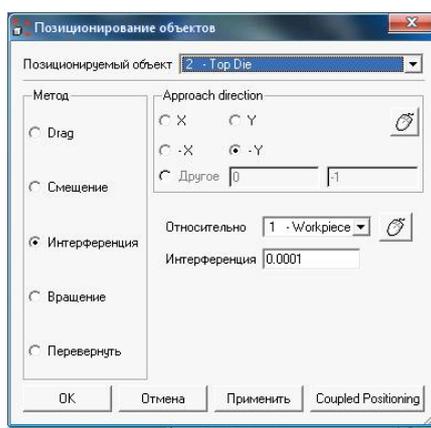


Рис. 17. Позиционирование объектов относительно друг друга.

Следующим этапом необходимо задать условия *inter-object* (взаимодействия объектов) такие как трение, теплообмен, нагрев и другие.

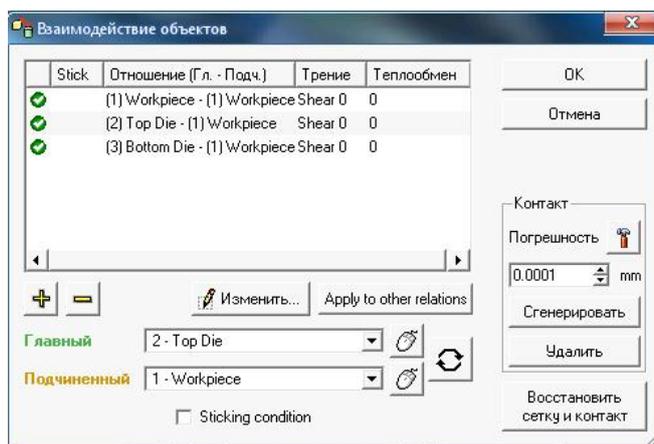


Рис. 18. Окно взаимодействия объектов и создания граничных условий.

Условия взаимодействия по умолчанию выставлены на ноль и необходимо их *изменить* соответствующей кнопкой. Во вкладке «деформационные» можно выставить трение, как постоянной величиной, так и функцией от времени и давления. Поскольку условия трения в целом не меняются, то стоит выбрать *constant* постоянное значение трения, равное 0.3. Во вкладке «температурные» аналогично можно выбрать как постоянное значение, так и являющееся функцией от времени, давления либо температуры.

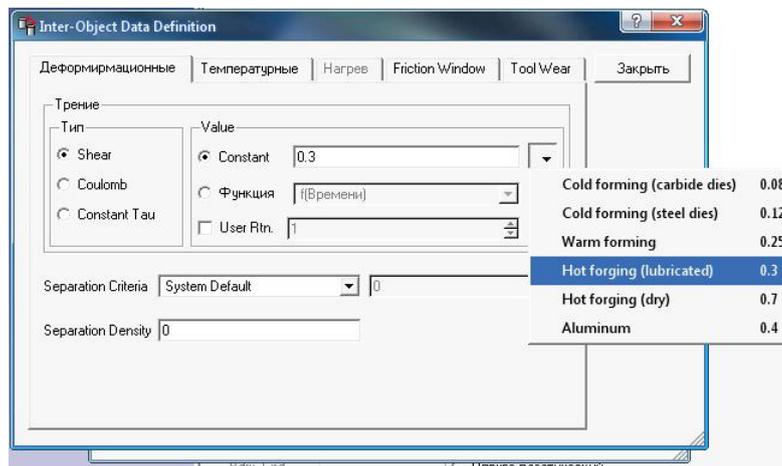


Рис. 19. Условия трения между объектов.

Для контакта *заготовка-заготовка* значения будут несколько отличаться от контактных пар *заготовка-инструмент*.

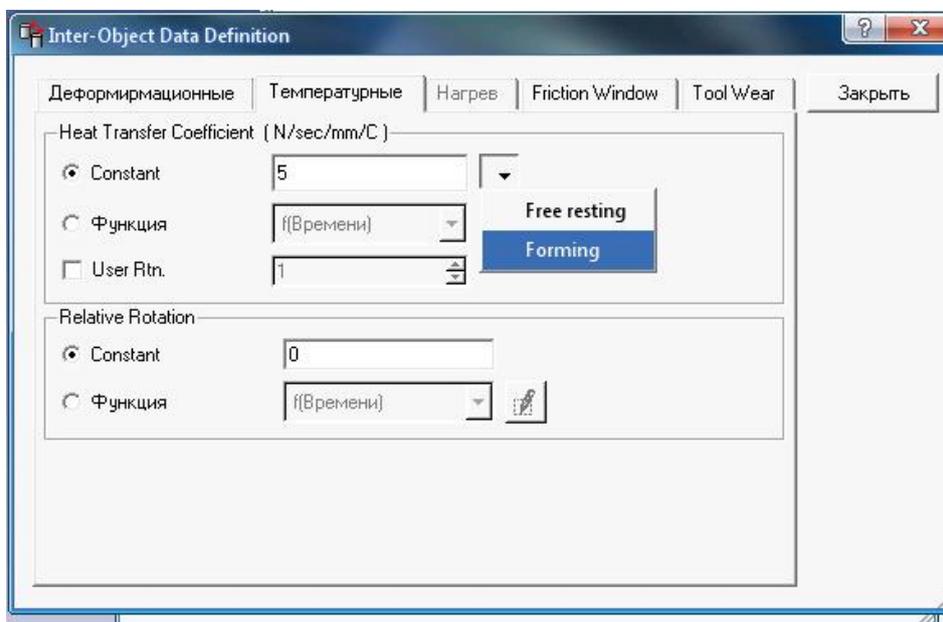


Рис. 20. Условия теплообмена между объектов.

После чего надо нажать «Сгенерировать» и в результате должна получиться следующая картина:

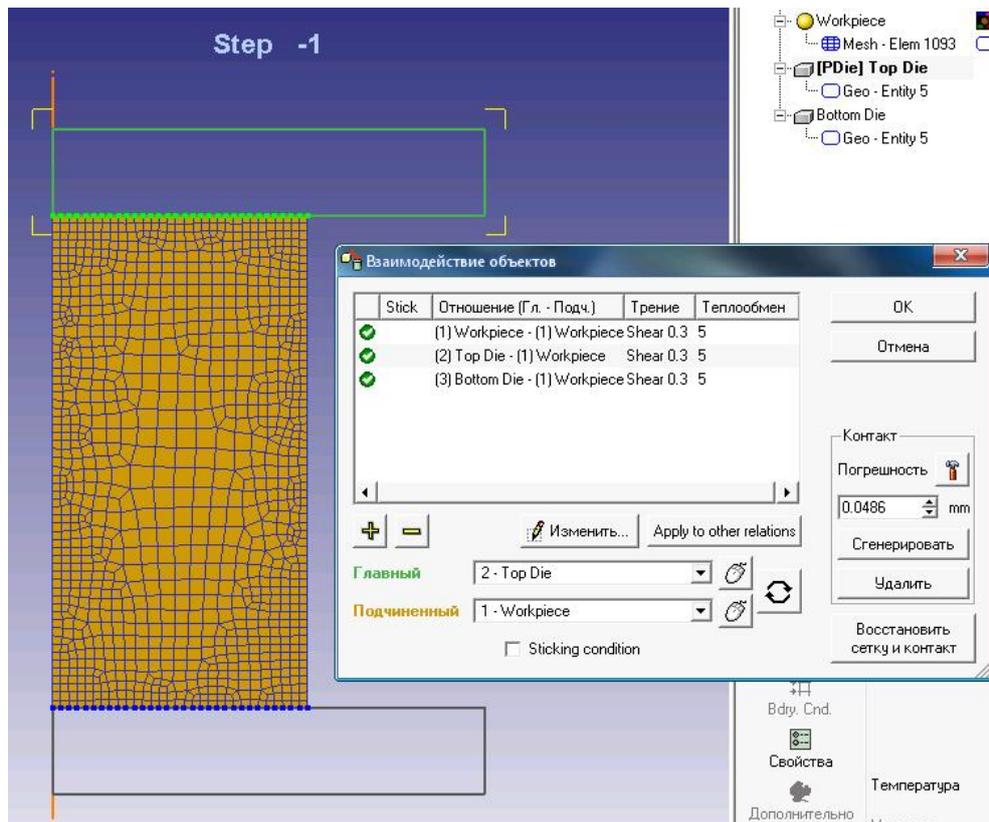


Рис. 21. Сгенерированные условия взаимодействия и граничные условия.

Теперь надо задать движение инструмента в соответствующей вкладке. Предлагается выбор условий, от которых будет зависеть перемещение инструмента. В случае осадки надо выбрать молот и задать энергию удара (в Н\*мм), коэффициент полезного действия (эффективность удара) и массу падающих частей, которую в  $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{мм}$  (в которой ведутся измерения в программе) можно перевести из тонн с помощью специального встроенного конвертера  .

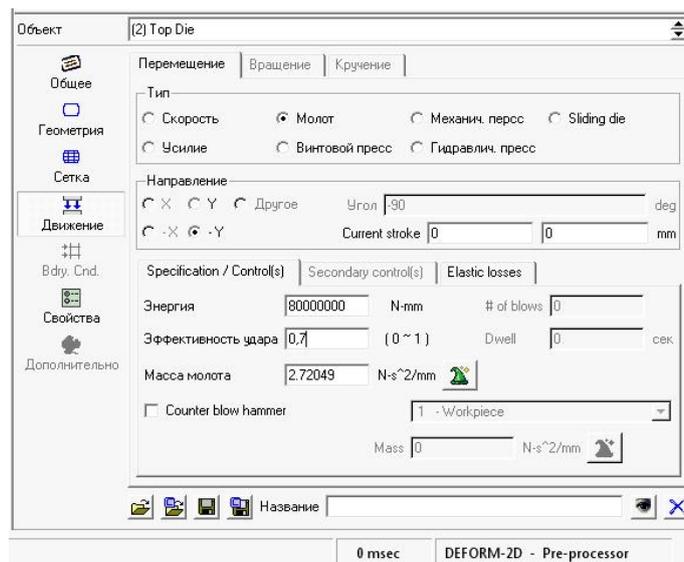


Рис. 22. Создание условия движения инструмента.

Следует вернуться в раздел настроек симуляции и обозначить шаг, с которым будут сохраняться данные. Процесс осадки под молотом происходит очень быстро и программа сама остановит процесс, когда энергия удара будет исчерпана. Количество шагов расчёта влияет на результат. Чем больше шагов, тем будет точнее расчёт. Если время контакта неизвестно, то лучше задавать расчёт по смещению. Но эмпирически известно, что при осадке время контакта составляет порядка 0,01 секунды, соответственно можно выбрать посекундный расчёт с шагом в 0,001 ... 0,0001 секунды. Температура будет высчитываться по каждому шагу автоматически вместе с деформацией.

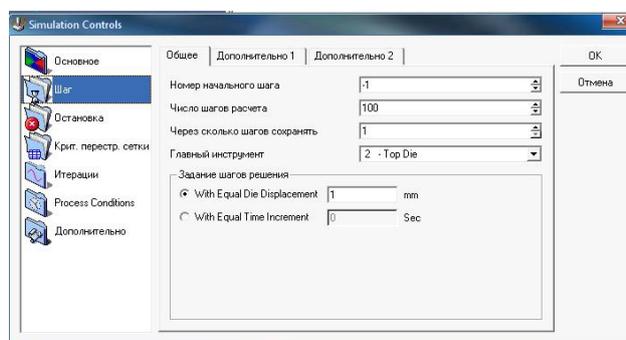


Рис. 23. Задание шага исчисления.

После чего всё готово к созданию так называемой *базы данных*. В файле \*.db хранятся все исходные данные, а так же результаты предыдущих расчётов. В дальнейшем можно будет открывать базу данных с любого шага.

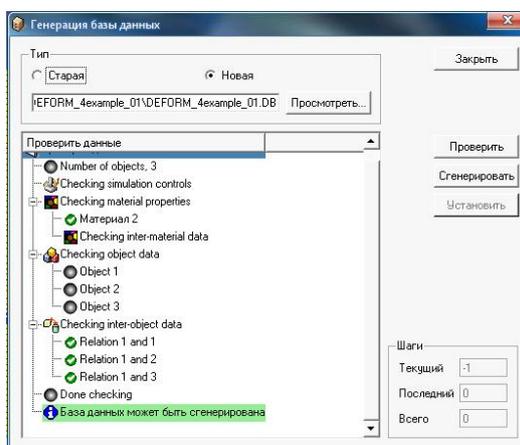


Рис. 24. Создание базы данных для расчета процесса.

Когда база сгенерирована, можно закрыть препроцессор Deform 2D. Сохранения работы не требуется, поскольку все необходимые и достаточные данные для расчета находится в базе данных. Для того чтобы запустить выполнение симуляции надо в главном окне программы в подменю *simulation* выбрать *start (start)*. После того, как расчёт будет закончен можно зайти в *post-processor*.

### 3.1.3 Исследование результатов осадки в Deform 2D

Все операции связанные с анализом моделей происходит в постпроцессоре.

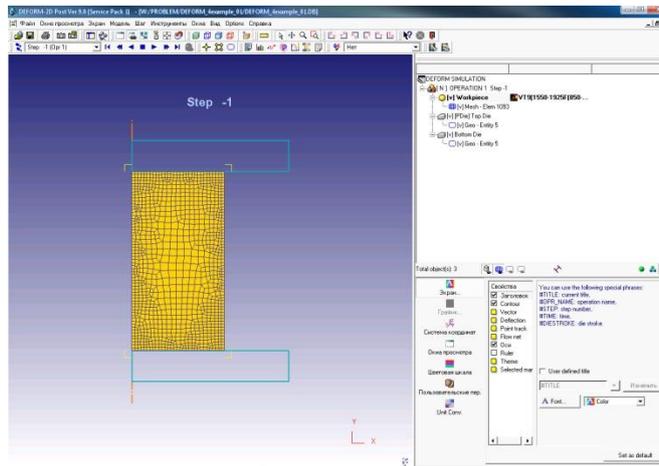


Рис. 25. Окно постпроцессора.

Выбрав любой из режимов просмотра  Нет  можно сразу получить картину не только качественного, но и количественного распределения параметра. На изделии (рис 26) треугольником отмечается место с минимальным значением параметра, а квадратом – максимальное. Для того, чтобы узнать значение в конкретной точке надо просто «кликнуть» по нему левой кнопкой мыши.

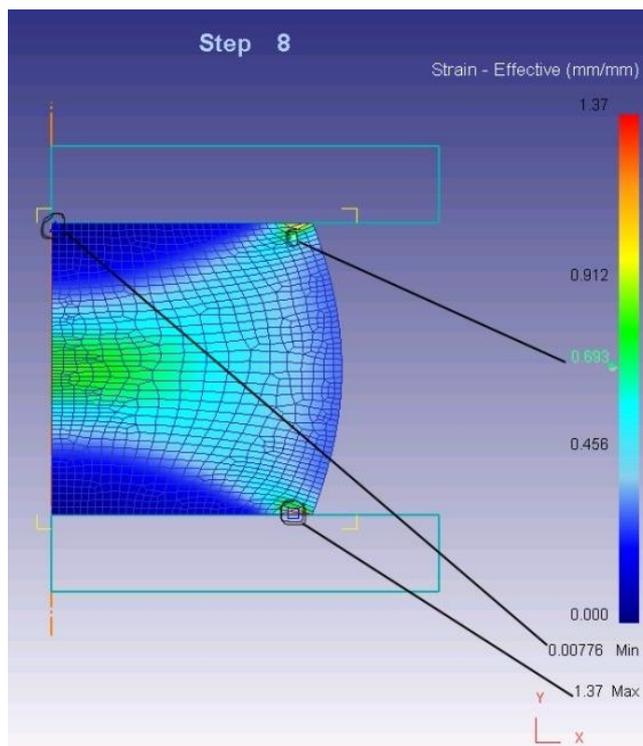


Рис. 26. Визуальный анализ параметра. Напряжение.

На рисунке чётко различимы зоны интенсивной деформации и зоны затруднённой деформации. Их описание было приведено выше. Распределение температур происходит аналогично распределению напряжений.

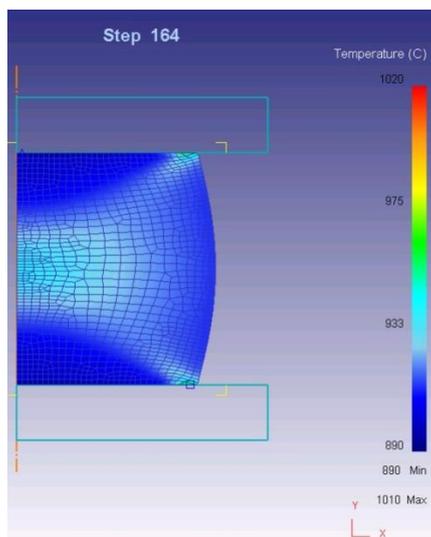


Рис. 27. Зоны деформации на графике температуры.

Другой инструмент, который достаточно часто необходим - линейка (  ). Достаточно нажать на начальную и конечную точки, между которыми необходимо найти расстояние. Известно, что высота заготовки перед прошивкой должна быть меньше, поэтому необходимо подсадить заготовку.

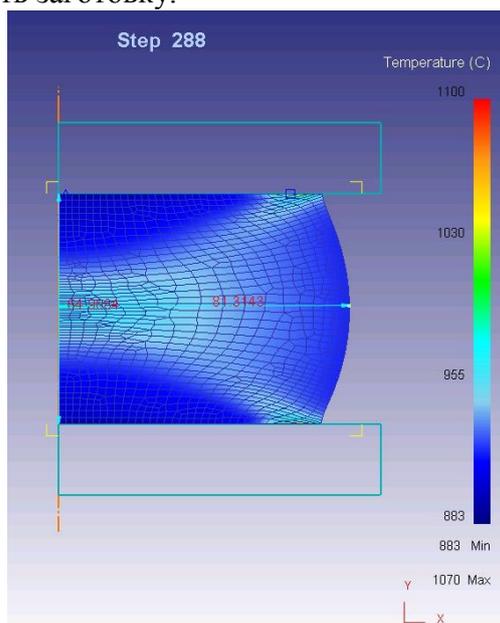


Рис. 28. Замер размеров заготовки после осаживания.

Условия до деформации и после можно ввести в общую таблицу.

Таблица 4. Результаты измерения параметров заготовки в течении процесса осадки.

Параметр	До осадки	После осадки	После подсадки
Высота заготовки	115	84	65
Радиус заготовки	59	71	81
Температура заготовки	900	890-1010	883-1070
Температура инструмента	400	Const	const

Однако некоторые данные касающиеся температуры могут ввести в заблуждение, поэтому рассмотрим динамику процесса при помощи point tracker – отслеживания точек (рис 29). Возьмём несколько точек.

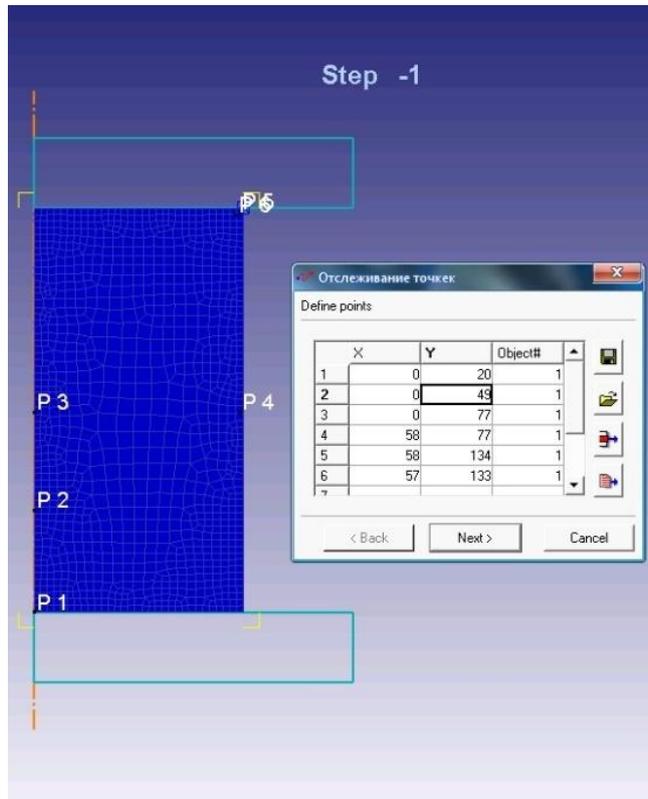


Рис. 30. Отслеживание динамики изменения параметра в нескольких точках: 1 – в зоне I, 2 – между I и II зонами, 3 – в зоне II, 4 – в III зоне, 5 – в зоне интенсивного нагрева, 6 – соседняя с ней точка.

Получаем следующую динамику:

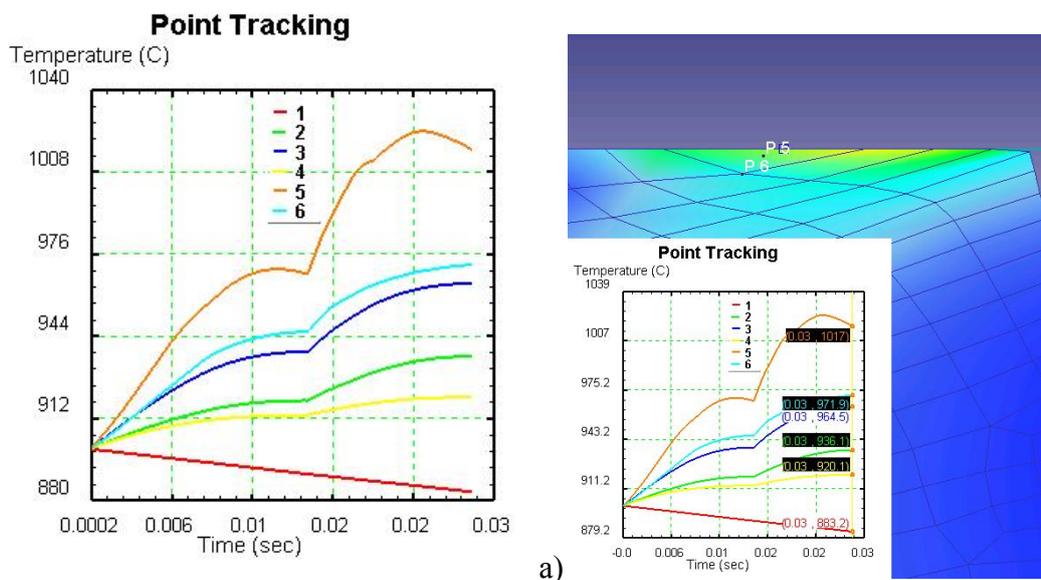


Рис. 31. Динамика изменения температуры – а) график зависимости температуры от времени для шести вышеописанных точек; б) зона с максимальным значением температуры.

Таким образом получаем зависимости параметра от времени, например температуры (t, сек; T, C). Во вкладке график  График... можно настроить вид отображения. Например, будет удобнее, если температура будет выводиться до четвёрной значащей цифры, а время до первой (X-axis или Y-axis => Value => significant) по умолчанию – до третьего.

Стоит обратить внимание на то, что на расстоянии 0,75мм от точки с температурой 1070С находится точка с температурой 1017С, а в 1,75мм – с 972С. Быстрое охлаждение обуславливается контактом с инструментом.

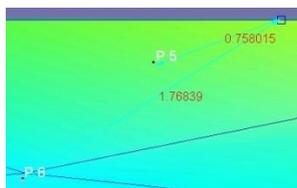


Рис. 32. Замер расстояния между точками 5 и 6.

Таким образом с некоторым допущением можно сказать, что температурный интервал 850-1050 С не был нарушен.

#### Определение деформаций.

Узнать схему перемещения слоёв можно по кнопке  flow net (рис 56). В диалоговом окне надо отметить первый и последний шаг расчёта течения. Далее вводятся параметры сетки, сначала её форма и границы (если границы не установлены, то берётся весь объём).

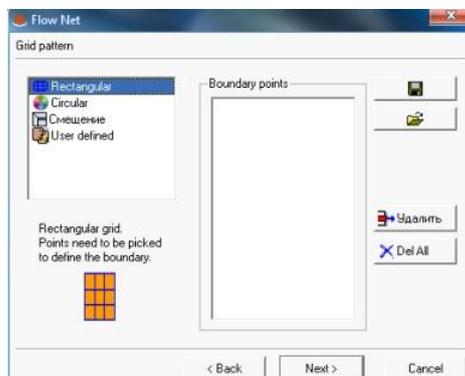


Рис. 33. Создание сетки течения материала.

Затем количество слоёв по всем координатам. Можно выбрать как делением на N равных частей, так и с определённым шагом. В зависимости от операции их количество может варьироваться. Нагляднее при осадке будет взять 3 части по X и 5 частей по Y. Нажав по клавише «просмотр», можно будет сделать обзор сетки. Единственным необходимым условием создания сетки является удобство её исследования.

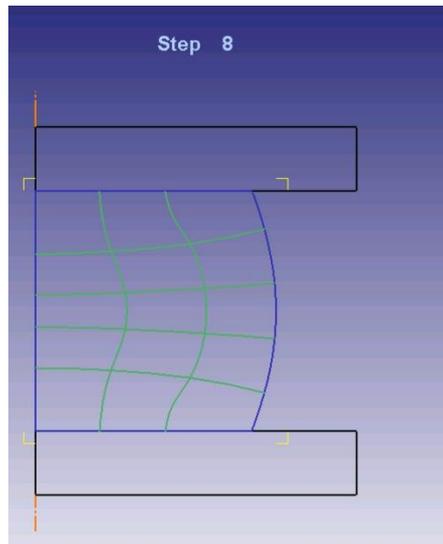


Рис. 34. Сетка течения материала.

По тому, как изменились границы сетки можно легко определить течение металла и деформированное состояние.

#### Выводы по осадке

В ходе осадки не было выхода за пределы температурно-деформационного режима, осадка произведена за два удара. Максимальная температура наблюдается на радиусе заготовки в зоне контакта с инструментом. Это объясняется большими величинами трения скольжения. Минимальная температура на оси заготовки в зоне контакта с инструментом, что в свою очередь объясняется тем, что перемещения соответствующей зоны относительно инструмента, а следовательно и трения между ними минимальны, либо отсутствуют. Моделирование подтвердило распределение зон в заготовке.

## Прошивка

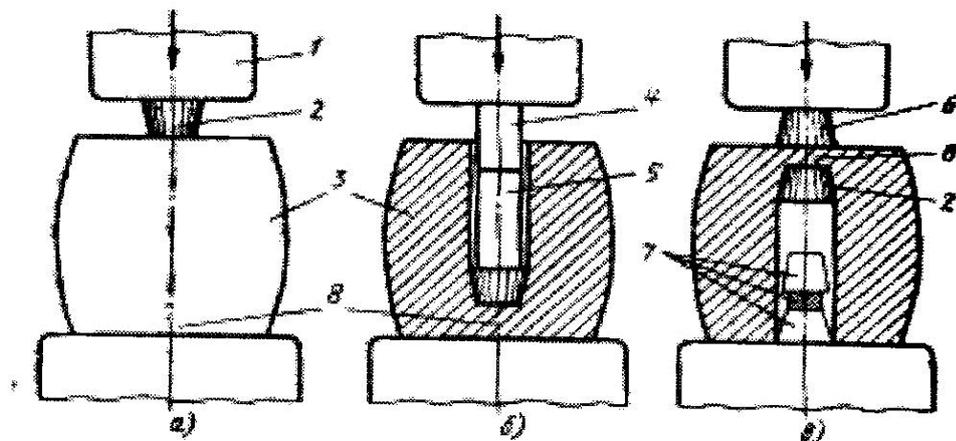


Рис. 35. Схема прошивки без подкладного кольца. а — в — этапы прошивки; 1 — верхний боек, 2 — сплошной прошивень, 3 — заготовка, 4 и 5 — надставки, 6 — прорезной прошивень, 7 — прошивки и отход металла после прошивки, 8 — прибыльная сторона слитка.

На первом этапе прошивень вдавливается в заготовку на небольшую величину, затем приподнимается, под него подкладывается смазка. На втором этапе с помощью надставки прошивень вдавливается до  $h=0,2H_0$ .

На третьем этапе заготовка переворачивается, на подкладном кольце прошивается остаточное доньшко (выдра).

При краевых условиях  $x=R_1$ ;  $\sigma_1=\sigma_s$ ;  $h=h_1$  вертикальное напряжение  $\sigma_1$  при прошивке определяется следующей формулой:

$$\sigma_1 = \sigma_s [2(K \operatorname{tg} \alpha + \mu) \left( \frac{R_n}{h_1} - \frac{x}{h} \right) + 1],$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести при заданных температурно-скоростных условиях;  $h$  – высота заготовки после осаживания;  $R_0$  – внешний радиус заготовки до деформации;  $R_n$  – прошиваемый радиус;  $K$  – коэффициент, учитывающий анизотропию,  $\mu$  – коэффициент трения.

Зная  $\sigma_1$  можно определить усилие прошивки  $P_{np}$  [1]

$$P_{np} = \pi R_n^2 \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 \right)$$

Отсюда напряжение прошивки:

$$\sigma_{np} = \frac{P_{np}}{\pi R_1^2} = \sigma \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_n}{3h_1} + 1 \right)$$

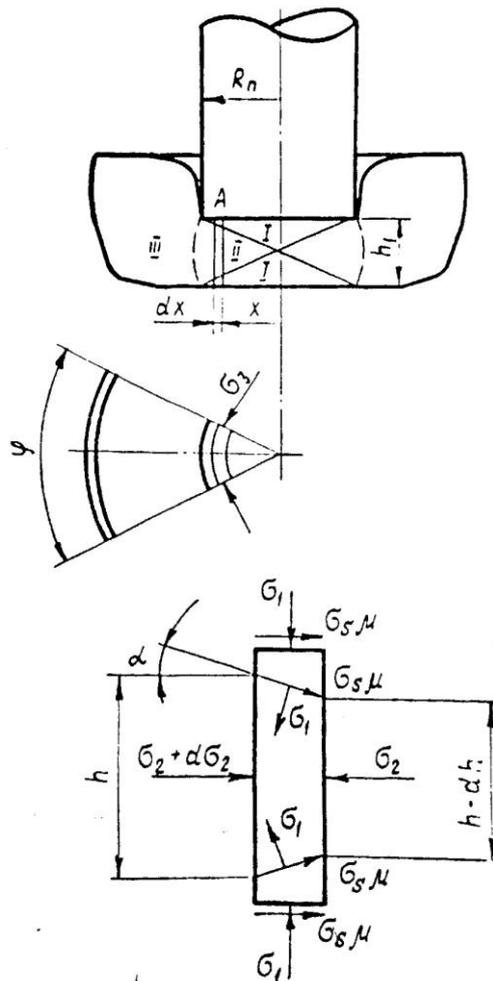


Рис. 36. Модель очага деформации при процессе прошивки [1]

Рабочее напряжение  $\sigma_p$ , равное сумме напряжения прошивки  $\sigma_{oc}$  и величины тангенциального растяжения третьей зоны, определяется по следующей формуле [2]:

$$\sigma_p = \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 + 1,1 \ln \frac{R_1}{R_n} \right)$$

Полное усилие прошивки заготовки:

$$P = \pi R_n^2 \sigma_p$$

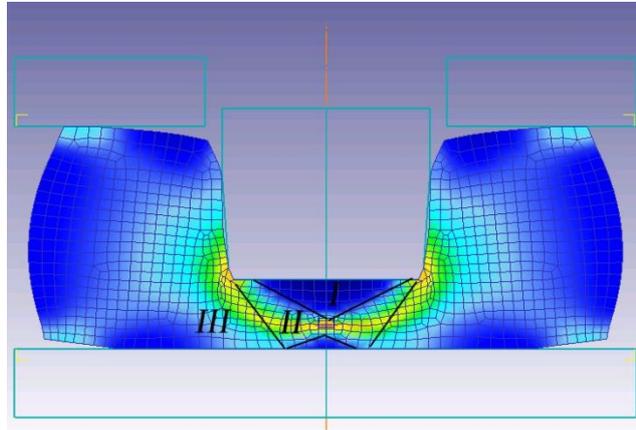


Рис. 37. Прошивка, смоделированная в Deform 2d. Зоны деформации: I – затруднённая; II – интенсивная; III – затруднённая.

Зоны и напряжённое состояние при прошивке полностью аналогичны зонам при осадке.

Обычно перед прошивкой осуществляют процесса подсадки. Это необходимо если в результате осадки добиться необходимой высоты заготовки не удалось.

При краевых условиях  $x=R_1$ ;  $\sigma_l = \sigma_s$ ;  $h=h_l$  вертикальное напряжение  $\sigma_1$  при подсадке определяется следующей формулой:

$$\sigma_1 = 2\sigma_s \left[ (K \operatorname{tg} \alpha + \mu) \left( \frac{R_1}{h_1} - \frac{x}{h} \right) + 1 \right],$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести при заданных температурно-скоростных условиях;  $h$  – высота заготовки после осаживания;  $R_0$  – внешний радиус заготовки до деформации;  $R_1$  – внешний радиус заготовки после деформации;  $K$  – коэффициент, учитывающий анизотропию,  $\mu$  – коэффициент трения.

Зная  $\sigma_1$  можно определить усилие подсаживания  $P_{oc}$  [2м]

$$P_{oc} = \pi R_1^2 \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 \right)$$

Отсюда напряжение подсаживания:

$$\sigma_{oc} = \frac{P_{oc}}{\pi R_1^2} = \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 \right)$$

Рабочее напряжение  $\sigma_p$ , равное сумме напряжения осаживания  $\sigma_{oc}$  и величины тангенциального растяжения третьей зоны, определяется по следующей формуле [1]:

$$\sigma_p = \sigma_s \left( \frac{K}{3} + \frac{2\mu R_1}{3h_1} + 1 + 1,1 \ln \frac{R_1}{R_0} \right)$$

Полное усилие подсаживания заготовки:

$$P = \pi (R_1^2 - r_1^2) \sigma_p$$

На рис. 1 показаны зоны деформации для трех операций, из которых видно, что они являются аналогичными. Следовательно, течение металла в очаге деформации в рассмотренных процессах подчиняется общим закономерностям.

### 3.2.2 Прошивка в Deform 2D

Также выполняется в программе Deform 2D, причём в качестве заготовки берут изделие, полученное в предыдущем процессе осадки. Первоначально стоит произвести подсадку заготовки до получения необходимой толщины. Это зависит от выбранного оборудования.

Можно считать, что прошивка – это локальная осадка, поэтому можно проводить множество параллелей с предыдущим процессом.

В пре-процессоре надо открыть последний шаг задачи с осадкой. Затем стоит задать геометрию прошивня во вкладке edit.

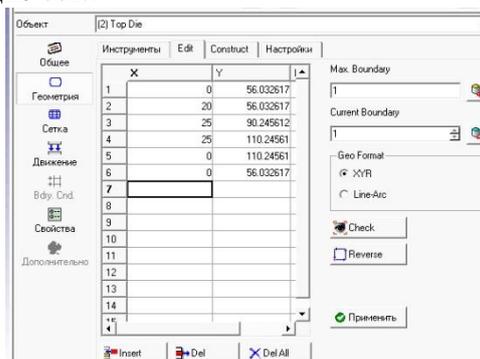


Рис. 38. Редактор геометрии объектов.

Форматом вычисления геометрии лучше оставить систему координат XYR, т.е. задание через точки, соединённые линиями и радиуса скруглений. Однако, если это будет удобней можно использовать систему линий и дуг.

Возможно, пригодится дополнительный элемент оснастки, прижим, во избежание коробления (рис 38). Прижим создаётся и позиционируется аналогично верхней плите при осадке, с той лишь разницей, что не задаётся движение.

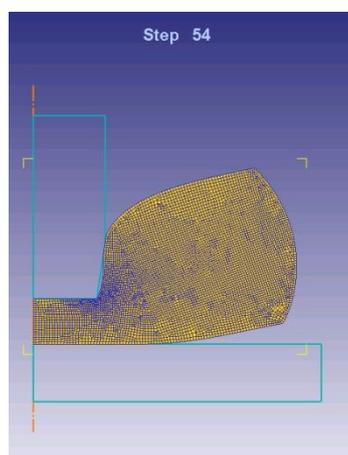


Рис.39. Прошивка, смоделированная без прижима.

В целом симуляция прошивки мало чем принципиально отличается от осадки. При подготовке процесса стоит лишь учесть, что сетка должна иметь большее число элементов, чем при осадке. Взаимодействие прижима и заготовки задаётся алогично взаимодействию с инструментом.

Глубина проникновения прошивня – 42мм (2/3 высоты заготовки).

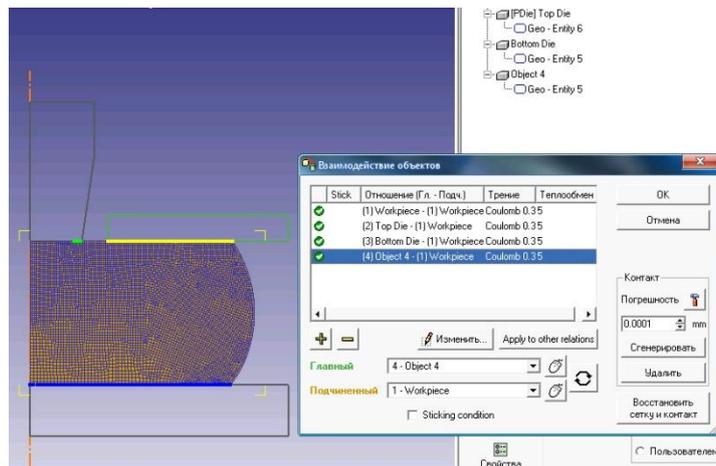


Рис. 40. Создание взаимодействия объектов при прошивке.

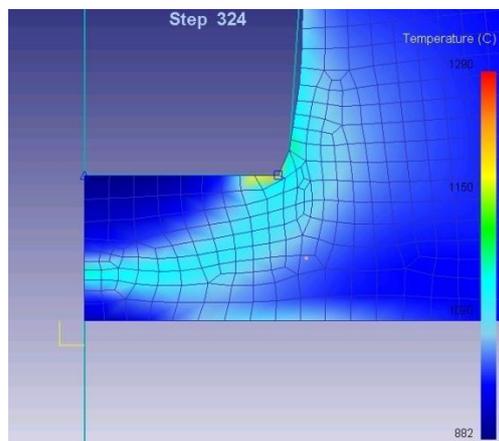


Рис. 41. Зона интенсивной деформации при прошивке.

Во время прошивки трение между прошивком и заготовкой велики, вследствие чего идет интенсивный разогрев заготовки. Не редко температурный режим в при контактных зонах нарушается. Для определения значений температуры, а также динамики разогрева возьмём четыре точки на последнем шаге первой стадии прошивки.



Рис. 42. Создание точек для отслеживания параметров. Первая точка находится на оси заготовки в месте контакта с прошивком, вторая – на скруглении прошивня, третья и четвёртая отстоят от первой и второй соответственно на 1мм.

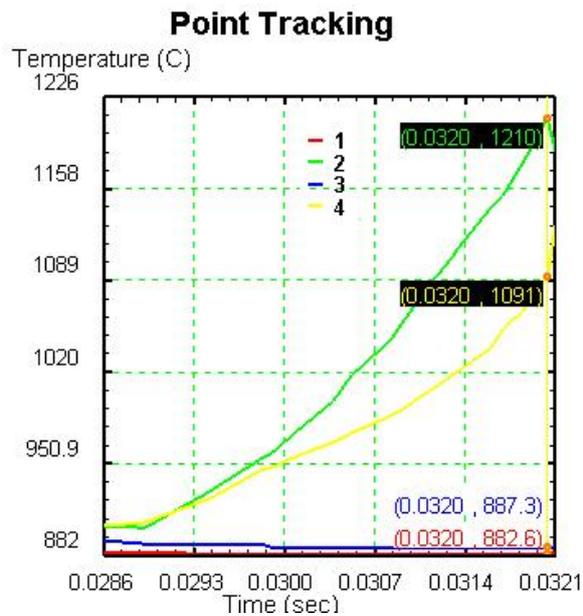


Рис. 43. График изменения динамики температуры в точках описанных на рис.42.

Можно заметить, что в зоне скругления прошивня нагрев наиболее интенсивен и температура в приконтактной зоне значительно превышает температурный диапазон, однако уже на расстоянии 1 мм, в пределах очага деформации температура ненамного превышает режим.

Следующим этапом заготовка кантуется на 180° и операция повторяется. Для того, чтобы перевернуть заготовку надо в меню 'позиционирования' выбрать раздел 'перевернуть'. Переворот заготовки будет осуществляться вокруг *оси X*. После того, как заготовка будет перекантована на 180°, необходимо заново позиционировать относительно неё прошивень в закладке 'интерференция'.

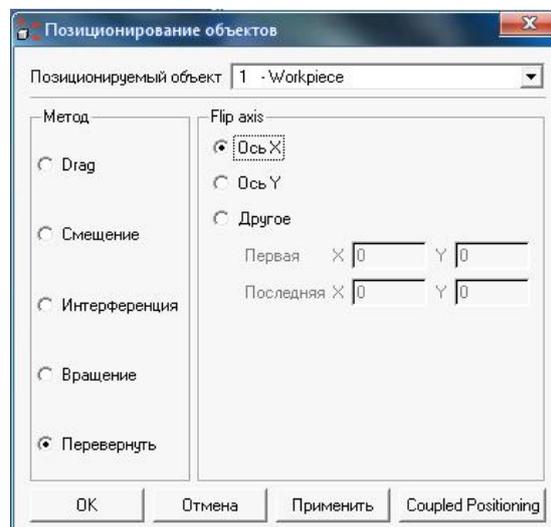


Рис.44. Моделирование кантования заготовки.

После этого проверяются взаимодействия, и выставляется ещё несколько шагов процесса. В результате чего на определённом шаге (в зависимости от силовых параметров) должна получится следующая картина:

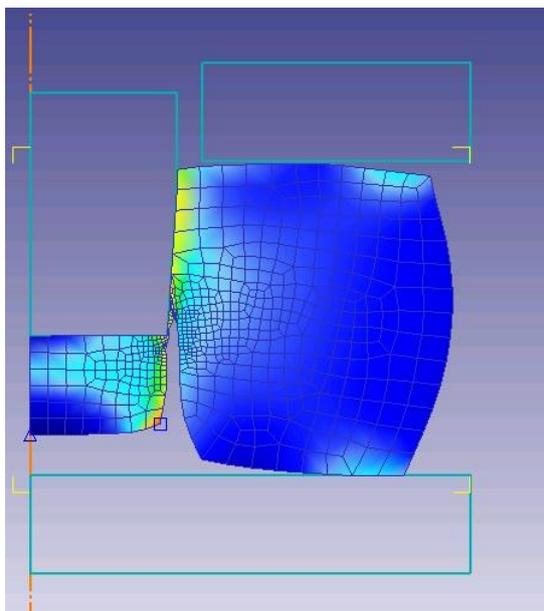


Рис. 45. Результат моделирования прошивки.

Здесь имеется возможность рассчитать объём выдры, с допущением формы. Температуры в приконтактных зонах можно исследовать аналогично первому этапу прошивки.

Как и при осадке, можно провести сетку, для определения деформаций в различных зонах (рис. 69). Можно заметить определённые сходства очагов деформации при осадки и прошивки, и доказать, что прошивку можно рассмотреть с позиции частного случая осадки.

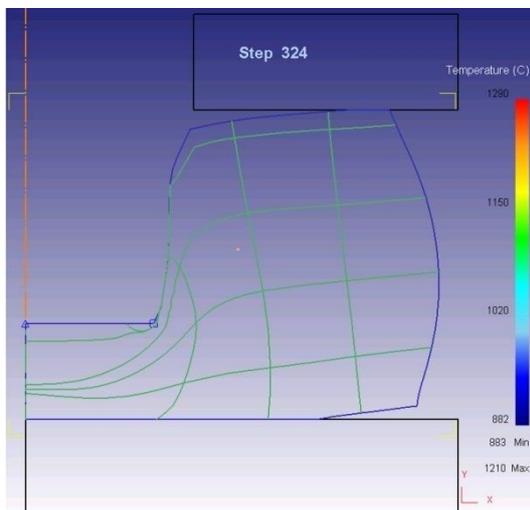


Рис. 46. Сетка течения метариала.

Если разгонку планирует вести из изделия, полученного в процессе прошивки, то надо взять его геометрию. Для этого в препроцессоре Deform на последнем шаге прошивки во вкладке 'геометрия' надо нажать 'savegeo'  и указать путь и название файла. Важно, чтобы название было прописано латиницей, поскольку deform не распознаёт кириллический алфавит.

## Выводы по прошивке

В ходе прошивки температура в приконтактной с инструментом зоне выходила за пределы температурно-деформационного режима, однако, уже на расстоянии в 1мм от зоны с максимальной температуры режим в пределах нормы. Максимальная температура наблюдается в зоне контакта с радиусным закруглением прошивня. Это, как и при осадке происходит в виду больших величин трения. Минимальная температура, как и при осадки на оси заготовки в зоне контакта с инструментом. Моделирование также подтвердило распределение зон в заготовке.

## РАЗГОНКА

*Раскатка на цилиндрической оправке (разгонка)*

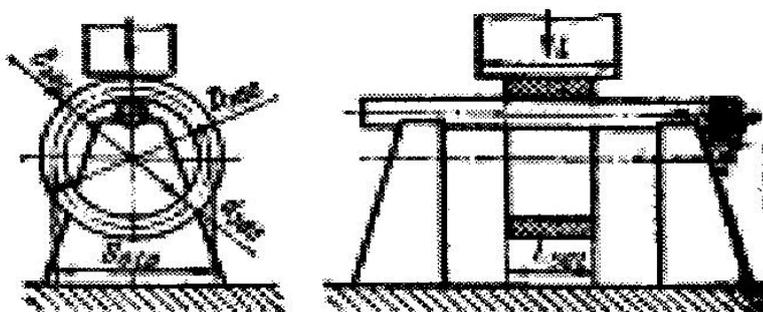


Рис. 47. Схема разгонки.

Разгонка применяется для получения колец с большим диаметром и тонкой стенкой поковки. В процессе оправки ширина профиля кольца изменяется незначительно.

Т.к. процесс разгонки похож на процесс протяжки на молоте, то в общем случае разгонку можно представить, как последовательную осадку смежных участков заготовки.

Для граничных условий  $z=0,5l_0$ ;  $\sigma_p = -\sigma_s$  нормальное напряжение определяется по формуле [13]:

$$\sigma_p = \sigma_\theta = -\sigma_s \left[ 1 + \frac{4\mu}{hl_0} \left( \frac{l_0^2}{4} - z^2 \right) \right],$$

где  $l_0$  — величина подачи,  $h$  — высота заготовки,  $\mu$  — коэффициент трения.

Удельное усилие реформирования при протяжке определяется по следующей формуле [13]:

$$p = \sigma_s^* \left( 1 + \frac{\mu l_0}{3h} \right)$$

### *Разгонка в Deform 3D*

В Deform 3D создаётся новая задача. Будет использоваться обычный пре-процессордеформа. Это делается аналогично процессам в Deform 2D. Создаётся название процесса и место его локации (лучше оставить по умолчанию).

Создаются заготовка и оправка.

Заготовкой послужит изделие, полученное при прошивке. Если заготовка сохранена в \*.GEO, то любая попытка открыть её в 3D закончится сообщением , поскольку не смотря на общее название расширения геометрия в формате \*.geo задаётся в 2D и 3D абсолютно по-разному.

Для импорта геометрии из deform 2D необходимо во вкладке ‘геометрия’ для заготовки сохранить её  в формате \*.igs. Далее в Deform 3D для заготовки пройти по той-же вкладке геометрия к ‘геометрическим примитивам’.

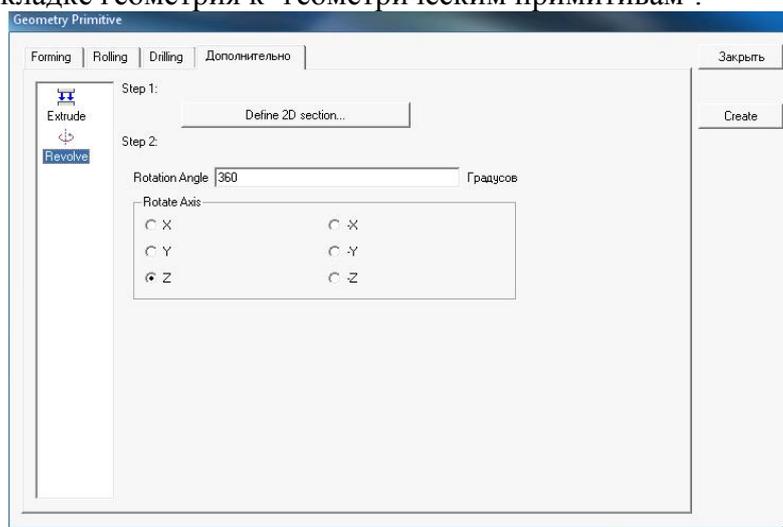


Рис. 48. Окно создания 3D модели путём вращения двухмерного профиля вокруг оси Z.

В подразделе ‘дополнительно’ есть всё для того, чтобы двух мерный профиль сделать трёх мерным. В нашем случае по кнопке define 2Dsection найти сохранённый файл \*.igs. Затем выбрать вращение – revolve (поскольку наша заготовка является телом вращения) и угол на который будет происходить вращение (в нашем случае это полная окружность - 360). Далее надо выбрать ось, вокруг которой будет происходить вращение, в нашем случае это ось Z. И остаётся лишь нажать create (создать).

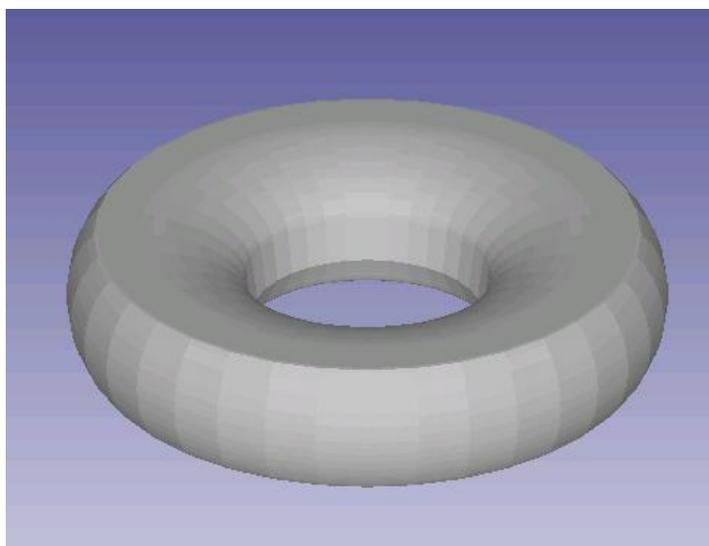


Рис. 49. Заготовка для разгонки.

После этого создаётся инструмент. Это можно сделать при помощи геометрических примитивов.

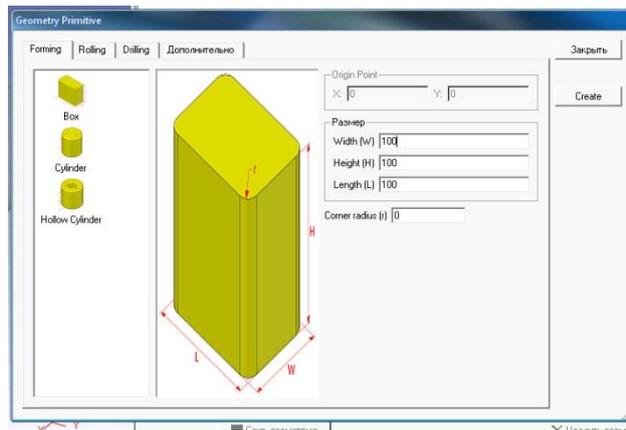


Рис. 50. Создание трёхмерной геометрии при помощи примитивов.

Далее необходимо позиционировать объекты. Инструмент надо сместить по оси  $Z$  до достижения симметричности относительно заготовки. Во вкладке «уложить» (*drop*) происходит моделирование движения до препятствия. Поэтому надо во вкладке *Drag* отвести мышью верхний инструмент выше заготовки, и «уложить» по оси  $-Y$  его. То же проделать с нижним инструментом, но в направлении  $+Y$ .

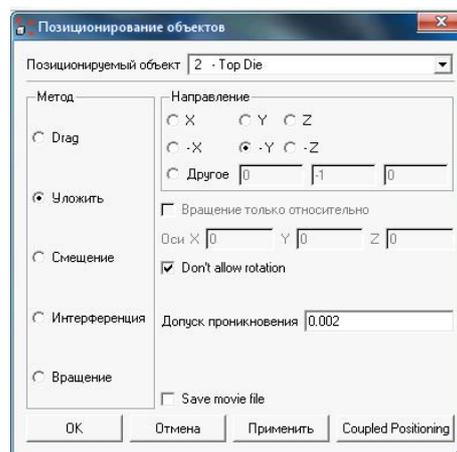


Рис. 51. Позиционирование трёхмерных объектов «по касанию».

Могут понадобиться опорные валки. Они создаются и позиционируются аналогично другому инструменту. Теперь необходимо создать взаимодействие объектов. Это делается аналогично двух мерным моделям.

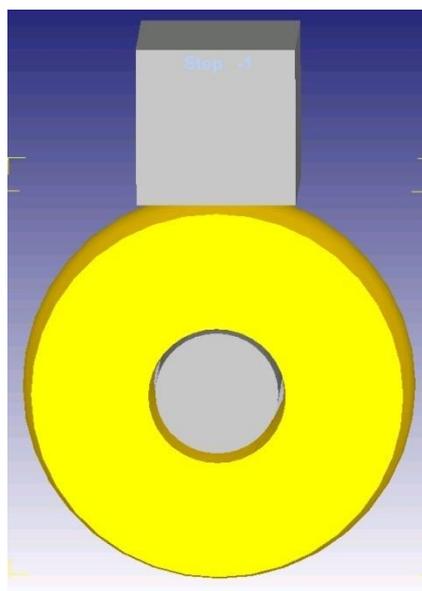


Рис. 52. Инструмент и заготовка перед разгонкой.

Температура заготовки не переносится из 2D в 3D, и все данные о предыдущих деформациях невозможно перенести в Deform 3D, в котором будет моделироваться раскатка и разгонка, из Deform 2D, в котором производилась осадка и прошивка. Однако можно условиться, что заготовка подогревается между переходами и её температура вновь будет 900С. Она задаётся во вкладке ‘*общее*’, как и также материал заготовки. Далее создаётся сетка, единственным её отличием от двухмерной графики будет пирамидальная

форма элементов заготовки  .

Самым существенным отличием разгонки от осадки и прошивки в Deform 3D будет задание перемещений. Движение задавать значительно удобнее при помощи цикла движений.

Таблица 5. Пример алгоритма движения инструмента при разгонке:

Время, сек	Поступательное движение верхнего молота	Вращательное движение валка
0	пауза	Пауза
0.2	прямой рабочий ход	-
0.4	обратный холостой ход	-
0.6	-	вращение по ч.с
0.8	-	-
1.0	холостой и рабочий ход	-
1.2	обратный холостой ход	-
1.4	-	вращение по ч.с.
..	..	..

В начале цикла, из исходной позиции – заготовка в контакте с молотом и валком – молот движется равноускоренно вниз (задать движение как «молот» не получится, поскольку обратный ход будет иметь иную зависимость), вращения валков в этот момент не происходит. На следующем этапе, молот замедляется и начинает обратный холостой ход, вращения валков также не происходит. Когда молот поднят над заготовкой и начинает замедлять движение валки начинают вращательное движение, тем самым

поворачивая заготовку на необходимый угол. После того как вращательное движение завершится цикл повторяется вновь.

Для того чтобы программа работала корректно необходимо выставить локальное время на нулевую секунду (если это первый шаг, то глобальное и локальное время будет 0 сек).

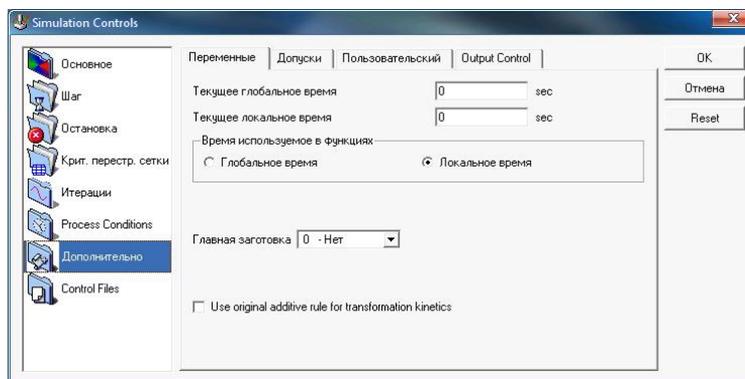


Рис. 53. Окно установки отсчёта «глобального» и «локального» времени.

Впрочем, этого можно и не делать, но тогда в графиках надо будет постоянно учитывать глобальное время, что не всегда удобно.

Для задания движения молота во вкладке «движение» надо выбрать «функция от времени» и определить функцию. Примером может служить следующее движение:

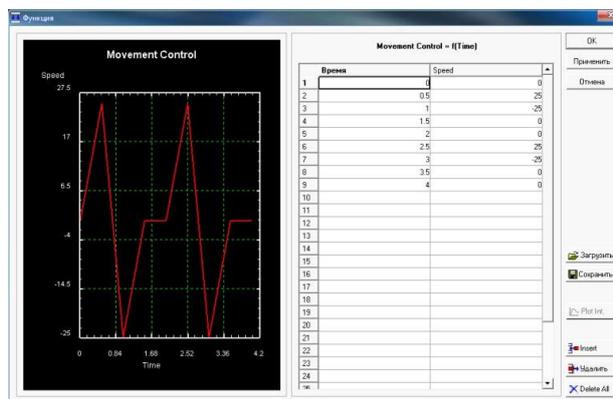
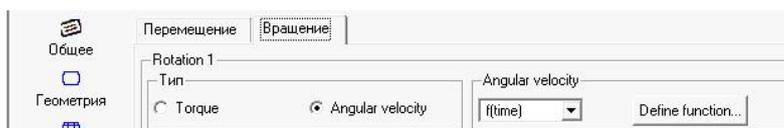


Рис.54. Цикл движения бойка.

Для задания движения валкам во вкладке «движение» надо выбрать вращательное движение с исчислением от угла поворота в радианах и также выбрать «функция от времени» и определится функцию.



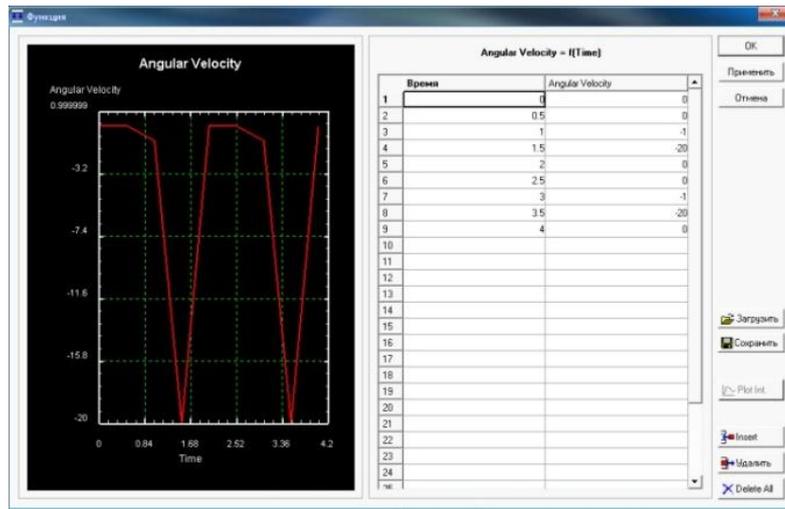


Рис. 55. Цикл вращения ролика.

Важно, чтобы по время рабочего хода молота не происходило вращения, а также вращение дополнительных валков и главного были разнонаправленными. Количество циклов в примере сокращено, но на деле их значительно больше.

### 3.3.3 Анализ разгонки в Deform 3D

В результате раскатки получается кольцо с неровными гранями. Огранка будет впоследствии исправлена в ящичном калибре при раскатке.

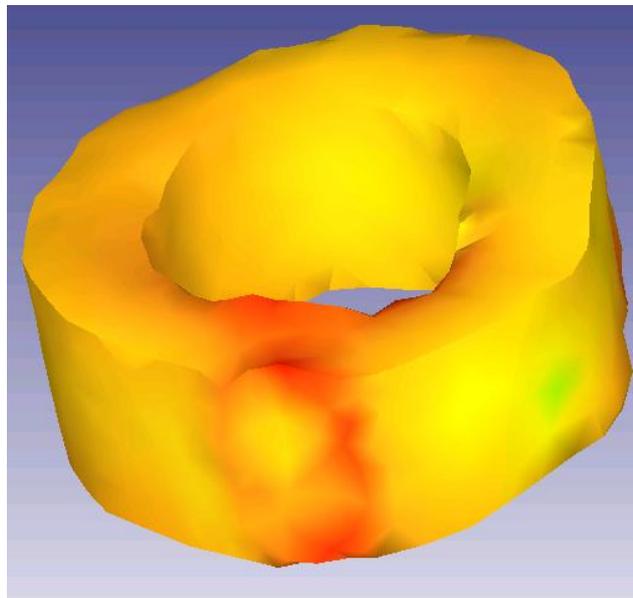


Рис. 56. Распределение температуры на заготовке после разгонки. Температурный режим выдержан (Тзаг – 858-975С).

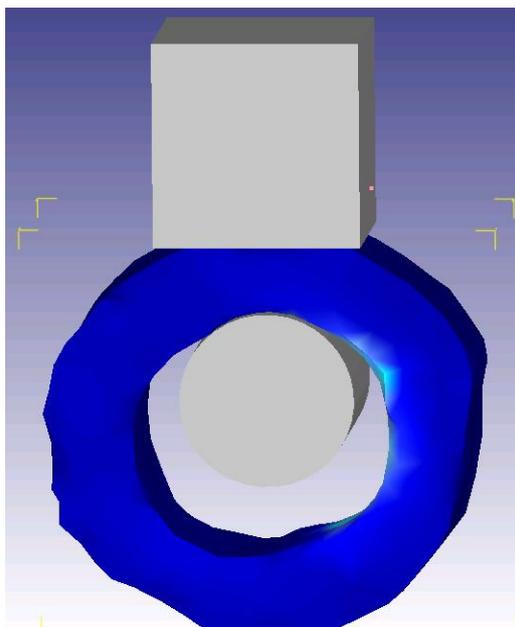


Рис. 57. Распределение деформаций после разгонки.

Деформации менее отчётливо видны, чем при осадке и прошивке, однако можно различить зоны затруднённой деформации у границы контакта с инструментом, а также дугу границы входа в очаг деформации.

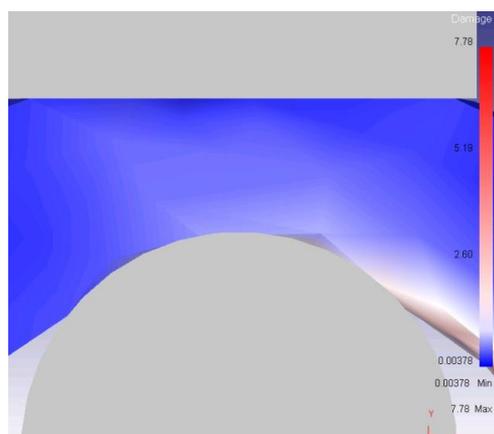


Рис.58. Распределение деформаций в ходе разгонки.

Распределение температуры происходит по тем же закономерностям. Ввиду постоянного движения захолаживания в зоне деформации не происходит. По той же причине температурный режим выдержан и по всему объёму заготовки, т.е. она не успевает остыть, что снимает необходимость в дополнительных подогревах в ходе течения процесса.

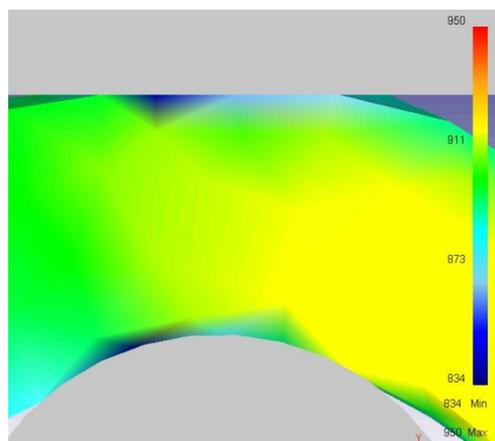


Рис. 59. Распределение температуры в ходе разгонки.

### 3.3.4 Выводы по разгонке

В ходе разгонки не было значительного выхода за пределы температурно-деформационного режима. В конце процесса минимальная температура составляла 812С, а максимальная 949С. Время процесса составило 126.4 секунды, при этом было совершено 100 циклов, а заготовка прошла два оборота.

### 3.4. Отчет о проделанной работе

Отчет должен содержать:

1. Схемы всех операций ковки тонкостенного кольца;
2. Все необходимые расчеты;
3. Таблицу сводных результатов исследования;
4. График изменения коэффициента уширения в зависимости от степени деформации (при наличии данных);
5. Выводы о работе.

### Лабораторная работа № 2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОТЯЖКЕ ПОД ПЛОСКИМИ БОЙКАМИ

Цель работы: экспериментальное исследование закономерностей изменения размеров заготовки при протяжке под плоскими бойками в зависимости от основных технологических параметров процесса; ознакомление с методикой расчета технологического процесса.

Задания:

Определить численные значения и проанализировать закономерности изменения коэффициента интенсивности уширения заготовки при протяжке в зависимости от следующих параметров процесса:

- относительной подачи ( $\Psi = \frac{l_0}{B_0} = 0,53$ );
- относительной степени деформации ( $\varepsilon_{OH} = \frac{H_0 - H_K}{H_0} = 0,1 \dots 0,7$ );
- относительных размеров полосы ( $m = \frac{H_0}{B_0} = 12,5$ );
- коэффициента контактного трения ( $\mu = 0,20,5$ ).

Вид параметра или комбинация параметров и диапазоны их изменения задаются преподавателем.

2. Рассчитать размеры заготовки после первого прохода для произвольных параметров технологического процесса, заданных преподавателем в пределах их варьирования. Расчеты проверить экспериментально.

## 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ ПРОТЯЖКИ

Протяжка (вытяжка) - технологическая операция, которая применяется для увеличения длины заготовки за счет уменьшения ее поперечного сечения. Протяжка является одной из основных операции 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 (рис. 1). После первого прохода заготовку кантуют на  $90^\circ$  и выполняют второй проход.

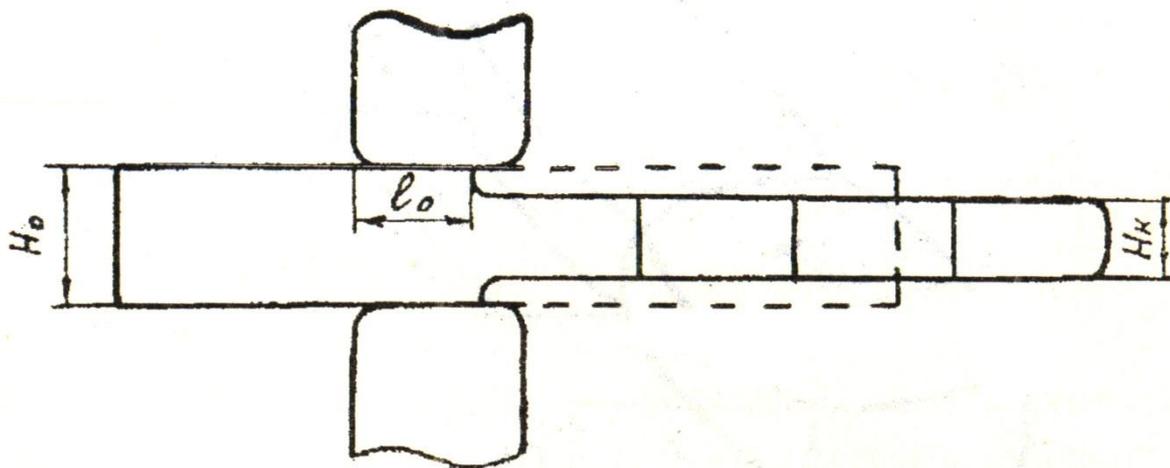


Рис. 1. Схема протяжки

После каждого прохода заготовка приобретает сложную конфигурацию за счет бочкообразования по высоте и длине заготовки (рис. 2).

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:  $B_{cp} = V_K / l_K H_K$ .

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 ( $\epsilon_{OH}$ ) в каждом проходе связано с опасностью потери устойчивости заготовки после кантовки (рис.3). Для предотвращения этого явления необходимо соблюдать следующие условия:  $\varphi = B_K / H_K \leq 2,5$ . Величина  $\varphi$  называется коэффициентом перехода.

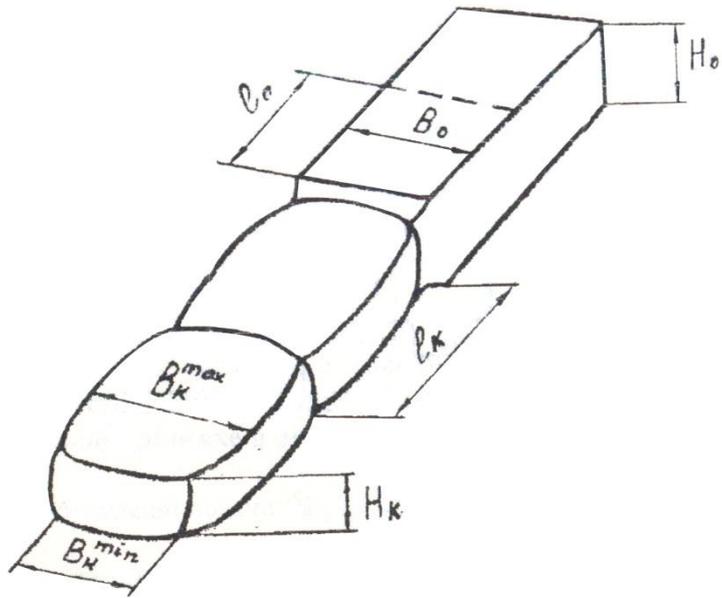


Рис. 2. Размеры заготовки после первого прохода

Рассмотрим поперечное сечение заготовки в момент окончания очередного обжатия (рис. 4). 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  $F_{III} + F_{IV} = f F_I$  действительно при условии:  $f < 1$ . Перепишем это равенство с учетом линейных размеров заготовки:

$$(B_k - B_0)H_k = f(H_0 - H_k)B_0, \quad (1)$$

откуда

$$f = \frac{(B_k - B_0)H_k}{(H_0 - H_k)B_0} = \frac{\varepsilon_{OB}}{\varepsilon_{KH}} < 1, \quad (2)$$

где  $f$  - коэффициент интенсивности уширения.

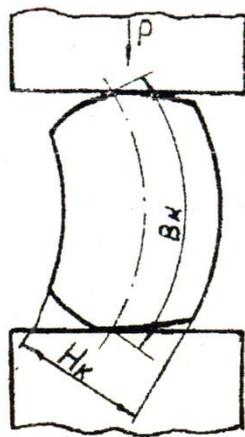


Рис. 3. Схема потери устойчивости заготовки после кантовки

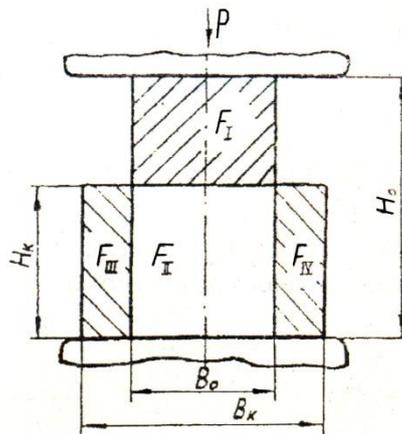


Рис. 4. Изменение поперечного сечения заготовки при протяжке

После преобразования уравнения (1) получим

$$F_k = F_0[1 - \varepsilon_{OH}(1 - f)], \quad (3)$$

где  $F_0$  - площадь поперечного сечения заготовки до протяжки. Коэффициент уковки по длине заготовки будет равен:

$$K_L = \frac{F_O}{F_K} = \frac{1}{1 - \varepsilon_{OH}(1-f)}. \quad (4)$$

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

$$q = \frac{(l_K - l_O)H_K}{(H_O - H_K)l_O} = \frac{\varepsilon_{OL}}{\varepsilon_{KH}} < 1, \quad (5)$$

где  $q$ - коэффициент интенсивности удлинения.

Известно, что связь между относительными деформациями по трем осям характеризуется 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  $C_B$  и 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

$$\delta_B/\delta_H = C_B, \text{ а } \delta_L/\delta_H = C_L, \text{ тогда}$$

$$C_B + C_L = 1.$$

### 1.1. Влияние параметров процесса протяжки на величину коэффициента интенсивности уширения

Экспериментально установлено, что коэффициент интенсивности уширения (2) зависит от следующих основных технологических параметров (факторов) процесса:

- величины относительной подачи  $\Psi = I_O/B_O$ ;
- степени деформации по высоте  $\varepsilon_{OH} = \frac{H_O - H_K}{H_O}$ ;
- относительных размеров полосы, протягиваемой в данном проходе  $m = H_O/B_O$ ;
- коэффициент трения.

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 (рис. 5).

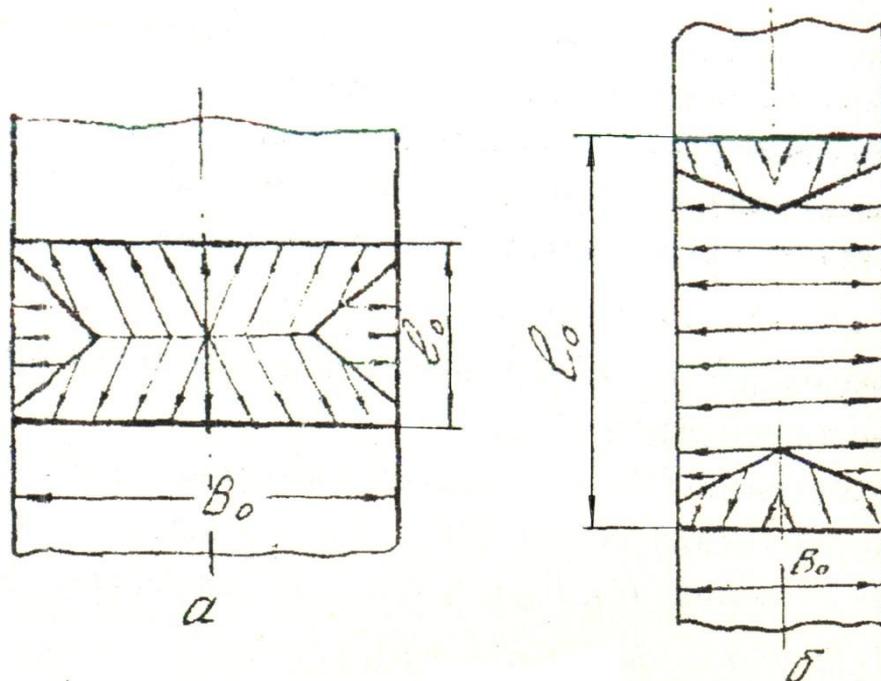


Рис. 5. Схема поперечного течения металла при протяжке:  
 а - протяжка с малой подачей ( $\psi < 1$ ),  
 б - протяжка с большой подачей ( $\psi > 1$ ).

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 ( $\epsilon_{OH} > 0,8$ ) уширение снижается при  $\psi > 1$  и повышается при  $\psi < 1$ . В пределе при  $\epsilon_{OH} \rightarrow 1$  уширение при  $\psi > 1$  стремится к  $0,5$ .

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

### 1.2. Методика расчета технологического процесса протяжки

По результатам технологических расчетов процесса протяжки необходимо определить размеры заготовки после каждого прохода для выбранных технологических параметров (факторов). Эти расчеты могут быть легко выполнены, если имеются экспериментальные данные для расчета коэффициента интенсивности уширения.

Расчет ведется в следующей последовательности:

1. Выбирается относительная величина подачи  $\psi$ .
2. Выбирается степень деформация по высоте заготовки  $\epsilon_{OH}$ .  
Для повышения производительности процесса желательно принять наибольшую степень деформации, но при этом обязательно должно быть обеспечено условие перехода, т.е.  $\varphi = B_K/H_K \leq 2,5$ .
3. По экспериментальным данным рассчитывается коэффициент интенсивности уширения ( $f$ ).
4. По уравнению (4) рассчитывается коэффициент уковки  $K_L$ .
5. Рассчитываются общая длина  $L_K$ , площадь  $F_{KI}$  размеры поперечного сечения ( $H_K, B_{cp}$ ) заготовки после первого прохода:

$$F_k = F_0 / K_L; L_k = L_0 K_L; H_k = H_0 (1 - \epsilon_{OH}); B_{CP} = F_k / H_k.$$

Для каждого прохода расчеты повторяются. При этом размеры заготовки, полученные в предыдущем проходе, принимаются за исходные.

## 2. МАТЕРИАЛЫ, ИНСТРУМЕНТ, ОБОРУДОВАНИЕ

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

Для изменения контактного трения могут быть использованы различные смазки.

В качестве исходной заготовки применяются свинцовые образцы квадратного сечения 15x15 мм.

Измерение образцов производится с точностью 0,1 мм штангенциркулем.

## 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС ОДНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

В качестве варьируемых параметров могут быть выбраны: величина подачи  $l_0$  степень деформации  $\epsilon_{OH} = (H_0 - H_k) / H_0$ ; коэффициент трения  $\mu$  (протяжка на сухих бойках  $\mu \approx 0,4$  или протяжка с полиэтиленовой пленкой  $\mu \approx 0,1$ ). В зависимости от выбранного параметра предусматривается несколько вариантов выполнения работ.

### 3.1. Подготовка и проведение эксперимента

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного технологического параметра и пределы его варьирования.

2. Установить значения остальных постоянных в каждом опыте параметров.

3. С помощью риски отложить по длине образца выбранные подачи. Для осреднения результатов каждая подача откладывается несколько раз. Разметка ведется по двум граням образца. При выполнении работы каждая риска устанавливается по краю бойка.

4. Заданная конечная высота заготовки после протяжки ( $H_k$ ) устанавливается на прессе в зависимости от конструкции бойков (шаговое изменение высоты для ступенчатых бойков и плавное - для нижнего подвижного бойка).

Все исходные данные занести в табл. 1.

Таблица 1

*Исходные данные и результаты экспериментов*

№ опыта	Исходные данные						Результаты экспериментов					
	$H_0$ , мм	$B_0$ , мм	$l_0$ , мм	$\Psi = \frac{l_0}{B_0}$	$\mu$	$H_k$ , мм	$H_k$ , мм	$\epsilon_{OH}$	$l_k$ , мм	$B_k$ , мм	$f$	$q$

### 3.2. Получение и обработка экспериментальных данных

1. Замеряется конечная высота заготовки ( $H_k$ ). Результаты замера осредняются в пределах каждого опыта. Рассчитывается степень деформации ( $\epsilon_{OH}$ ).

2. Замеряется средняя длина участка после протяжки в каждом опыте ( $l_K$ ).
3. Рассчитывается средняя ширина заготовки в пределах каждого опыта:  

$$B_K = H_0 B_0 l_0 / H_K l_K.$$
4. По формулам (2) и (5) рассчитываются соответственно коэффициенты интенсивности уширения ( $f$ ) и удлинения ( $q$ )  
 Результаты замеров и расчетов заносятся в табл. 1.
5. По результатам экспериментов строятся графики изменения коэффициентов уширения и удлинения в зависимости от исследуемого параметра:
  - а)  $f = \varphi\left(\frac{l_0}{B_0}\right)$  и  $q = \varphi\left(\frac{l_0}{B_0}\right)$ ;
  - или
  - б)  $f = \varphi(\varepsilon_{OH})$  и  $q = \varphi(\varepsilon_{OH})$ ;
  - и др.

#### 4. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ ПОСЛЕ ПРОТЯЖКИ

Результаты проведенных исследований по определению коэффициента интенсивности уширения в зависимости от технологических параметров процесса позволяют рассчитывать размеры заготовки после первого перехода протяжки. Результаты расчета могут быть проверены экспериментально.

1. Выбираются конкретные значения параметров процесса в пределах их варьирования, принятых при исследовании.
2. Исходный образец размечают рисками в соответствии с принятой величиной подачи. Необходимо нанести 10... 15 рисок.
3. Инструмент регулируется на конечную высоту заготовки в зависимости от принятой степени деформации.
4. Из экспериментальных графиков или уравнения регрессии определяется коэффициент интенсивности уширения  $f$ .
5. По уравнению (4) рассчитывается коэффициент уковки по длине  $K_L$  и общая длина заготовки

$$L_K = L_0 K_L,$$

где  $L_0$  - исходная длина заготовки, подвергшаяся протяжке.

6. Проводится экспериментальная протяжка заготовки при принятых технологических параметрах и замеряется ее фактическая длина  $L_{KФ}$ , которая сравнивается с расчетной:

$$\delta = \frac{L_K - L_{KФ}}{L_K} 100\%.$$

Анализ операции протяжка в программном модуле DEFORM 3D.  
 Анализ температурного распределения.

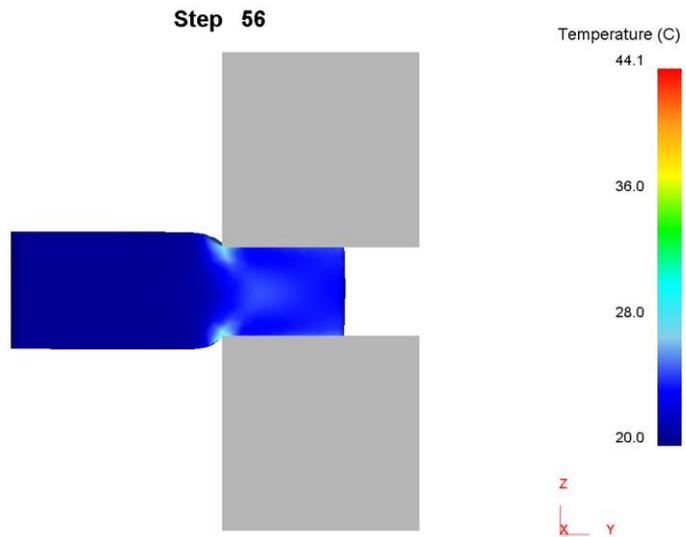


Рис. 1. Этап начала деформации заготовки, начало образования зон температурного распределения у границ контакта заготовки с инструментом. Шаг 56

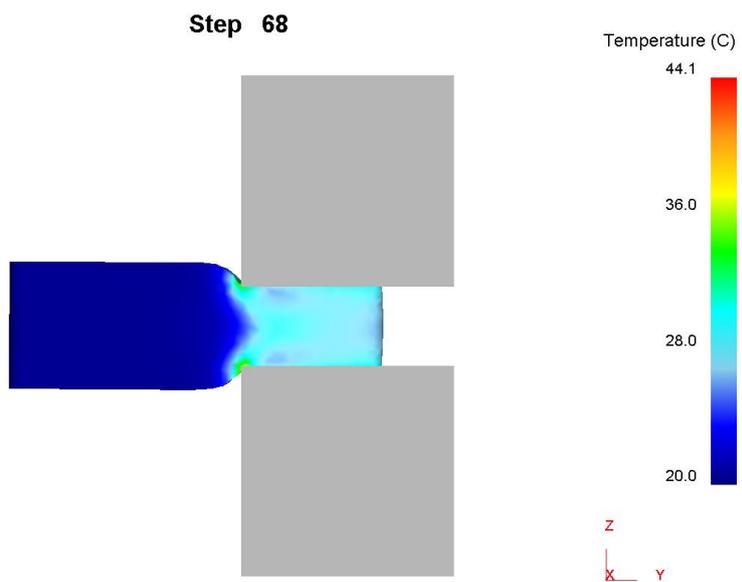


Рис 2. Этап распределения температуры по всей зоне очага деформации. Шаг 68

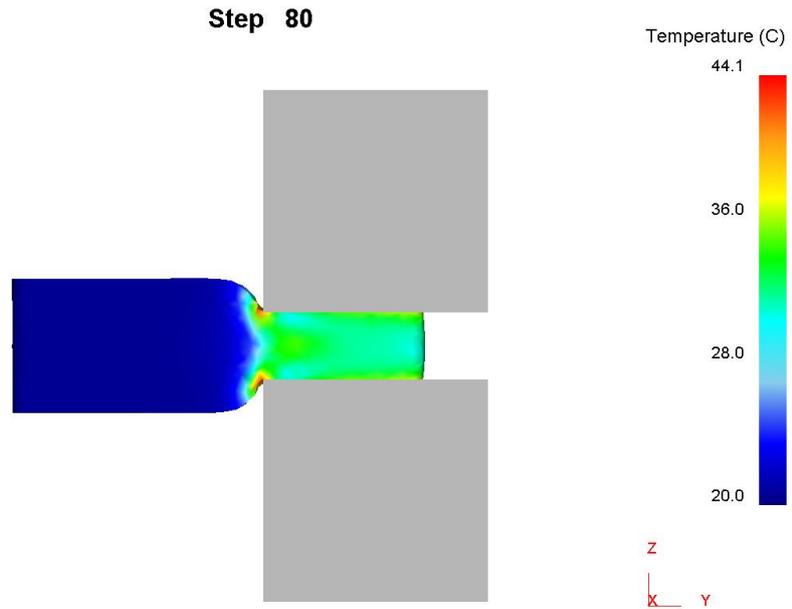


Рис 3. Этап окончательной деформации заготовки – достижение максимума нагрева заготовки в зонах очага деформации.

Во время протяжки трение между бойками и заготовкой значительно.

Ввиду наличия деформации захлаживания в очаге деформации не происходит. По той же причине температурный режим выдержан и по всему объёму заготовки, т.е. она не успевает остыть, что снимает необходимость в дополнительных подогревах в ходе течения процесса.

Анализ напряженного состояния заготовки.

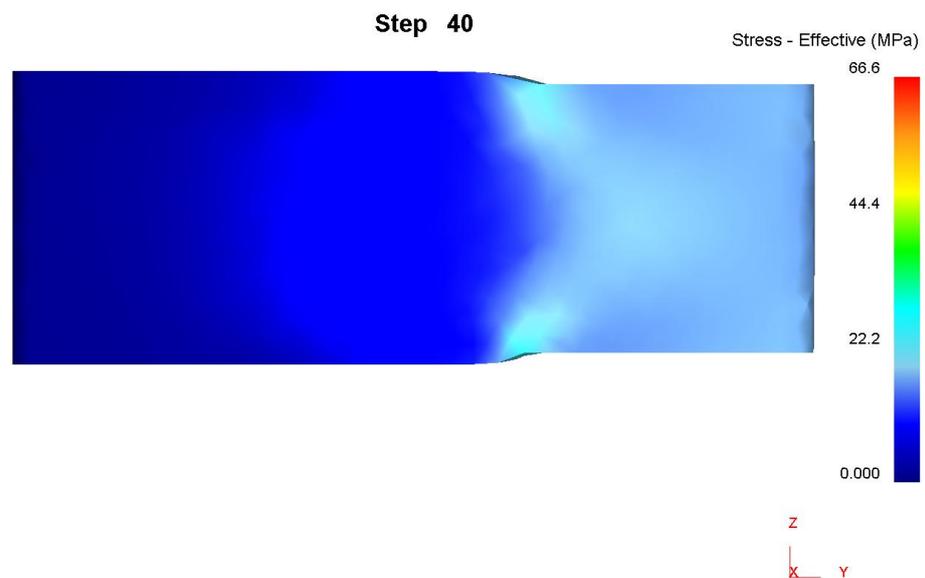


Рис. 4. Напряженное состояния заготовки в очаге деформации при протяжке. Шаг 40

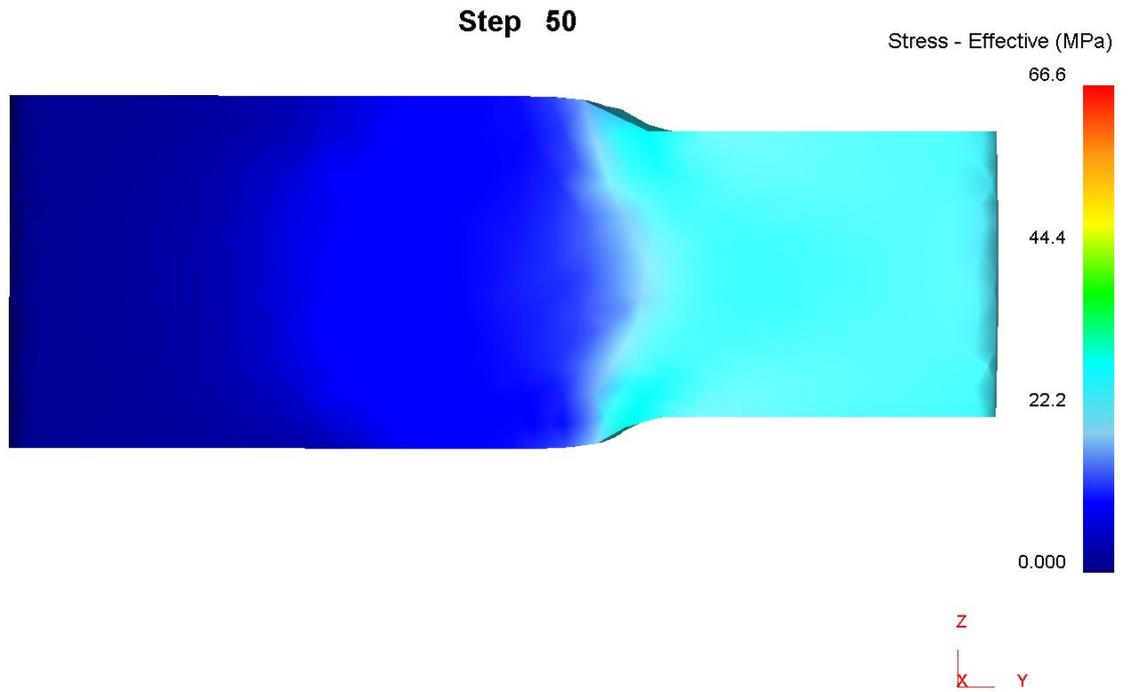


Рис 5. Напряженное состояние в очаге деформации при протяжке. Шаг 50

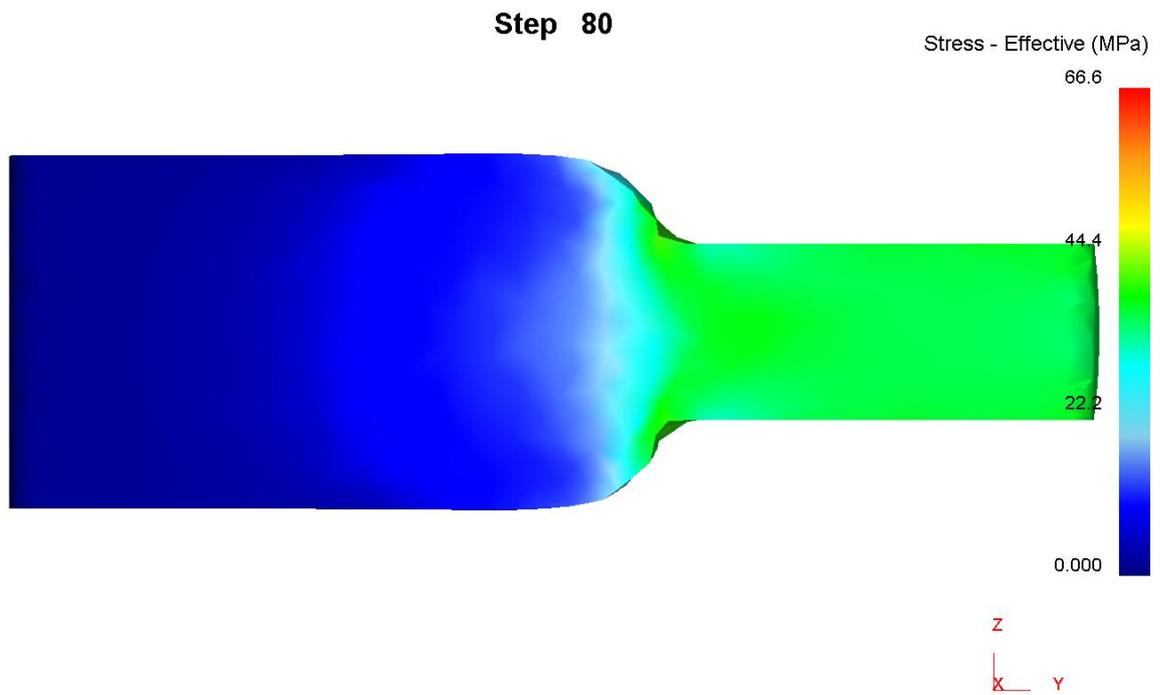


Рис. 6. Напряженное состояние в очаге деформации при протяжке. Шаг 80

Анализ интенсивности деформации в процессе протяжки

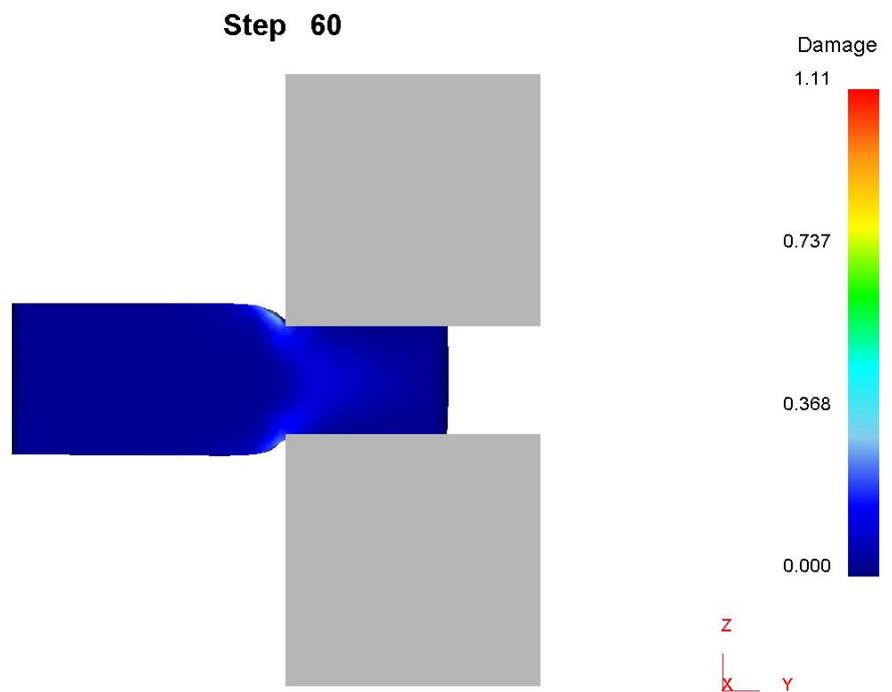


Рис. 7. Повышение значений деформации. Шаг 60

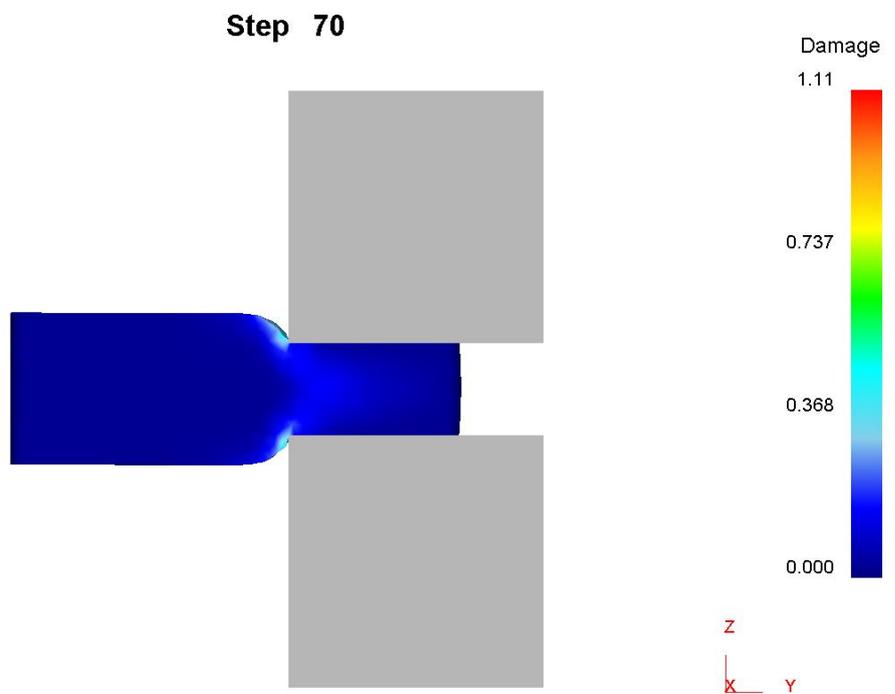


Рис. 8. Повышение значений деформации. Шаг 70

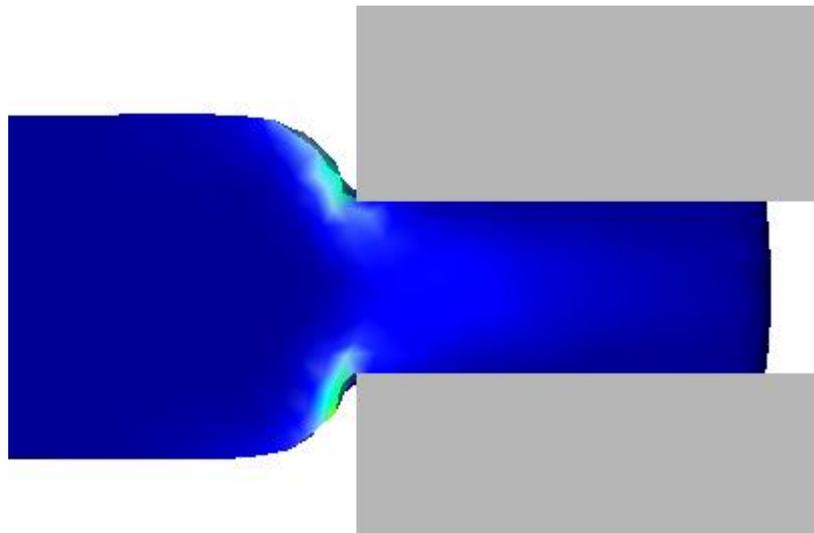


Рис. 9. Повышение значений деформации. Шаг 80

Деформации менее отчётливо видны, чем при других процессах, однако можно различить зоны затруднённой деформации у границы контакта с инструментом, а также дугу границы входа в очаг деформации.

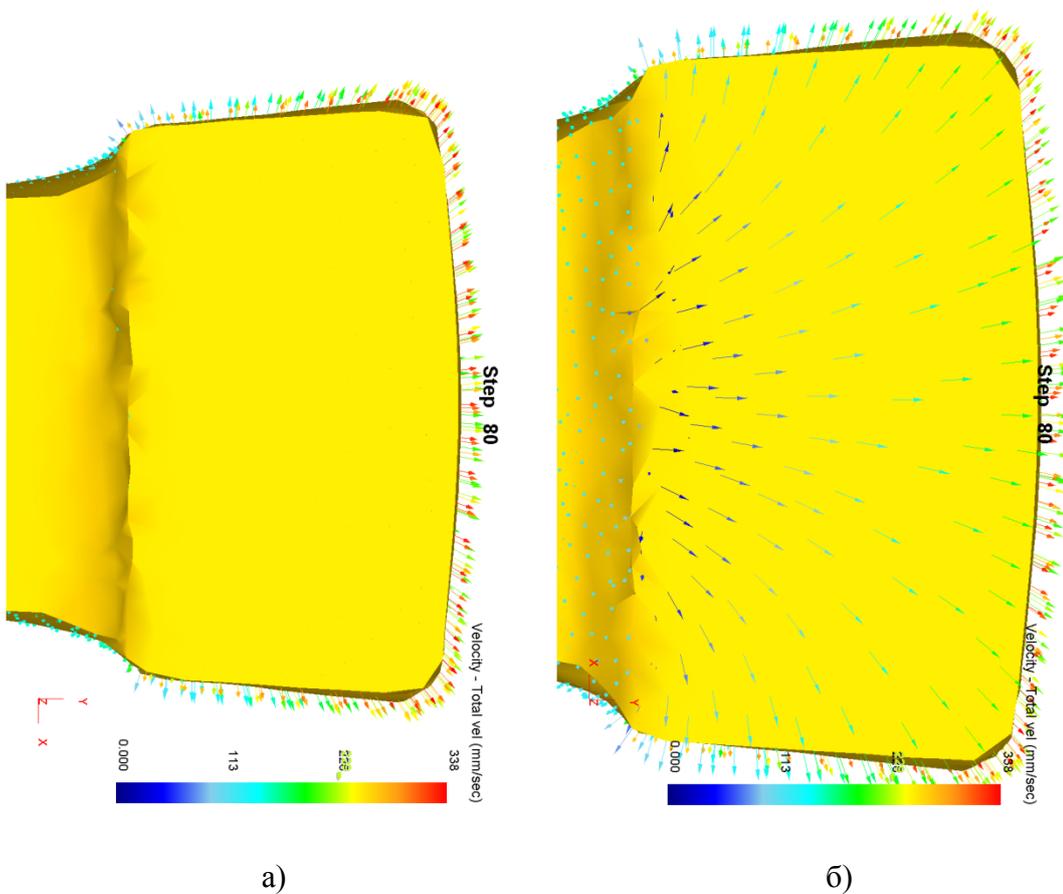


Рис. 10. Течение металла а) вид сверху б) вид снизу. Шаг 80

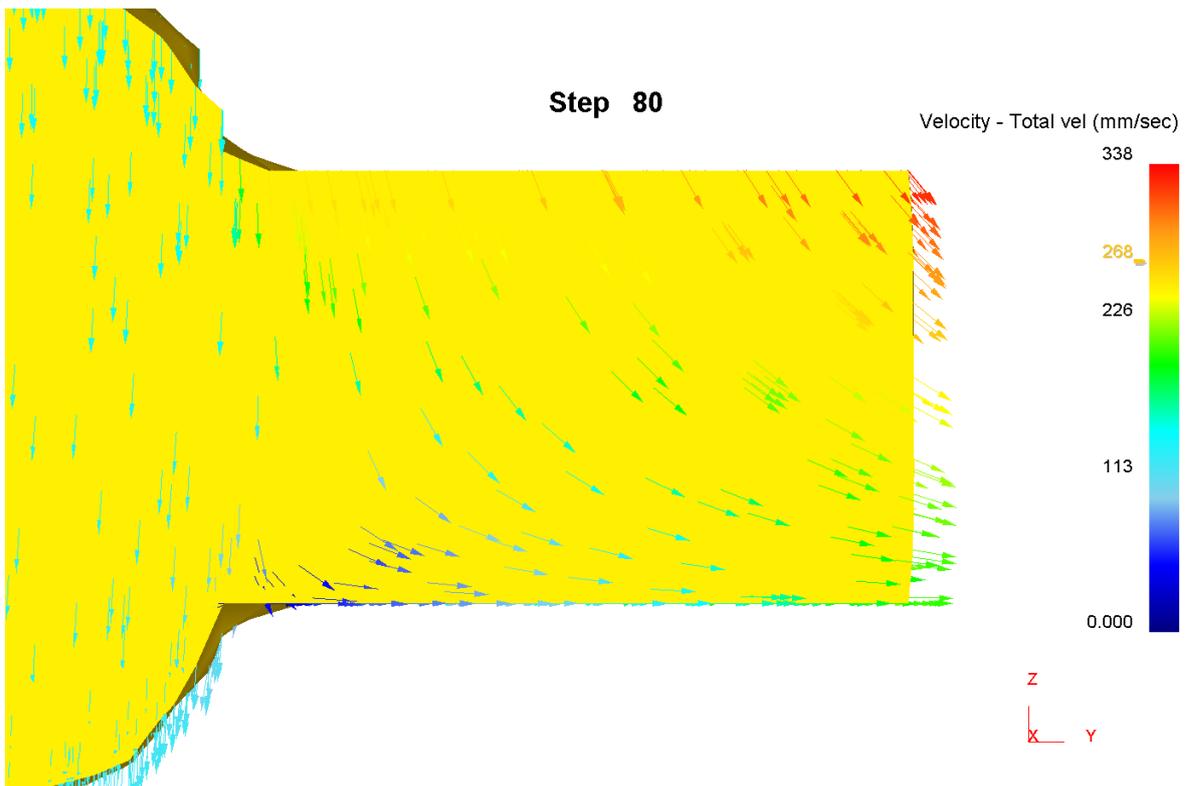


Рис. 11. Течение металла вид сбоку

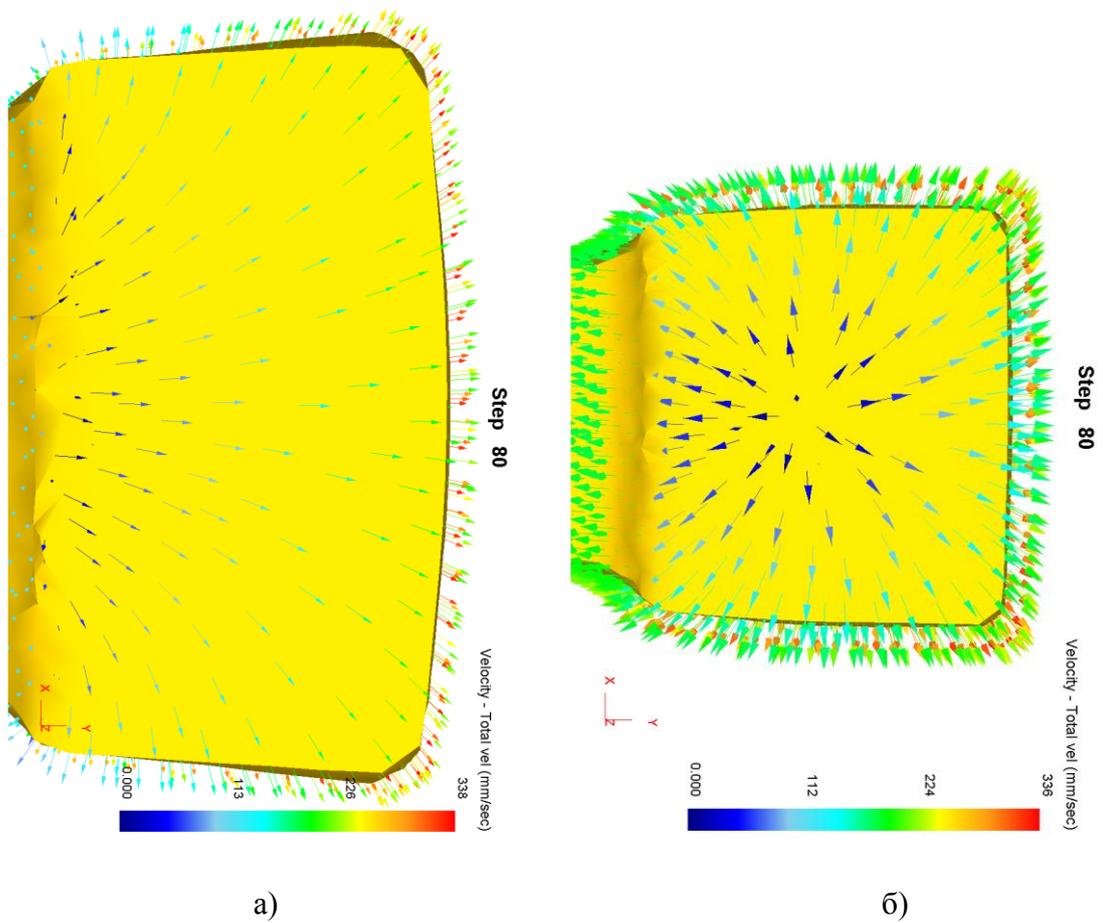


Рис. 12. Течение метала при а) малой подачи и б) большой подаче

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Схема изучаемого процесса.
2. Основные уравнения для расчета технологического процесса протяжки.
3. Таблицы исходных данных и результатов эксперимента.
4. Графические зависимости коэффициента интенсивности уширения и удлинения параметров процесса.
5. Теоретический расчет одного прохода протяжки для произвольных параметров процесса и результаты контрольного эксперимента.
6. Выводы по работе.

### 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?
5. Как влияет на коэффициент уширения относительная подача, степень деформации?
6. Как связаны между собой коэффициенты удлинения и уширения?
7. Каковы ограничения степени деформации при протяжке?

### Список использованной литературы

1. Охраменко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. М.: Машиностроение, 1976.

### Лабораторная работа №3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВОК В ПОДКАТНЫХ РУЧЬЯХ МОЛОТОВОГО ШТАМПА

Цель работы: экспериментальное исследование показателей формоизменения заготовки в открытом и закрытом подкатных ручьях молотового штампа.

Задание: изучить влияние числа обжатий на коэффициент подкатки при профилировании заготовок из различных сплавов в открытом или закрытом подкатном ручье молотового штампа (в зависимости от предложенного варианта выполнения работы).

### 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПЕРАЦИИ ПОДКАТКИ

При штамповке длинноосных поковок на молотах большое распространение получили заготовительные ручьи. Они применяются для получения фасонной заготовки за счет перераспределения металла вдоль оси. Интенсивность формоизменения заготовки в ручье зависит от его вида (пережимной, подкатной, протяжной и т.п.), режима деформации, марки штампуемого материала и др. Каждый ручей обладает определенными возможностями для перераспределения металла вдоль оси, которые количественно можно оценить с помощью коэффициента подкатки:

$$K_{под.р} = F_{max} / F_{ср.},$$

где  $F_{max}$  - максимальная площадь поперечного сечения заготовки в месте набора металла;  $F_{cp}$  - средняя площадь поперечного сечения фасонной заготовки.

При разработке технологического процесса большое значение приобретает выбор вида и количества заготовительных ручьев для фасонирования заготовки. От этого в значительной мере зависит производительность и экономичность всего технологического процесса.

Необходимая конфигурация фасонной заготовки рассчитывается по чертежу поковки (рис. 1). Для этого определяются площади характерных поперечных сечений поковки  $F_{пок}$  и площадь сечения облоя  $F_{об}$ . На основании этих данных рассчитываются площади эпюры сечений:

$$F_{эп} = F_{пок} + 2F_{об}.$$

Площадь каждого сечения приравнивается к площади круга:

$$F_{эп} = \frac{\pi D_{эп}^2}{4},$$

откуда рассчитывается диаметр равновеликой окружности:

$$D_{эп} = 1,13\sqrt{F_{эп}}.$$

Если полученные значения диаметров отложить симметрично по оси ординат и точки соединить плавной кривой, то полученная фигура будет называться эпюрой диаметров (рис. 1,б). Фасонная заготовка, точно соответствующая эпюре диаметров, называется расчетной заготовкой. При штамповке такой заготовки в окончательном ручье перемещение металла вдоль оси будет незначительным, и заполнение ручья произойдет при преимущественном растекании металла перпендикулярно оси заготовки. Такой характер течения металла обеспечивает качественное заполнение ручья и минимальный отход металла в облой. При технологических расчетах весьма полезной является эпюра сечений, которая отличается от эпюры диаметров тем, что ординаты эпюры сечений в выбранном масштабе равны площадям сечения поковки с облоем  $F_{об}$ . Площади отдельных элементов эпюры сечений численно равны объемам этих элементов, а площадь всей эпюры равна объему заготовки. На эпюрах, показанных на рис. 2, можно выделить такие характерные элементы (заштрихованные участки): участки стержней ( $l_{cm1}$  и  $l_{cm2}$ ) и участок набора металла ( $l_{наб}$ ).

Нужную фасонную заготовку получают из исходной катанной заготовки (круглой или квадратной) в заготовительных ручьях: подкатных, протяжных, пережимных и т.п.

При выборе исходной цилиндрической заготовки имеют место два крайних случая: заготовка с максимальным диаметром  $D_0(max)$  и минимальной длиной  $L_0(min)$  (рис. 2,а) и заготовка с наименьшим диаметром  $D_0(min)$  и наибольшей длиной  $L_0(max)$  (рис. 2,в).

При выборе заготовки наименьшей длины ее диаметр определяется из следующего выражения (рис. 1, в):

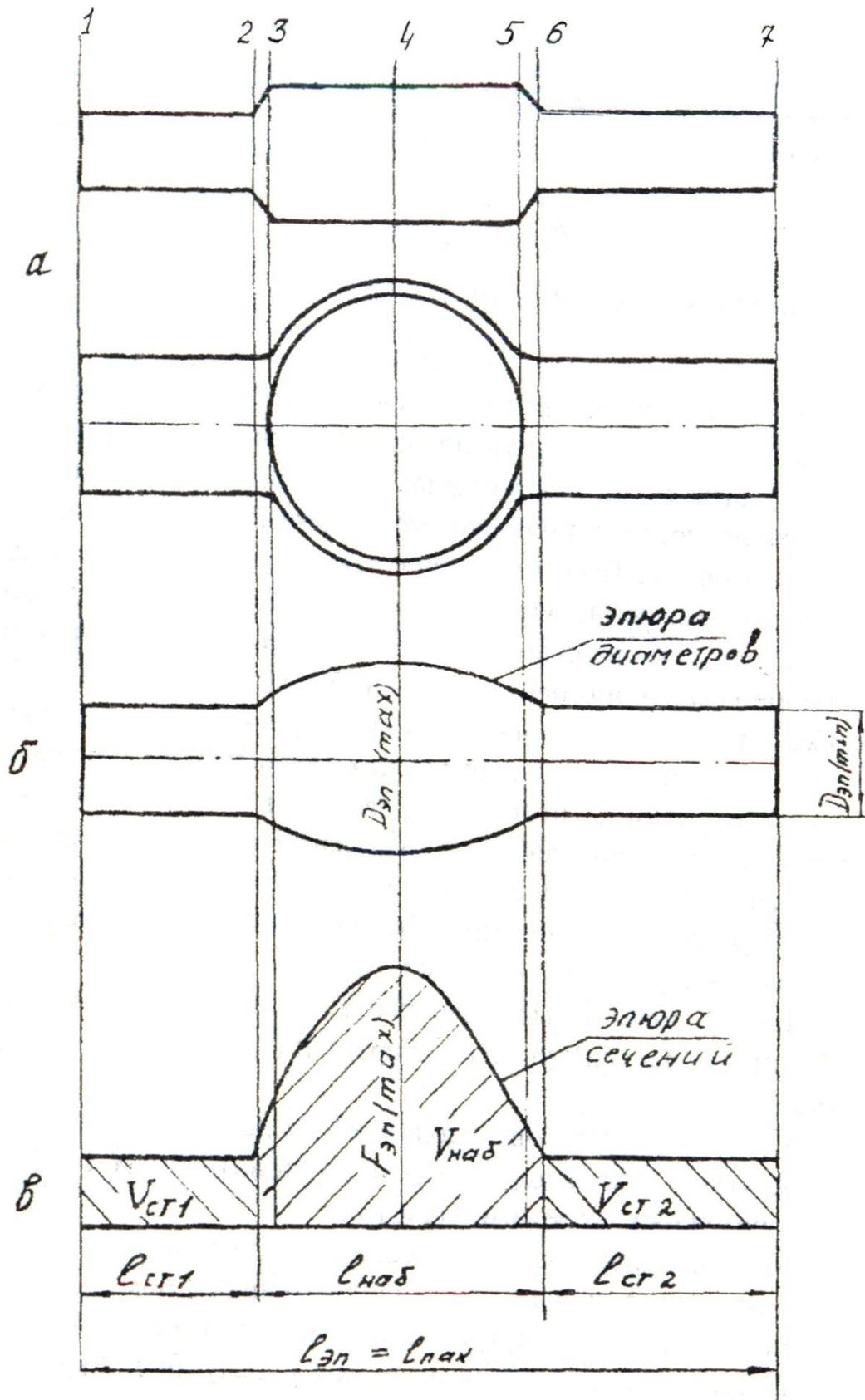


Рис. 1. Поковка (а), элюры диаметров (б) и сечений (в)

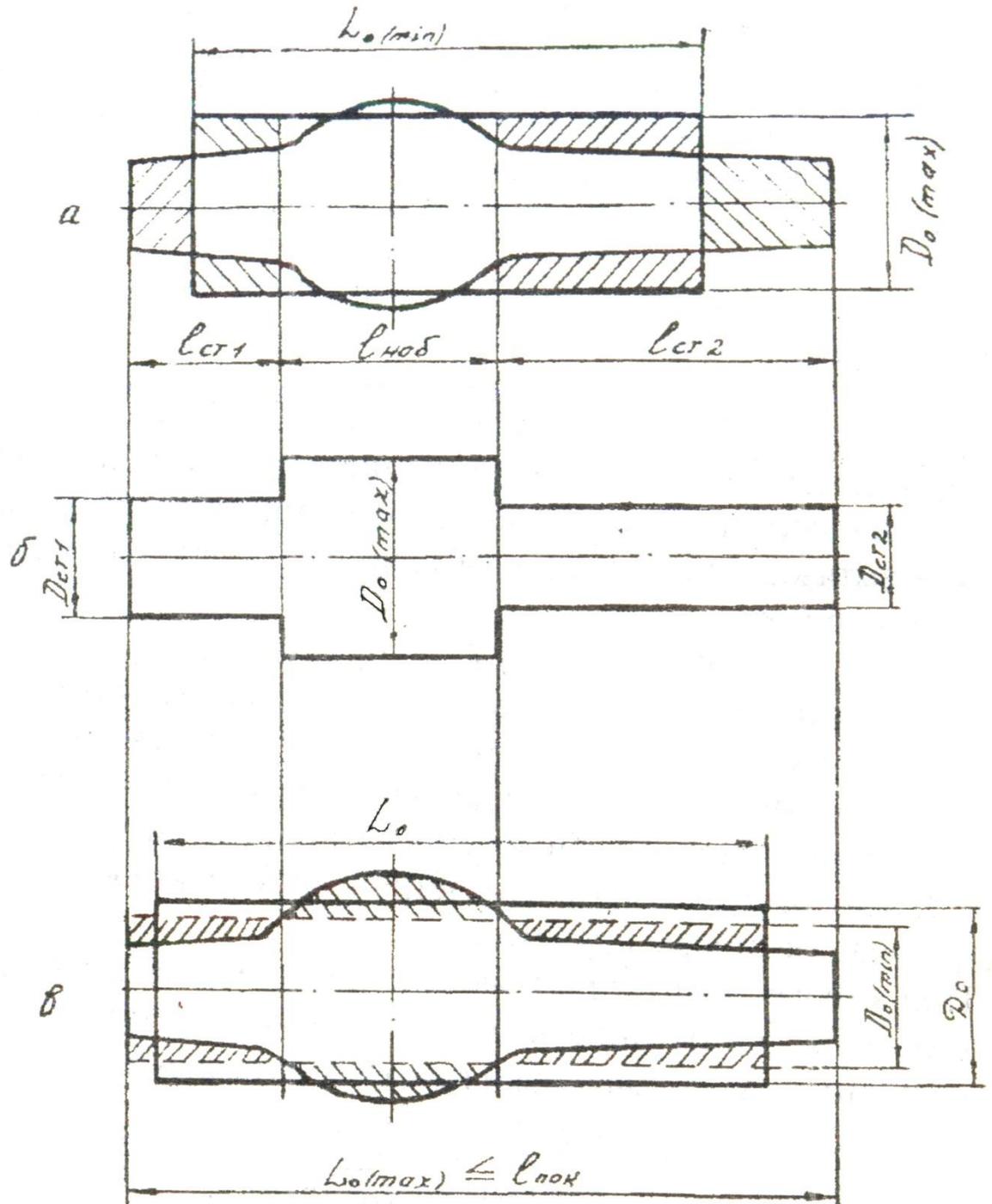


Рис. 2. К выбору исходной цилиндрической заготовки для профилирования

$$F_0(\max) = \frac{V_{\text{наб}}}{l_{\text{наб}}} = \pi D_0^2(\max)/4,$$

откуда

$$D_0(\max) = 1,13\sqrt{F_0(\max)}.$$

Длина такой заготовки

$$L_0(\min) = V_{\text{заб}}/F_0(\max).$$

Для того чтобы из цилиндрической заготовки наименьшей длины получить фасонную заготовку длиной, равной длине поковки, необходимо протянуть (вытянуть) ее концы (рис. 2,а). Для этого применяются протяжные ручки. На рис. 2,б показана фасонная

заготовка, полученная после протяжки. При этом размеры стержневых элементов заготовки следующие:

левая сторона -

$$l_{cm1} \text{ и } D_{cm1} = 1,13\sqrt{V_{cm1}/l_{cm1}} = 1,13\sqrt{F_{cm1}};$$

правая сторона -

$$l_{ct2} \text{ и } D_{ct2} = 1,13\sqrt{V_{ct2}/l_{ct2}} = 1,13\sqrt{F_{ct2}}.$$

При таком способе профилирования участок цилиндрической заготовки в месте набора металла не деформируется. Максимальная степень вытяжки (протяжки), необходимая для получения фасонной заготовки, будет

$$K_{np} = F(\max)/F_{ct2} = D_0^2(\max)/D_{ct2}^2.$$

В протяжных ручьях может быть достигнута сколь угодно большая степень вытяжки. Ограничением являются трудоемкость процесса, быстрое остывание заготовки и недостаточная исходная длина участка, подвергаемого протяжке. Полученная в протяжном ручье заготовка (рис. 2,б) достаточно близка к расчетной, но не повторяет полностью конфигурацию эпоры диаметров.

При выборе заготовки наименьшего диаметра ее длина не может быть больше длины поковки, т.е.  $L_0(\max) \leq l_{пок}$ , (рис. 2,в), тогда наименьший диаметр заготовки найдется из выражения

$$F_0(\min) = \frac{V_{заг}}{l_{пок}} = \pi D_0^2(\min)/4,$$

откуда

$$D_0(\min) = 1,13\sqrt{F_0(\min)}.$$

Для получения фасонной заготовки в этом случае необходимо избыточный объем из стержневых участков переместить вдоль оси заготовки в наборную часть (рис. 2,в). Перемещаемые объемы заштрихованы. Такое перемещение металла может быть осуществлено в подкатном ручье, который придает заготовке более плавные очертания, чем протяжной ручей. Реальный диаметр исходной цилиндрической заготовки ( $D_0$ ) в этом случае принимается несколько большим с учетом ее удлинения в процессе деформации в протяжном ручье.

$$F_0 = (1,02 \pm 1,2)F_0(\min),$$

откуда

$$D_0 = 1,13\sqrt{F_0}, L_0 = V_{заг}/F_0.$$

Величина подкатки (набора утолщения) зависит от конструкции подкатного ручья, длины стержневых элементов, марки материала и постепенно увеличивается с увеличением количества обжатий. Интенсивность набора металла на каждом этапе может быть оценена с помощью текущего коэффициента подкатки:

$$K_{под.i} = F_{наб.i}/F_{cp.i},$$

где  $i$  - количество обжатий;

$F_{наб.i}$  - текущая площадь поперечного сечения заготовки в месте набора металла;

$F_{cp.i} = V_{заг}/l_{заг.i}$  - текущее среднее сечение заготовки;

$l_{заг.i}$  - текущая длина заготовки.

С увеличением числа обжатий текущий коэффициент подкатки вначале интенсивно увеличивается, стремясь к предельному значению. Это предельное значение и принимается за коэффициент подкатки ручья ( $K_{под.ручья}$ ). При этом необходимо выбирать минимальное число обжатий, обеспечивающих достигаемый коэффициент подкатки.

Знание коэффициента подкатки ручья (подкатного, пережимного, предварительного и т.п.), который определяется экспериментально, позволяет выбрать комбинацию ручьев для получения заданной фасонной заготовки. Суммарная подкатка, которую можно получить в нескольких ручьях, определяется следующей зависимостью:

$$K_{\Sigma} = K_{под.p1} K_{под.p2}.$$

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА, МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ

Профилирование исходной цилиндрической заготовки выполняется на пневматическом молоте с массой падающих частей 250 кг в специальном штампе. Чертеж штампа показан на рис. 3.

Штамп имеет два подкатных ручья: открытый и закрытый. Продольный профиль обоих ручьев одинаков. Закрытый ручей отличается от открытого наличием радиусов скругления рабочей поверхности, что повышает интенсивность подкатки и позволяет получать заготовки более правильной формы. На входе ручья имеется порог (высота 6 мм), который пережимает заготовку и отделяет ее от клещевины. С противоположной стороны ручья выполнена узкая

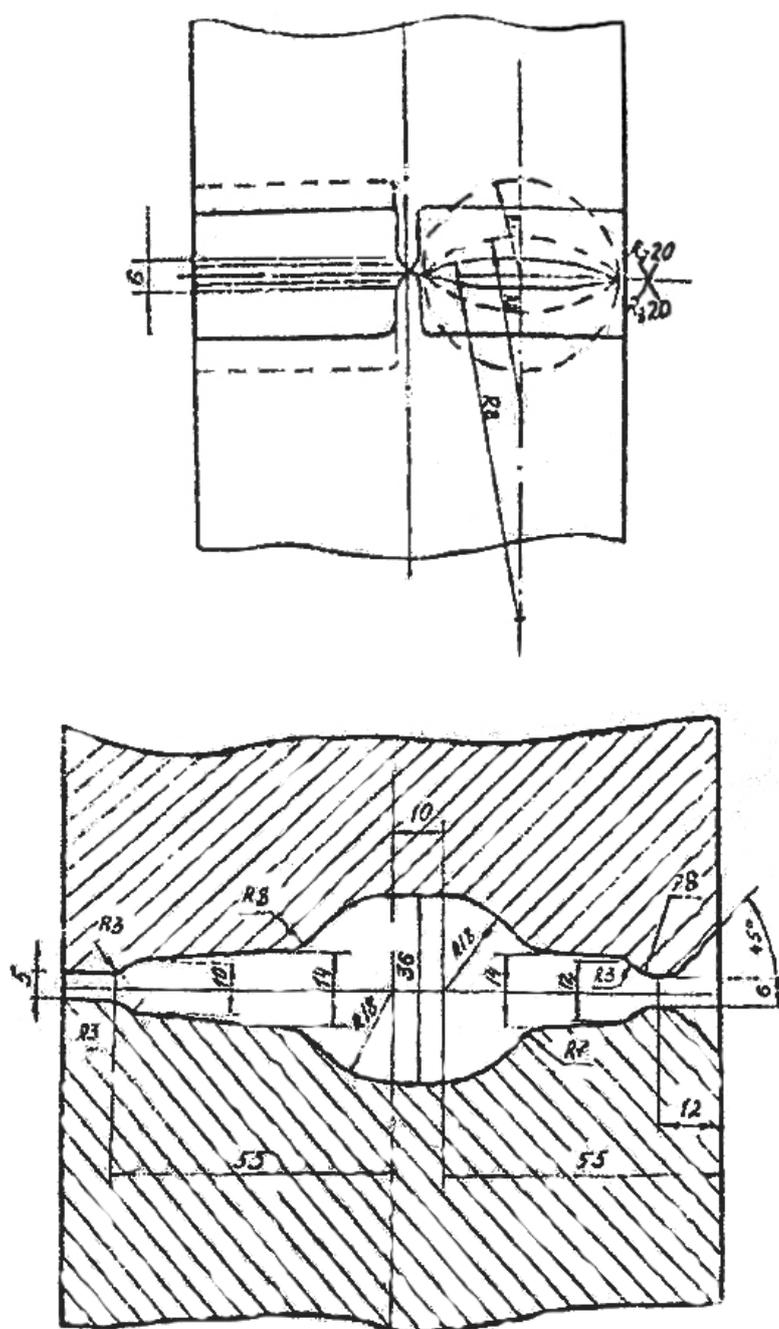


Рис. 3. Профили подкатных ручьев с основными размерами:  
а – открытый; б - закрытый

щель (высота 5 мм), в которой размещается металл, вытекающий за пределы ручья. Заготовка в ручье деформируется за несколько обжатий с промежуточной кантовкой после каждого обжатия на  $90^\circ$ .

В качестве заготовки используется прутки диаметром  $D_0$  и длиной 130-150 мм из различных сплавов (сталь, свинец, алюминий). На расстоянии 85-100 мм рабочего конца сделана кольцевая проточка до диаметра 6 мм или риска, которая определяет длину исходной заготовки  $L_0$  (рис. 4) и отделяет ее от клещевины. При каждом обжатии проточка устанавливается на порог ручья, что обеспечивает одинаковые условия проведения эксперимента.

Стальные и алюминиевые заготовки нагреваются в электрической печи до максимальной температуры ковочного интервала, установленного для данной марки сплава. Для загрузки и выгрузки заготовок из печи применяются специальные клещи. Для проведения работы с нагревом заготовок студенты обеспечиваются рукавицами и защитными очками. Работу можно выполнять только после инструктажа по технике безопасности на рабочем месте и в присутствии лаборанта или преподавателя.

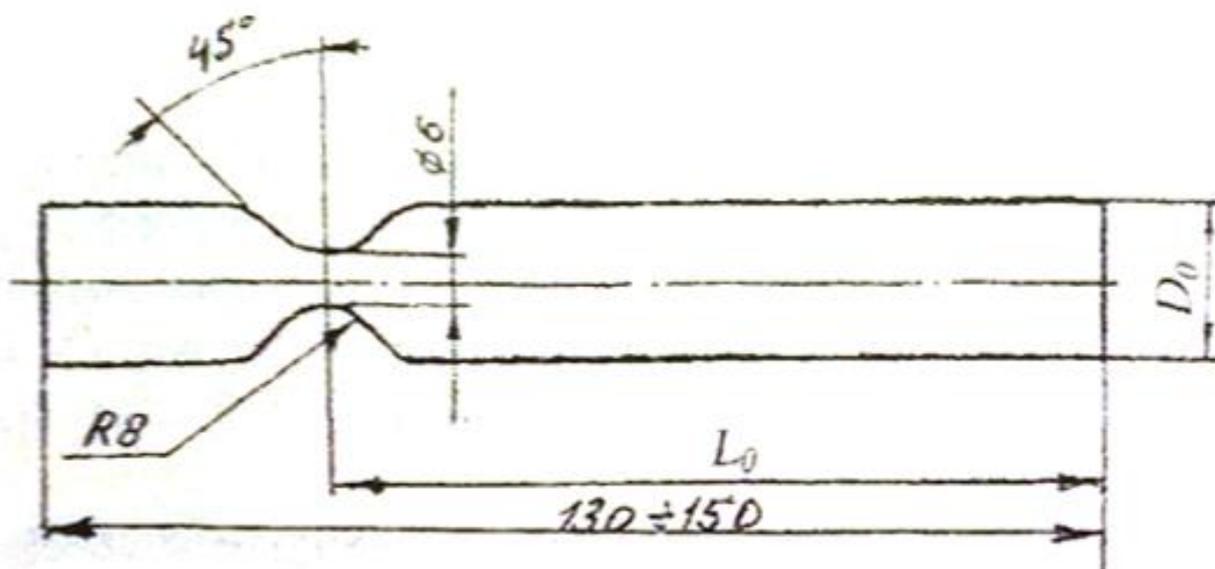


Рис. 4. Образец для проведения экспериментов

### 3. ВОПРОСЫ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА МОЛОТЕ

1. Необходимо проявлять особую осторожность при работе с нагретыми заготовками, которые часто являются причиной получения ожогов. До  $500-600^\circ\text{C}$  цвет заготовки не меняется. При работе на молоте необходимо иметь рукавицы и защитные очки.

2. Брать, переносить и удерживать заготовку при деформации можно только специальными клещами.

3. Запрещается держать руки или посторонние предметы в зоне рабочего пространства молотового штампа.

4. Категорически запрещается самостоятельная работа на молоте в отсутствие лаборанта или преподавателя.

5. При работе на молоте ручки клещей должны находиться сбоку от работающего.

6. При укладке заготовки в ручей она должна иметь две точки опоры.
7. На молоте должны работать два человека: один удерживает заготовку в ручье, другой, по команде первого, управляет ударами с помощью рычага управления молота.

#### 4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Предусматривается несколько вариантов выполнения работы. Различные варианты могут быть получены за счет профилирования заготовок из разных сплавов в открытом или закрытом ручьях при разных размерах исходной цилиндрической заготовки ( $D_0; L_0$ )

1. Для каждого варианта выполнения работы бригаде студентов выдается 3 различных образца.
2. Образцы для нагрева загружаются в электрическую печь. Температура нагрева устанавливается в зависимости от марки сплава. Время нагрева - 20 минут, время промежуточных подогревов - 5 мин.
3. После нагрева каждая заготовка деформируется в одном из ручьев штампа (открытом или закрытом) соответственно за 2, 4 и 6 обжатий. Одно обжатие - деформация заготовки за несколько ударов молота до соприкосновения бойков штампа. После каждого обжатия заготовка кантуется на  $90^\circ$ . С одного нагрева допускается не более двух обжатий. После первой серии экспериментов (по два обжатия каждой заготовки) одна заготовка оставляется для измерения, а остальные загружаются в печь для подогрева.
4. При работе со свинцовыми образцами, не требующими нагрева, для каждой бригады студентов достаточно одного образца. В этом случае все необходимые замеры деформированной заготовки выполняются сразу же после любого числа обжатий.
5. При проведении экспериментов строго соблюдать технику безопасности при работе на молоте.

#### 5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Выбираются исходные размеры заготовки:  
 $D_0$ - диаметр заготовки, замеряется непосредственно;  
 $L_0$ - длина рабочей части заготовки, замеряется непосредственно (рис. 4) или отмечается риску по заданию преподавателя ( $L_0 = 90 \pm 110$  мм).
2. Определяется ряд контролируемых обжатий. В случае нагрева заготовок (сталь, алюминий) заготовки замеряются после 2, 4 и 6 обжатий. В случае профилирования свинцовой заготовки необходимые замеры можно проводить после любого числа обжатий (1, 2, 3...10), по заданию преподавателя.
3. После каждого контролируемого обжатия снимаются два размера с деформируемой заготовки:  $D_{\max,i}$  и  $L_{\text{заг},i}$   
 Для определения  $D_{\max,i}$  делается по три измерения диаметра в месте набора металла в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 5). Тогда
 
$$D_{\max,i} = (D_{1,i} + D_{2,i} + D_{3,i} + D_{4,i} + D_{5,i} + D_{6,i})/6.$$
 Длина заготовки ( $L_{\text{заг},i}$ ) измеряется непосредственно на образце (рис. 5).

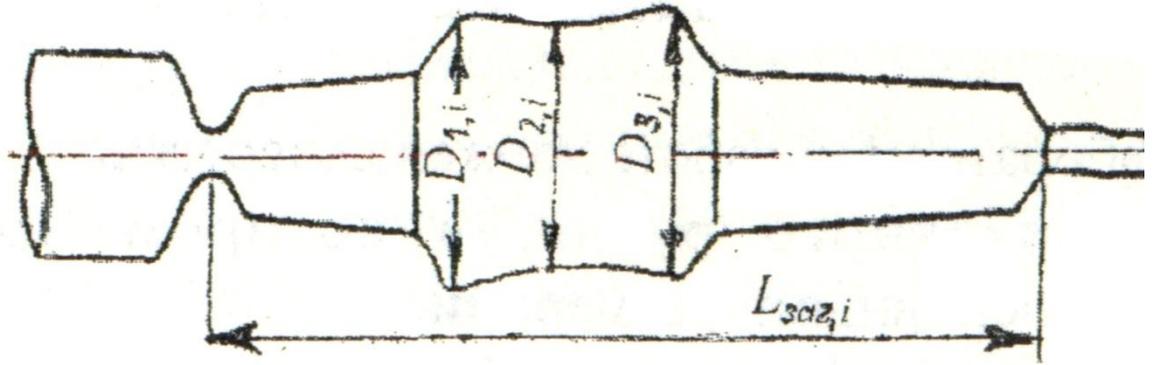


Рис. 5. Схема к замеру объема наборного участка

4. Исходные данные, результаты измерений и расчетов представляются в виде таблицы.

Расчётные величины в таблице определяются по следующим формулам:

$$V_{\text{заг}} = (\pi D_0^2) / 4 * L_0 = \text{const} - \text{объем заготовки, подвергаемый деформации};$$

$F_{\text{наб},i} = (\pi D_{\text{max},i}^2) / 4$  - площадь сечения заготовки в месте набора металла после  $i$ -го обжатия;

$F_{\text{ср},i} = F_{\text{наб},i} / L_{\text{заг},i}$  - среднее сечение профильной заготовки после  $i$ -го обжатия;

$K_{\text{под},i} = F_{\text{наб},i} / F_{\text{ср},i}$  - достигнутый коэффициент подкатки заготовки после  $i$ -го обжатия.

5. По результатам экспериментов строится график влияния количества обжатий в ручье штампа на величину коэффициента подкатки

$$K_{\text{под},i} = f(i).$$

6. Недостающие данные берутся у других бригад студентов.

Таблица 1

*Исходные данные и результаты экспериментов*

Исходные данные						Результаты экспериментов				
Марка материала	Вид ручья	$D_0$ , мм	$L_0$ , мм	$V_{\text{заг}}$ , мм <sup>3</sup>	Кол. обжатий	$D_{\text{max},i}$ , мм	$F_{\text{наб},i}$ , мм <sup>2</sup>	$L_{\text{заг},i}$ , мм	$F_{\text{ср},i}$ , мм <sup>2</sup>	$K_{\text{под},i}$
	Откр. Или закрыт									

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Эскиз подкатного ручья, в котором проводились эксперименты, с основными размерами.
2. Эскиз одной из трех заготовок после деформирования с указанием схемы замеров.
3. Сводную таблицу исходных данных и результатов эксперимента для открытого (закрытого) подкатных ручьев.
4. График влияния количества обжатий на величину коэффициента подкатки  $K_{\text{под},i} = f(i)$  для открытого (закрытого) подкатных ручьев.
5. Основные расчетные формулы с пояснениями.

При анализе экспериментальных данных в выводах по работе необходимо осветить следующие вопросы:

1. Характер изменения коэффициента подкатки с увеличением числа обжатий. Какое число обжатий следует рекомендовать в технологических процессах? Какова величина коэффициента подкатки исследуемого ручья?
2. Какова разница в величинах коэффициента подкатки в открытом и закрытом ручьях?
3. Изменяется ли коэффициент подкатки при прочих равных условиях для различных марок материала?
4. Как использовать полученные экспериментальные значения коэффициентов подкатки при разработке технологических процессов штамповки на молотах?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как строятся эпюры сечений, диаметров? Для чего применяется эпюра диаметров? Какими свойствами обладает эпюра сечений? Какая заготовка называется расчетной? Каковы особенности течения металла в окончательном ручье при использовании расчетной заготовки?
2. Как определить максимальный диаметр исходной цилиндрической заготовки для фасонирования? Какова длина такой заготовки? Какие заготовительные ручьи применяются в этом случае?
3. Как рассчитать минимальный диаметр исходной цилиндрической заготовки? Какие ручьи необходимы для ее фасонирования?
4. Что называется коэффициентом подкатки? Какие факторы влияют на величину коэффициента подкатки? В чем отличие между коэффициентом подкатки ручья и требуемым- коэффициентом подкатки? Как влияет конструкция подкатного ручья на величину коэффициента подкатки? Как производится выбор заготовительных ручьев с использованием коэффициента подкатки?

Список использованной литературы

1. Ковка и объемная штамповка сталей: Справочник /Под ред. М.В.Сторожева. М.: Машиностроение, 1967. Т. 1.
2. Семенов Б.И. Ковка и объемная штамповка. М.: Высш. шк., 1972.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ В ЗАКРЫТОМ ШТАМПЕ

Цель работы: изучение последовательности заполнения отдельных элементов полости закрытого штампа и изменения усилия процесса по мере заполнения штампа.

Задания:

1. Установить последовательность заполнения закрытого штампа и характерные стадии процесса.
2. Изучить закономерности изменения усилия штамповки.
3. Определить минимальное усилие процесса для заданного радиуса внутреннего угла штампа.
4. Сравнить расчетные и экспериментальные значения усилий на характерных стадиях процесса.

### 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ

Штамповка в закрытых штампах обладает рядом преимуществ перед открытой штамповкой: повышенная точность поковок, меньше отходы металла, меньше усилие процесса и т.д. В последнее время этот вид штамповки все шире применяется в производстве и является перспективным при изготовлении целого ряда деталей.

Основная трудность при эксплуатации закрытого штампа - необходимость точного дозирования объема металла исходной заготовки. При точном соответствии объемов поковки и заготовки усилие процесса зависит только от сложности конфигурации штампа (если не учитывать марку деформируемого металла и условия трения). При этом усилие штамповки в закрытом штампе меньше усилия штамповки такой же детали в открытом штампе. Это объясняется отсутствием в закрытом штампе облойной канавки, на деформацию металла в которой расходуется до 20-40 % общего усилия. Если объем заготовки больше расчетного, то происходит переполнение закрытого штампа и резкое повышение усилия процесса. Избыток металла выдавливается в зазор между пуансоном и матрицей, значительно повышается давление внутри полости штампа, что приводит к интенсивному износу инструмента, а в некоторых случаях и его поломке.

Заполнение штампа происходит последовательно от более простых элементов поковки к более сложным. Это требует постепенного увеличения усилия. Максимальное усилие процесса (в случае точного объема заготовки) будет соответствовать моменту заполнения самого сложного элемента поковки (например, угла в самом глубоком отростке). Дальнейшее повышение усилия нежелательно, а его необходимость может быть связана только с размещением избытка металла заготовки.

Ввиду разнообразия конфигураций поковок теоретический вывод единой расчетной формулы для определения усилия процесса вызывает значительные трудности. Удобным для практического применения является метод, основанный на расчете и последующем сложении усилий, необходимых для заполнения отдельных элементов поковки: цилиндрического или конического углубления, углов штампа и т.д. Такой подход позволяет получить простые расчетные формулы и в то же время учесть особенности оформления поковок различной конфигурации.

На рис. 1 показаны три стадии заполнения поковки типа диска с центральным сложным выступом (а,б,в) и типовой график изменения усилия процесса (г). Эпюры контактных напряжений представлены в виде относительных величин, т.е.

$$n = \sigma_z / \sigma_s,$$

где  $\sigma_z$  - нормальное напряжение в любой характерной точке;

$\sigma_s$ - предел текучести деформируемого материала.

Анализ стадий формоизменения позволяет установить последовательность заполнения полости штампа и структуру формулы для расчета усилия процесса.

На первой стадии (рис. 1,а) происходит открытое выдавливание до соприкосновения фланца поковки со стенками матрицы. При этом часть металла выдавливается в центральную полость. Эпюра контактных напряжений имеет два максимума  $n_1$  соответствующих положению поверхности раздела потоков металла  $D_x$ . В теории горячей штамповки получены формулы для характерных точек  $(n_0, n_1, n_2)$ , и среднее значение нормальных напряжений  $n_{cp}$ . Эта стадия в данной работе не исследуется.

На второй стадии (рис. 1,б) закрытого выдавливания происходит заполнение углов фланца и выдавливание металла в центральную полость. При небольшой глубине полости последняя может заполняться на первой стадии. В этом случае наиболее трудным элементом поковки будут углы фланца, заполнение которых произойдет в последнюю очередь. При построении эпюр контактных напряжений необходимо учитывать это условие и рассматривать окончательную стадию штамповки как закрытое осаживание. Если глубина полости значительна, то углы фланца заполняются раньше, чем металл коснется дна углубления. В этом случае углы полости будут заполняться в последнюю очередь, что и определит вид эпюры контактных напряжений. Усилие процесса на второй стадии изменяется от  $P_1$  до  $P_2$  (рис. 1,г) и складывается из следующих составляющих:

- усилия, необходимого для затекания металла из матрицы в отросток диаметром  $d_n$  в пределах угла естественного конуса;
- усилия, необходимого для преодоления сил трения  $T_2$  на стенках матрицы.

Вторая стадия заканчивается в момент касания металлом дна отростка.

На третьей стадии процесса происходит заполнение углов и размещение некоторого избытка металла (рис. 1,в). Вид эпюры контактных напряжений (контур I на рис. 1,в) аналогичен эпюре второй стадии. Однако численные значения напряжений повышаются по мере уменьшения радиуса конической полости поковки  $r$ , что приводит к заметному повышению усилия ( $P_2 \rightarrow P_3$  на рис. 1,г). При абсолютно точном совпадении объемов заготовки и ручья максимальное усилие штамповки  $P_3$  зависит от величины радиуса закругления конической полости штампа. Абсолютное совпадение объемов заготовки и ручья маловероятно, и практически процесс закрытой штамповки всегда осуществляется при некотором избытке металла, который, однако, не должен повысить давление более чем на 10...20 % (контур эпюры II на рис. 1,в).

Наличие большого избытка металла при закрытой штамповке на кривошипных машинах приводит к появлению четвертой стадии, заключающейся в размещении значительного избытка металла, соответственно резком повышении напряженного состояния (контур III на рис. 1,в) и усилия штамповки до значительных величин ( $P_4$  на рис. 1,г).

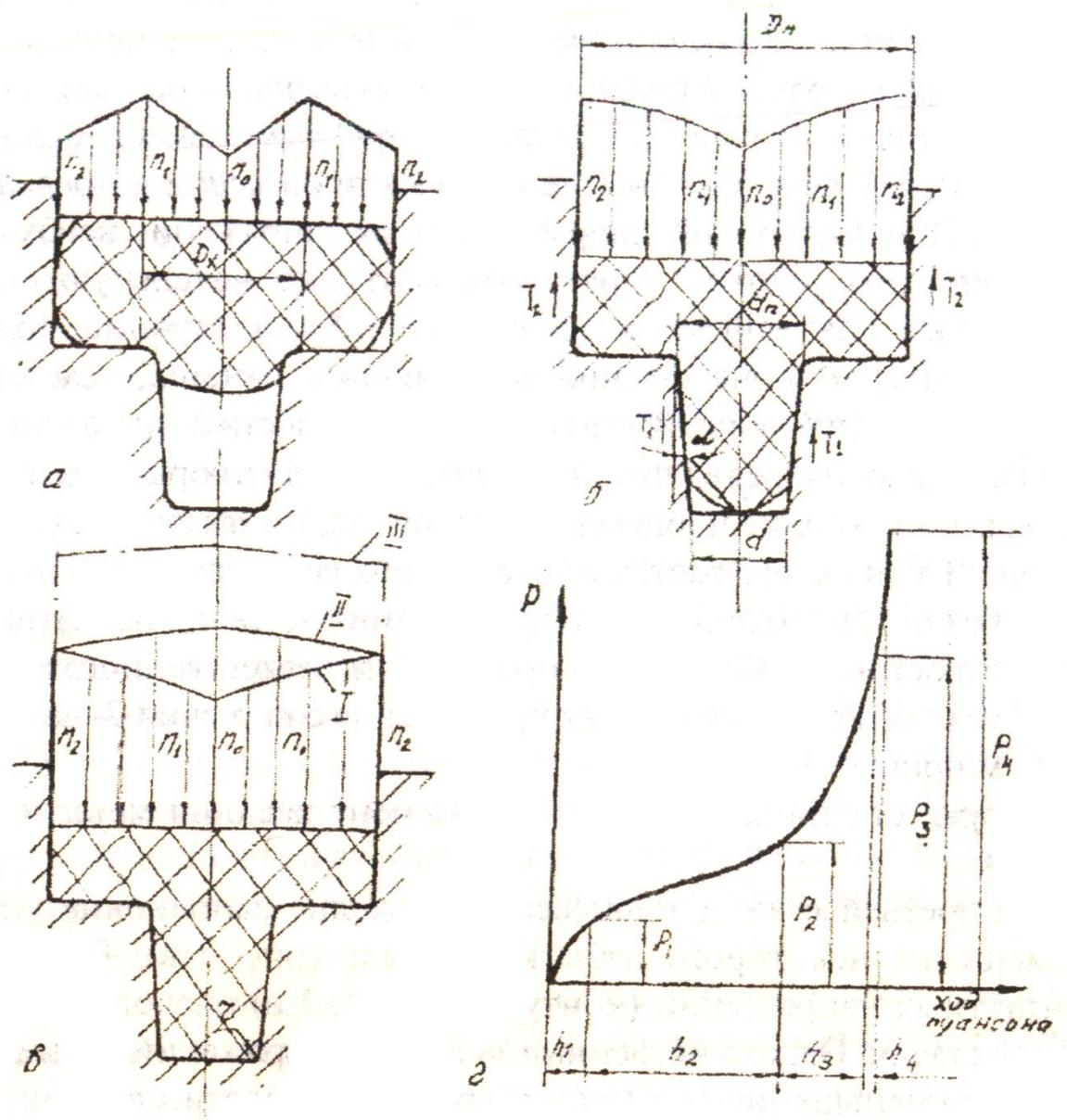


Рис. 1. Стадии формоизменения при закрытой штамповке поковок

Рассмотрим эпюры относительных нормальных напряжений в различных зонах деформации при заполнении круглого штампа с центральным отростком (рис. 2). На рисунке изображены эпюры напряжений на торце пуансона (уровень 4 - 4). Эти напряжения определяют усилие штамповки в каждый текущий момент деформации.

По мере удаления от торца пуансона к торцу матрицы напряжения уменьшаются и достигают минимального значения на уровне 1 - 1.

Уровень 1 - 1. Средние напряжения, действующие на уровне 1 - 1 и обеспечивающие заполнение углов отростков, могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$n_{cp}''' = 2,1\left(1 - \frac{2R}{d_1}\right)^2 + 1,5Ln \frac{d_1}{4R} + 12 \frac{R}{d_1} - 12 \frac{R^2}{d_1^2} - 2,25.$$

Контур металла, затекающего в угол штампа, с достаточной для практических расчетов точностью можно описать дугой окружности (рис. 2,б). Тогда, замеряя отрезок с (например с помощью индикатора, установленного в углу штампа), из геометрических соображений можно рассчитать текущий радиус при заполнении угла:

$$R=c/0,41. \quad (2)$$

По мере уменьшения радиуса напряжения увеличиваются и достигают значительных величин при малых радиусах скругления углов полости. Это основная причина увеличения усилия процесса на третьей стадии (рис. 1, г). На второй стадии процесса, до касания металлом dna отростка,  $n_{cp}''' = 0$ .

*Уровень 2-2.* На уровне 2 - 2 напряжения повышаются на величину необходимую для деформации металла в коническом углублении. Тогда

$$n_0'' = n_{cp}''' + 2 \left( 1 + \frac{\mu}{tg\alpha} \right) \ln \frac{d_n}{a}, \quad (3)$$

$$n_1'' = n_0'' + 1, \quad (4)$$

где  $\mu = 0,4$  - коэффициент трения металла по стенкам углубления.

Среднее относительное напряжение любой пространственной эпюры напряжений определяется из выражения

$$n_{cp} = V_3/F_n, \quad (5)$$

где  $V_3$ - объем пространственной эпюры;

$F_n$ - площадь деформируемой части поковки, на которую действует рассматриваемая эпюра.

Средние напряжения на уровне 2 - 2 с учетом выражения (5) будут

$$n_{cp}'' = n_1'' - 1/3. \quad (6)$$

*Уровень 3-3.* Относительное осевое напряжение  $n_0$  на уровне 3-3 должно быть больше на величину, которая необходима для деформации металла в естественном конусе с углом  $45^\circ$ , т.е.

$$n_0' = n_0'' + 2 \left( 1 + \frac{\mu_\beta}{tg45^\circ} \right) \ln \frac{D}{d_n} = n_0'' + 3 \ln \frac{D}{d_n}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} n_1' = n_0' + 1 \\ n_2' = n_1' + \mu \frac{D-d_n}{h_{оч}} \end{cases} \quad (8)$$

где  $\mu$  - 0,5 - внутренний коэффициент трения деформируемого металла.

Среднее относительное напряжение с учетом выражения (5)

$$n_{cp}' \approx n_2' - \frac{1}{3}(n_2' - n_1') \left( 1 + \frac{d_n}{D} \right). \quad (9)$$

*Уровень 4-4.* Относительное осевое напряжение  $n_0$  должно быть больше щ на величину, необходимую для преодоления сил трения по стенкам матрицы:

$$\begin{cases} n_0 = n_0' + 2\mu \left( \frac{2h}{D} + \frac{d_n}{D} - 1 \right), \\ n_1 = n_0 + 1, \\ n_2 = n_1 + \mu \frac{D-d_n}{h}. \end{cases} \quad (10)$$

Повышение относительных напряжений от  $n_1$  до  $n_2$  связано с преодолением сил трения на торцевой поверхности пуансона. Среднее относительное напряжение определяется по формуле, аналогичной (9):

$$n_{cp} \approx n_2 - \frac{1}{3}(n_2 - n_1) \left( 1 + \frac{d_n}{D} \right), \quad (11)$$

а усилие процесса из выражения

$$P = \sigma_S n_{cp} \frac{\pi D^2}{4}, \quad (12)$$

где  $\sigma_s$ - предел текучести деформируемого материала.

С учетом выражений (1), (3), (7) можно получить общую формулу для расчета осевого нормального напряжения на торце пуансона:

$$n_0 = 2 \left( 1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \ln \frac{d}{d_i} + 3 \ln \frac{D}{d_n} + 2\mu \left( \frac{2h}{D} + \frac{d_n}{D} - 1 \right) + \left[ 2,1 \left( 1 - \frac{2R}{d_1} \right)^2 + 1,5 \ln \frac{d_1}{4R} + 12 \frac{R}{d_1} - 12 \frac{R^2}{d_1^2} - 2,25 \right].$$

Слагаемые  $\bar{b}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{z}$ ,  $\bar{d}$  отражают сопротивление течению металла в отдельных элементах матрицы:

$\bar{b}$  - при течении металла по коническому углублению;

$\bar{v}$  - при затекании металла в коническое углубление;

$\bar{g}$  - на преодоление трения по стенкам матрицы;

$\bar{d}$  - при заполнения углов углубления.

Анализ выражения (13) показывает:

1. На второй стадии процесса слагаемое  $\bar{d}$  равно нулю. Слагаемое  $\bar{v}$  остается постоянным. Слагаемое  $\bar{z}$  меняется незначительно только за счет изменения размера  $h$ . Основное влияние на изменение усилия процесса оказывает слагаемое  $\bar{b}$ . По мере увеличения глубины затекания металла в отросток ( $l$  на рис. 2) изменяется диаметр  $d_i$ , который можно рассчитать из выражения

$$d_i = d - 2l \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (14)$$

2. На третьей стадии процесса слагаемые  $\bar{b}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{z}$ , остаются постоянными. Повышение усилия наблюдается за счет изменения слагаемого  $\bar{d}$ , связанного с постоянным уменьшением радиуса  $R$  в углу отростка. Максимальное усилие процесса будет зависеть в этом случае от величины радиуса скругления угла отростка, заданного конструкцией штампа.

Рассмотренные эпюры нормальных напряжений позволяют рассчитать оптимальные размеры облойной канавки открытого штампа.

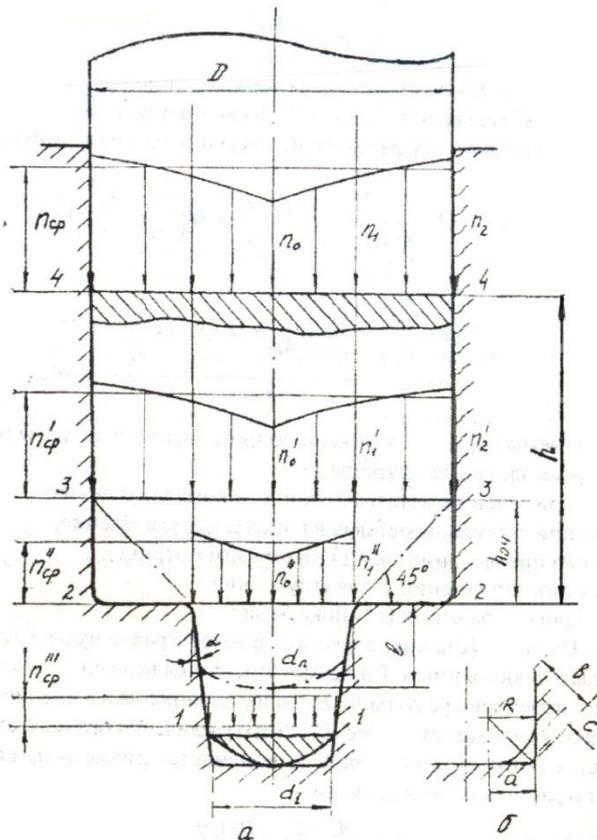


Рис. 2. Упрощенные эпюры относительных контактных напряжений в различных зонах деформации закрытого штампа

Действительно, при штамповке в открытом штампе облойная канавка должна обеспечить подпор, достаточный для оформления поковки. Величина этого подпора равна напряжениям, действующим на контуре поковки ( $n_2$ ,  $n'_2$ ). Если открытый штамп для получения круглой поковки (рис. 2) имеет линию разъема на уровне 4 - 4, то нормальные напряжения, создаваемые облойной канавкой, должны быть равны  $n_2$ . В этом случае заполнение штампа будет протекать без большого отхода металла в облой. В случае разъема открытого штампа на уровне 3 - 3 исходной величиной для расчета размеров облойной канавки является напряжение  $n'_2$ .

Таким образом, знание эпюр контактных напряжений в различных зонах деформируемой поковки позволяет правильно спроектировать технологические процессы штамповки как в закрытых, так и в открытых штампах.

Действительно, при штамповке в открытом штампе облойная канавка должна обеспечить подпор, достаточный для оформления поковки. Величина этого подпора равна напряжениям, действующим на контуре поковки ( $n_2$ ,  $n'_2$ ). Если открытый штамп для получения круглой поковки (рис. 2) имеет линию разъема на уровне 4 - 4, то нормальные напряжения, создаваемые облойной канавкой, должны быть равны  $n_2$ . В этом случае заполнение штампа будет протекать без большого отхода металла в облой. В случае разъема открытого штампа на уровне 3 - 3 исходной величиной для расчета размеров облойной канавки является напряжение  $n'_2$ .

Таким образом, знание эпюр контактных напряжений в различных зонах деформируемой поковки позволяет правильно спроектировать технологические процессы штамповки как в закрытых, так и в открытых штампах.

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА, МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ

Работа выполняется на испытательной машине ЦДМ-10ПУ в специальном штампе. Чертеж штампа приведен на рис. 3.

Штамп состоит из корпуса 3, в который помещается рабочий контейнер 2 с матрицей 4, образующей отросток полости. Деформация заготовки осуществляется пуансоном 1. В штамп встроены два индикатора. Игла индикатора  $A_2$  установлена в углу отростка, что позволяет измерять степень заполнения угла, не прерывая процесса штамповки (измеряется размер  $c$ , смотри рис. 2, а). Вдоль оси штампа установлен подвижный штифт 5, который опирается на подпружиненную шпильку 9. На коническую образующую шпильки опирается игла индикатора  $A_1$ . Такая конструкция позволяет измерить текущую глубину затекания металла ( $l$  на рис. 2) в конический отросток. Зная угол наклона образующей шпильки, можно рассчитать глубину затекания металла в отросток (рис. 3).

Деформации подвергаются свинцовые образцы размером  $\varnothing 49$  мм х 50 мм. Работа выполняется по нескольким вариантам в зависимости от угла наклона конического углубления (угол  $\alpha$  на рис. 2).

Работу можно проводить после инструктажа по технике безопасности на рабочем месте, ознакомления с работой машины, в присутствии лаборанта или преподавателя.

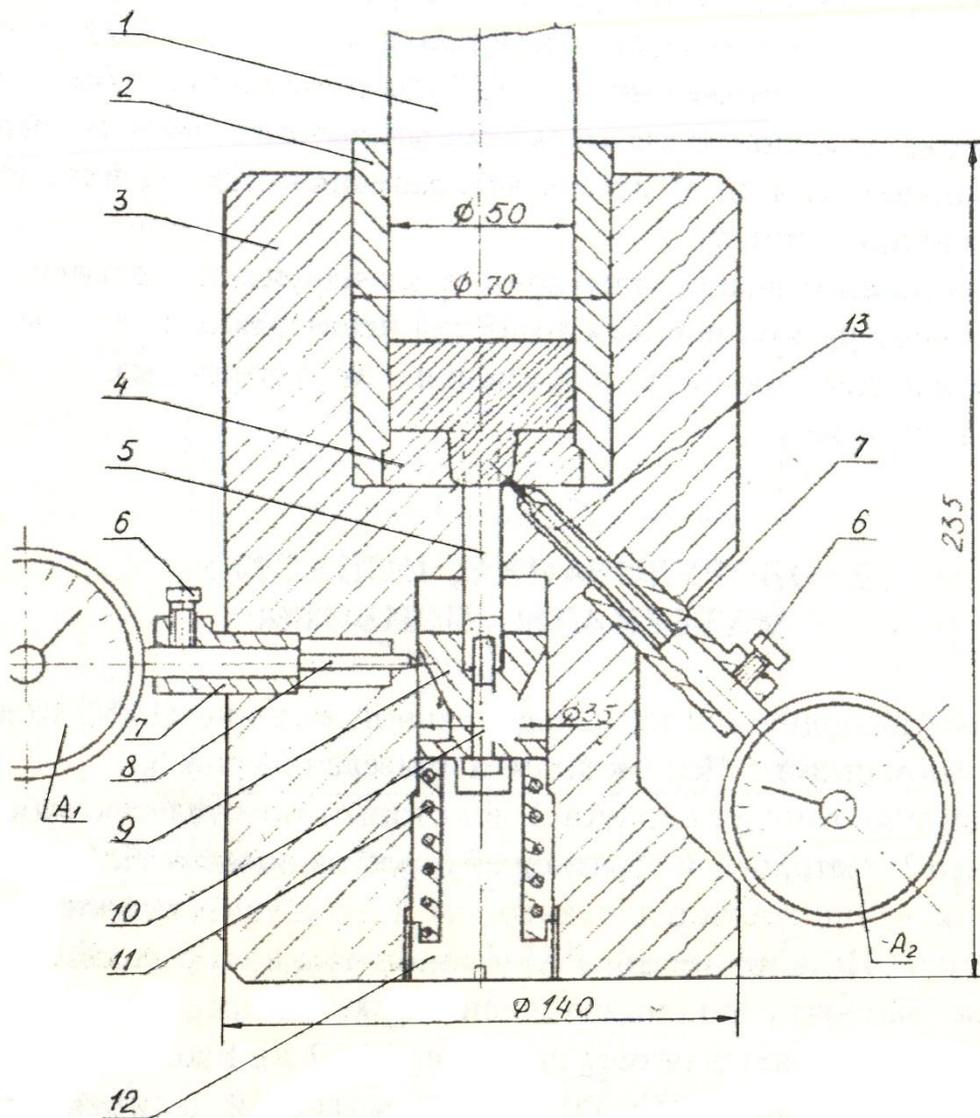


Рис. 3. Общий вид экспериментального штампа

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

#### 3.1. Подготовка штампа к эксперименту

1. Из корпуса штампа вынимается рабочий контейнер 2, пуансон 1 и матрица 4.
2. Устанавливается осевой штифт 5 и индикатор  $A_1$ . Индикатор устанавливается на ноль и контрится винтом. Путем нажатия на штифт необходимо проверить работу индикатора. Этот индикатор будет показывать глубину затекания металла в отросток ( $l_i$ ) на 2-й стадии. Масштаб показаний индикатора определяется перед началом работы.
3. В рабочую полость корпуса штампа опускается пуансон так, чтобы он перекрыл отверстие для выхода иглы из второго индикатора  $A_2$ . В отверстие вставляется игла с индикатором. При установке путем поджатия индикатор необходимо отрегулировать на деление 3 мм и законтрить винтом. После удаления пуансона конец иглы индикатора должен выступать на 3 мм. В ходе эксперимента этот индикатор будет

замерять размер  $c$  (рис. 2,а) на 3-й стадии, изменяющийся от 3 мм до нуля. Осторожным нажатием на иглу необходимо проверить работу индикатора.

4. В корпус штампа осторожно установить рабочий контейнер 2 с матрицей 4. Проверить, чтобы штифт осевого индикатора находился на уровне верхнего торца матрицы, а игла бокового индикатора  $A_2$  - в углу нижнего торца матрицы.

5. Установить штамп на стол испытательной машины, заложить образец и установить пуансон.

6. Рядом со штампом устанавливается специальный ходограф с индикатором  $A_3$ , который позволяет фиксировать ход пуансона ( $h$ ) с точностью 0,01 мм.

### 3.2. Порядок выполнения работы

1. Процесс штамповки ведется при небольшой скорости деформирования.

2. В процессе эксперимента трудно определить момент окончания первой стадии и начало второй. Поэтому на этом этапе ведется одновременная запись трех параметров:

-  $l_i$  - глубина затекания металла в отросток по индикатору  $A_1$ . Этот параметр является ведущим;

-  $X$  - перемещение пуансона, по индикатору  $A_3$  ходографа;

-  $P_{экс}$  - усилие процесса.

Устанавливается следующий шаг замеров по индикатору  $A_1$ :

0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6.

С учетом масштаба фактическая глубина затекания металла в отросток:

$l_i = 0,5M; 1M; \dots 6M$ .

3. Третья стадия процесса начинается с момента начала работы индикатора  $A_2$ . С этого момента ведется одновременная запись следующих параметров:

-  $c$  - глубина затекания металла в угол отростка по индикатору  $A_2$ . Этот параметр является ведущим.

-  $X$  - ход пуансона по индикатору ходографа  $A_3$ ;

-  $P_{экс}$  - усилие процесса.

Устанавливается следующий шаг замеров по индикатору  $A_2$ : 3; 2; 1; 0. При этом показания индикатора  $A_1$  не фиксируются.

4. После окончательного заполнения штампа освобождается индикатор  $A_2$  и делаются дополнительно 1 или 2 замера, характеризующих четвертую стадию. При этом одновременно замеряются два параметра:

-  $X$  - ход пуансона по индикатору ходографа  $A_3$ ;

-  $P_{экс}$  - усилие процесса.

5. После окончания процесса разбирается штамп, выпрессовывается поковка и замеряется высота ее цилиндрической части (размер  $h$  на рис. 2).

6. Результаты экспериментов заносятся в таблицу.

## 4. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Пользуясь табл. 1, построить сводный график результатов эксперимента (рис. 4).

2. Выделить на графике основные стадии процесса, проанализировать их продолжительность и величину усилий на каждой стадии. Определить максимальное усилие процесса, обеспечивающее качество оформления поковки.

3. Пользуясь формулой (13), рассчитать значения осевого нормального напряжения  $n_0$  на 2-й стадии процесса для замеренных значений  $l$  (табл. 1). Высоту металла в контейнере можно принять постоянной ( $h$  из табл. 1). По формулам (10), (11)

и (12) рассчитать соответствующие усилия процесса в каждой точке. Полученные результаты нанести на сводный график (рис. 4)

Таблица 1

*Исходные данные и результаты экспериментов*

Исходные данные (рис.2)				1-я+2-я стадии			3-я стадия				Ход пуансона
D, мм	$d_n$ , мм	$d_1$ , мм	$\alpha^\circ$	$L_i$ , мм	$P_{экс}$ , кН	$P_p$ , мм	c, мм	R, мм	$P_{экс}$ , мм	$P_p$ , мм	X, мм
				$l_1$							$X_1$
				$l_2$							$X_2$
				·							·
				·							·
				$l_n$							$X_j$
							3				$X_{i+1}$
							2				·
							1				·
							0				$X_n$

4. Аналогично по формуле (13) рассчитать несколько значений для замеренных величин радиусов заполнения угла отрезка (табл. 1). По формулам (10), (11) и (12) рассчитать соответствующие усилия процесса в каждой рассматриваемой точке. Результаты отметить на графике (рис. 4).

5. Проанализировать совпадение расчетных и экспериментальных значений усилия на 2-й и 3-й стадиях процесса.

Анализ операции протяжка в программном модуле DEFORM 3D.  
Анализ температурного распределения.

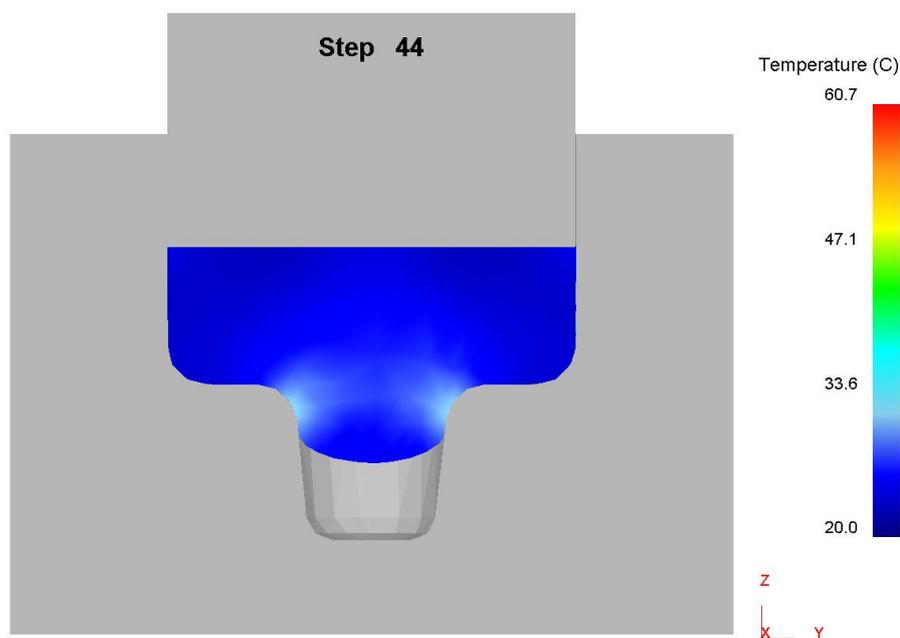
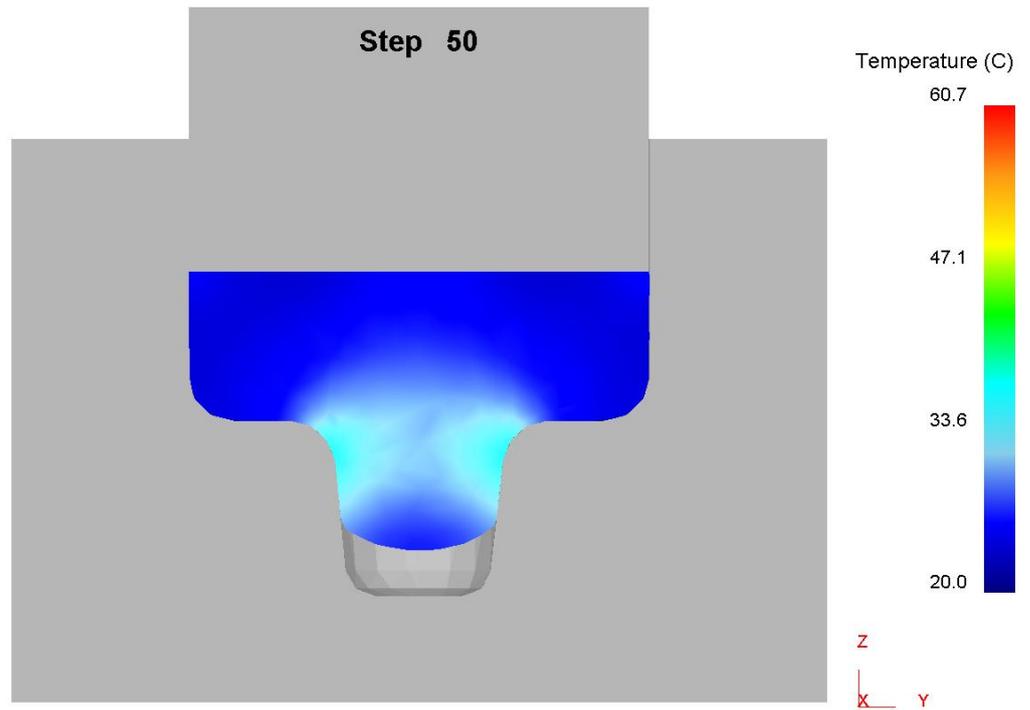
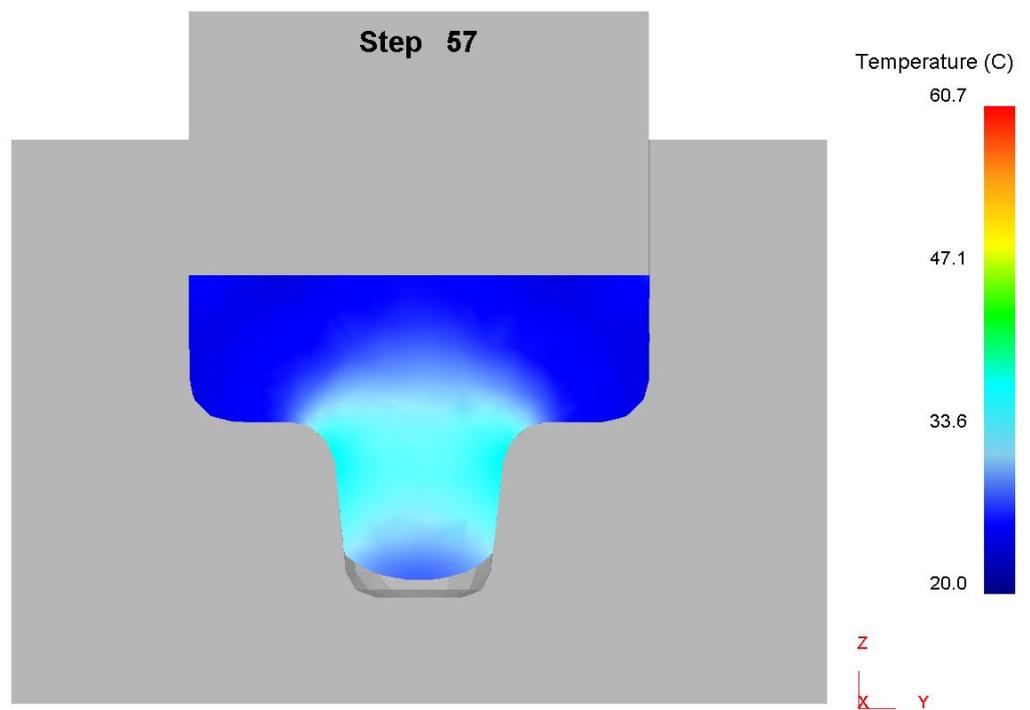


Рис. 1. Этап начала деформации заготовки, начало образования зон температурного распределения у границ контакта заготовки с инструментом. Шаг 44



Шаг 50



Шаг 57

Рис 2. Этапы распределения температуры по всему очагу деформации. Шаг 50 и Шаг 57

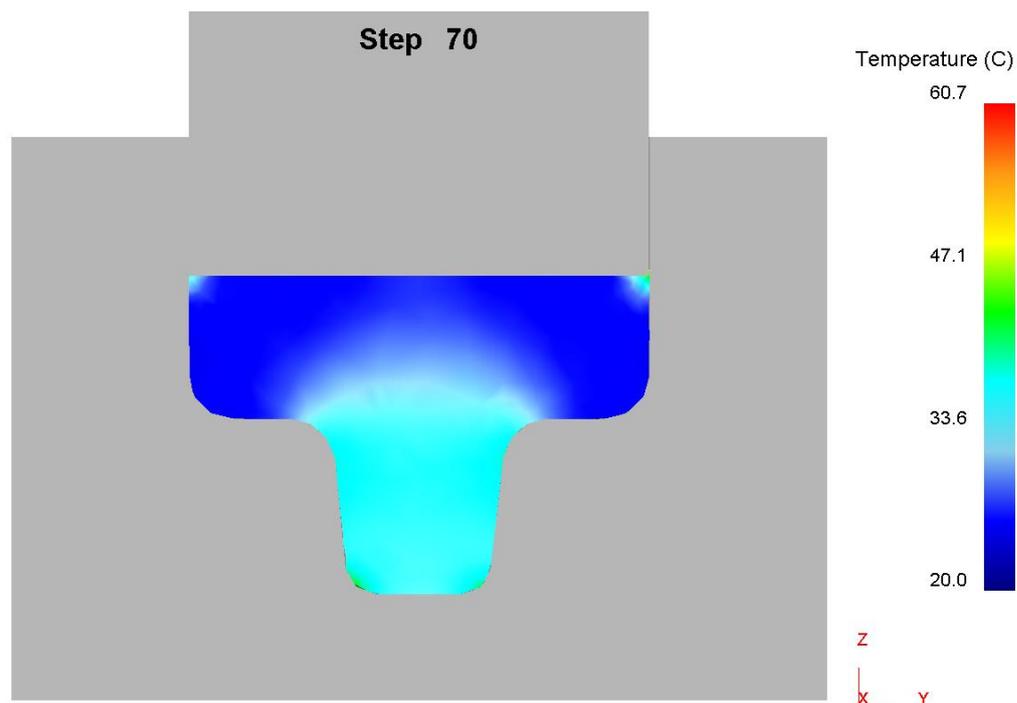


Рис 3. Этап окончательной деформации заготовки – достижение максимума нагрева заготовки в очаге деформации. Шаг 70

Распределение температуры происходит по тем же закономерностям. Ввиду постоянного движения захлаживания в зоне деформации не происходит. По той же причине температурный режим выдержан и по всему объёму заготовки, т.е. она не успевает остыть, что снимает необходимость в дополнительных подогревах в ходе течения процесса.

Анализ напряженного состояния заготовки.

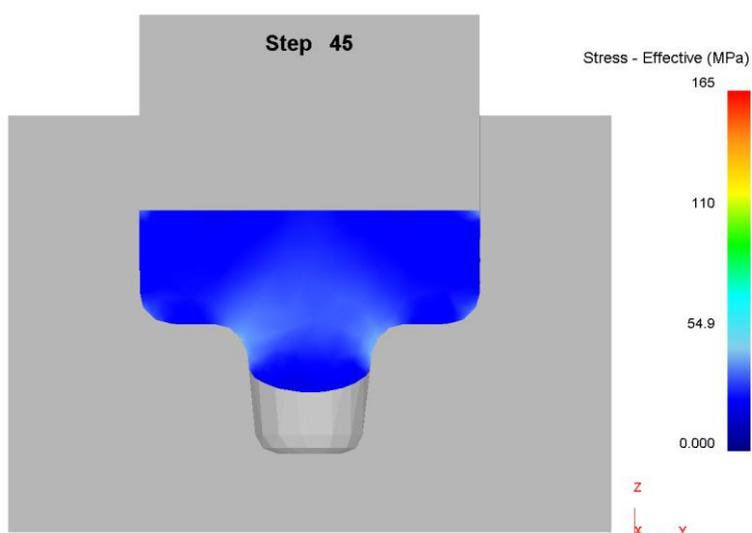


Рис. 4. Напряженное состояния заготовки в очаге деформации. Шаг 45

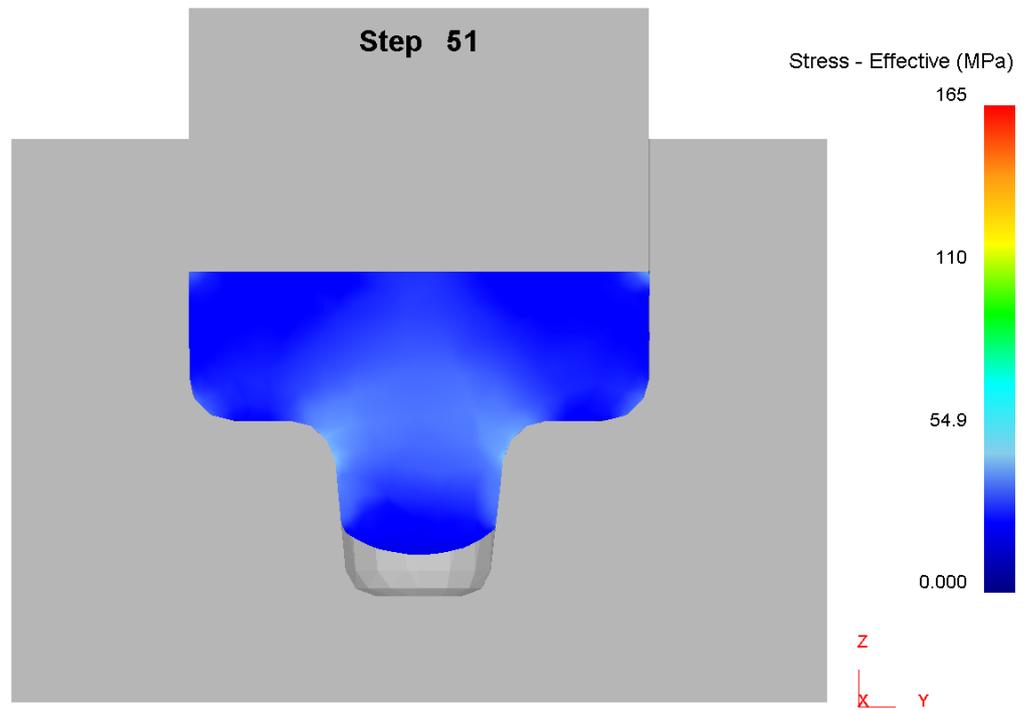


Рис. 5. Напряженное состояния заготовки в очаге деформации. Шаг 51

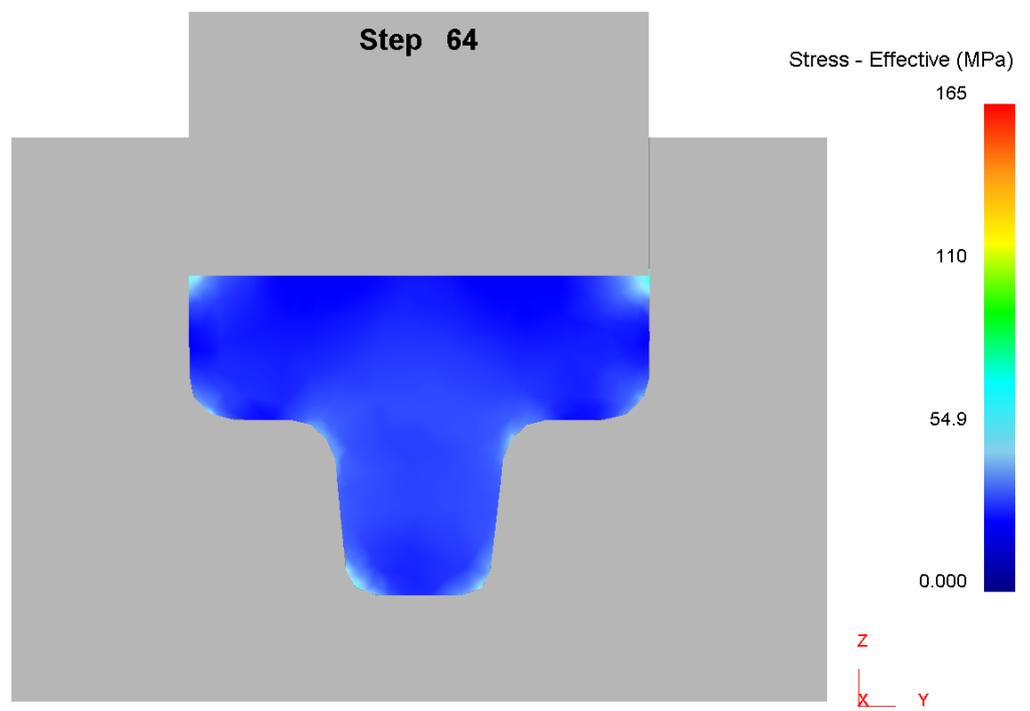
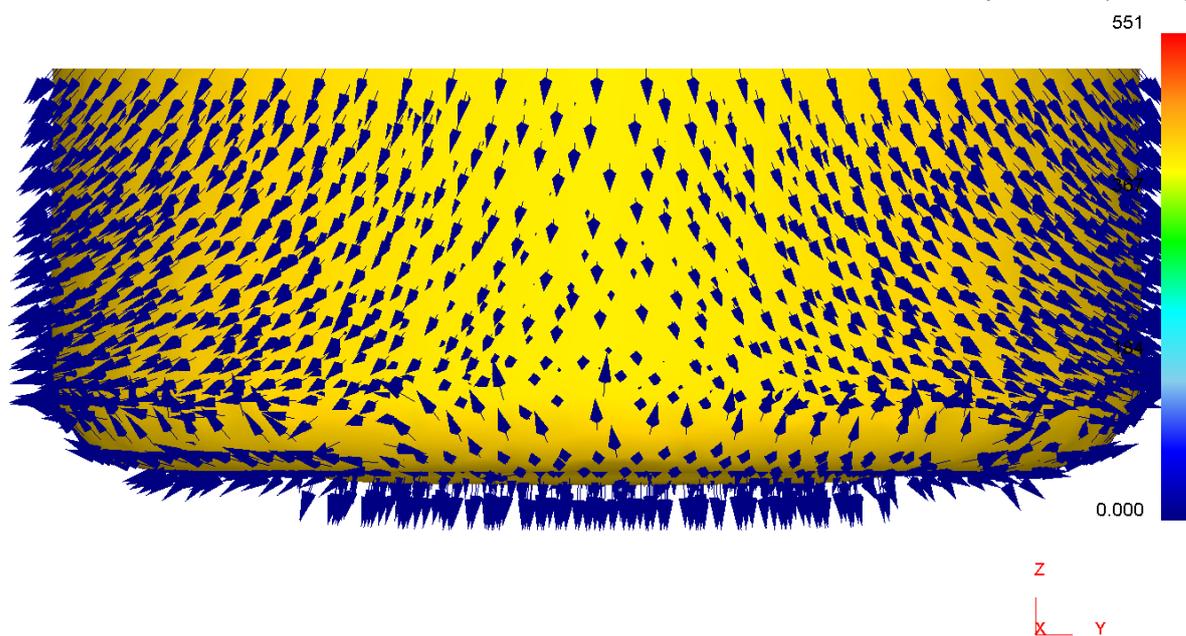


Рис. 6. Напряженное состояния заготовки в очаге деформации. Шаг 64

Анализ течение металла.

Step 35

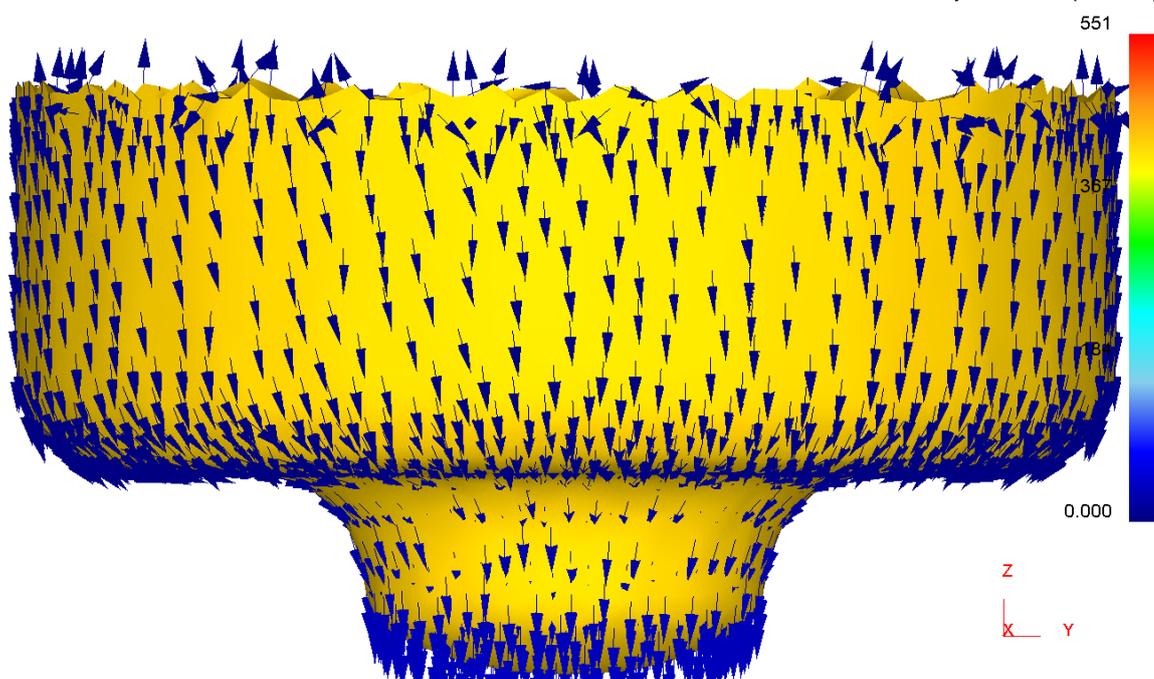
Velocity - Total vel (mm/sec)



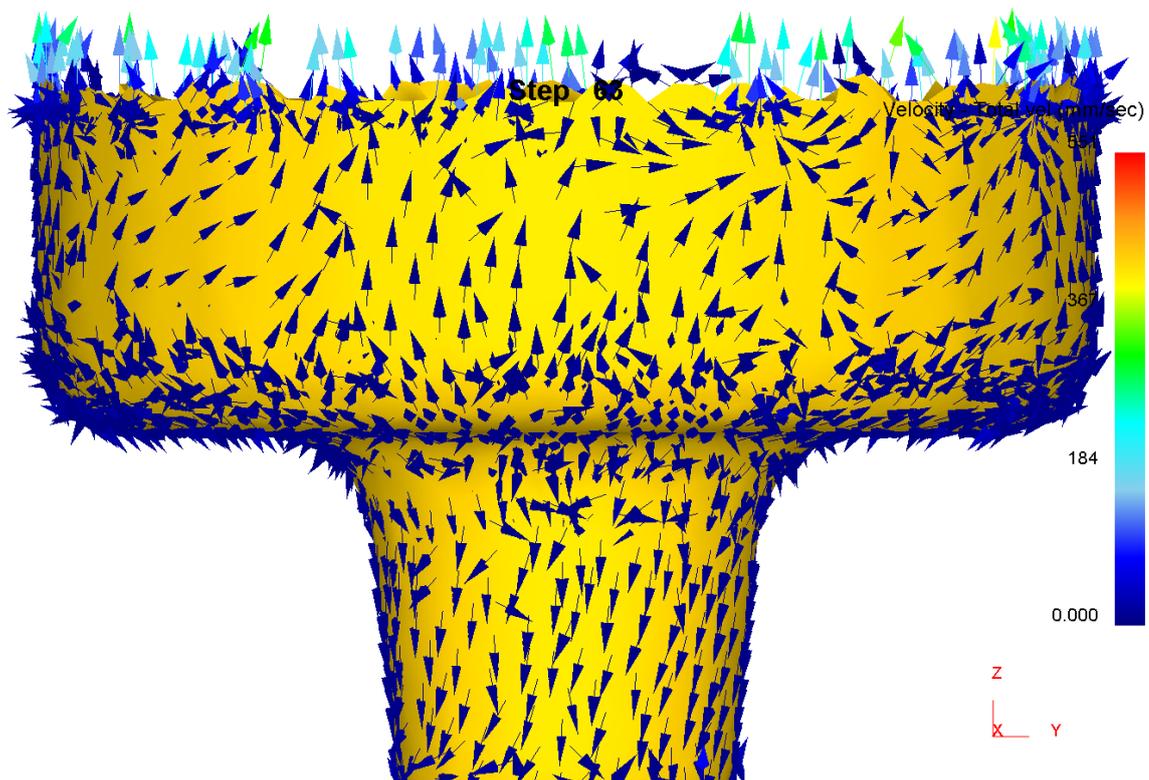
а) Начало заполнения гравюры штампа. Шаг 35

Step 43

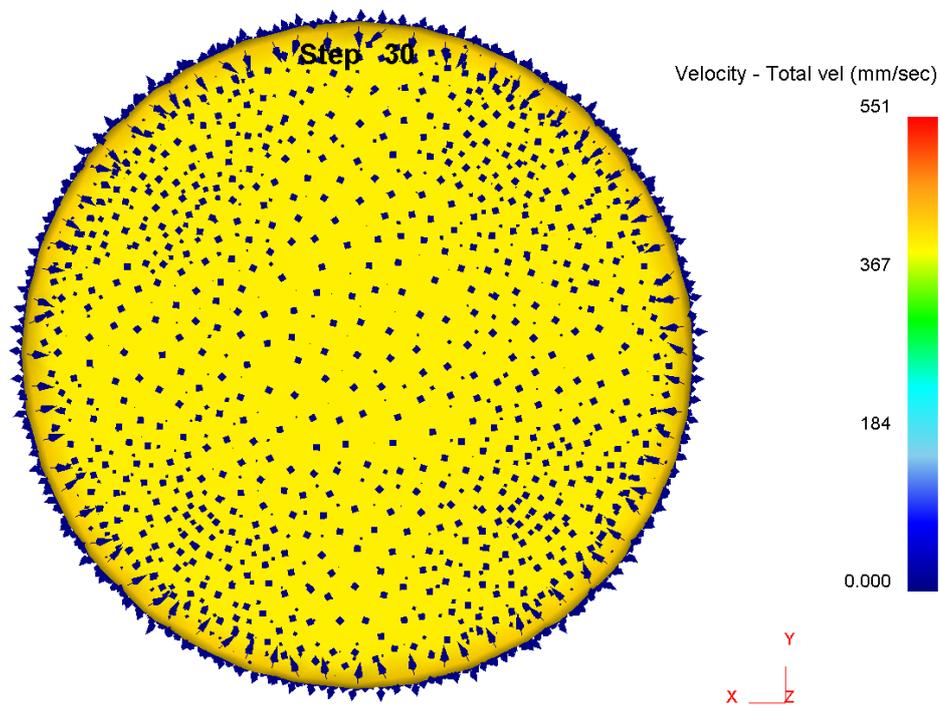
Velocity - Total vel (mm/sec)



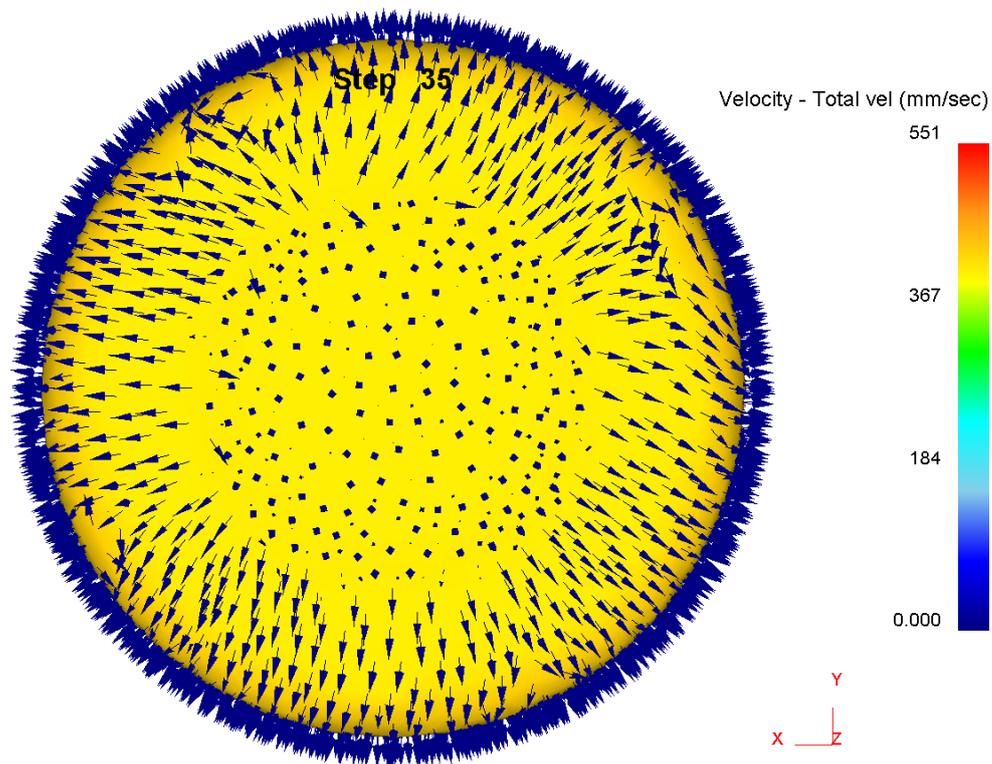
б) Интенсивное затекание металла в гравюру штампа. Шаг 43



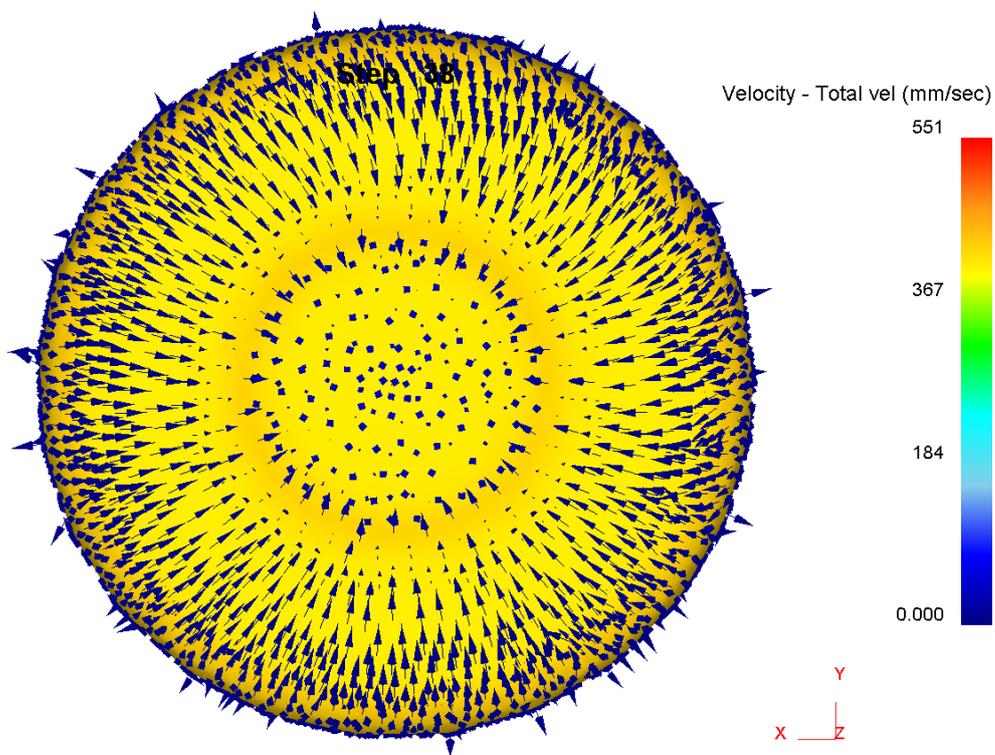
в) Стадия доштамповки. Шаг 65  
Рис. 7.



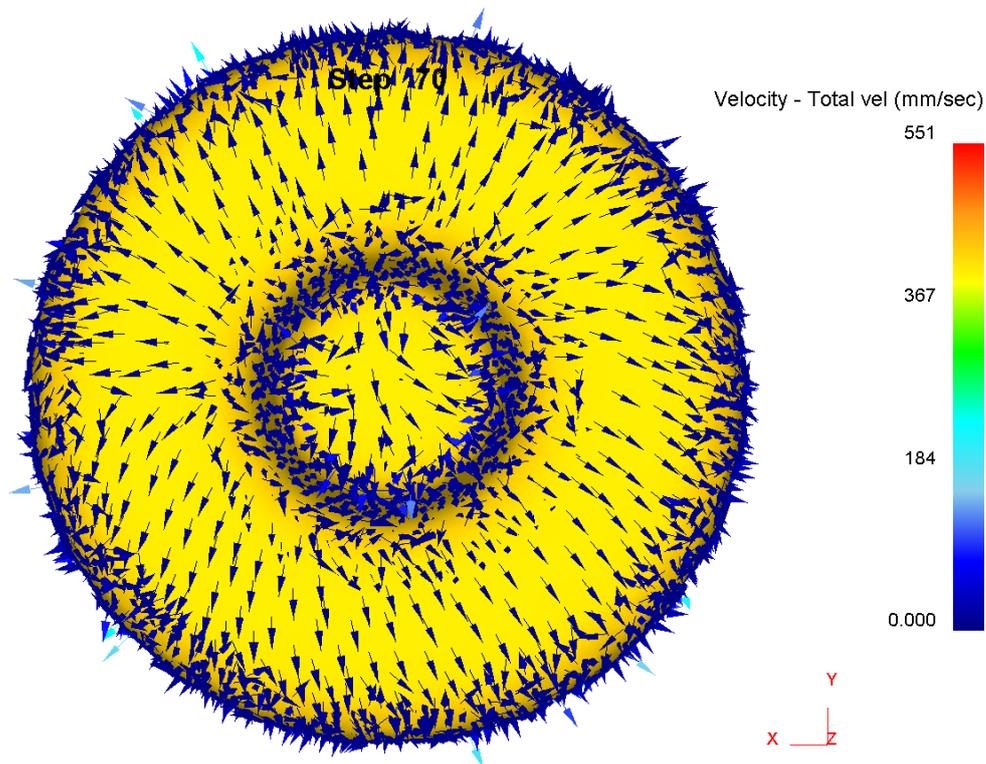
а) Течение металла направленно интенсивно вниз. Шаг 30



б) Металл продолжает затекать в гравюру штампа и происходит заполнение штампа. Шаг 35



в) Стадия интенсивного затекания в гравюру штампа. Шаг 38



г) Стадия доштамповки. Шаг 70

Рис. 8.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Эпюры нормальных напряжений, действующих в полости закрытого штампа.
2. Результаты эксперимента по замеру усилий в виде таблицы.
3. Сводный график результатов эксперимента.
4. Результаты расчета усилий в фиксированных точках процесса ( $P_p$ ).
5. Анализ факторов, вызывающих резкое повышение усилия на третьей и четвертой стадиях процесса.
6. Сравнение минимального заданного радиуса с максимальным усилием, связанным с размещением избытка металла.

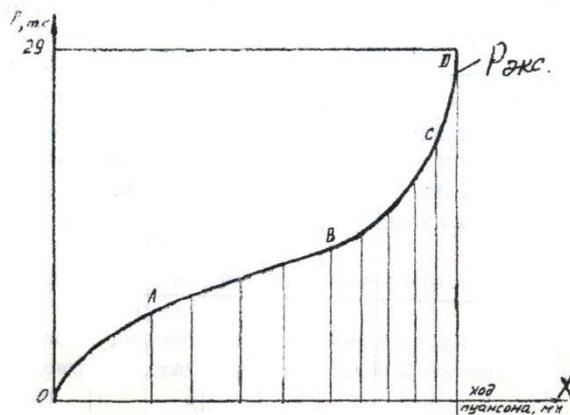


Рис. 4. Сводный график результатов эксперимента

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите характерные стадии заполнения закрытого штампа.
  2. Каковы особенности каждой стадии процесса?
  3. Какие факторы вызывают возникновение четвертой стадии?
  4. Как изменяется форма эпюр нормальных напряжений на каждой стадии процесса?
  5. Какова структура формулы расчета усилия закрытой штамповки?
  6. Какие факторы учитывает каждое слагаемое расчетной формулы?
  7. На каких стадиях процесса работает каждый индикатор?
  8. Как подготовить индикаторы штампа к проведению эксперимента?
  9. Как по индикаторам определить момент окончания второй и третьей стадий?
  10. Как определить минимальное усилие процесса для заданных размеров полости штампа?
  11. Размеры какого элемента штампа оказывают наибольшее влияние на минимальное усилие процесса?
  12. Как размещается в закрытом штампе избыточный объем заготовки?
- Список использованной литературы

1. Ребельский А.В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1965.
2. Журавлев А.З. Основы теории штамповки в закрытых штампах. М.: Машиностроение, 1973.

### Лабораторная работа № 5

#### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ОТКРЫТОГО ШТАМПА

Цель работы: закрепить знания по изучению закономерностей формоизменения заготовки открытого штампа; изучить влияние формы и размеров облойной канавки на величину технологически необходимого объема облоя; получить навыки проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Задание: экспериментально определить технологически необходимый объем облоя для заданных размеров облойной канавки.

#### 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ ОТКРЫТОГО ШТАМПА

Для упрощения анализа формоизменения заготовки в открытом штампе весь процесс условно делят на четыре стадии. На I и II стадиях происходит осадка заготовки до момента начала образования облоя ( $\Delta h_{(I-II)}$  на рис. 1). На III стадии происходит одновременное течение металла в отросток штампа и облойную канавку  $\Delta h_{III}$ .

При смыкании штампов от начальной толщины облоя  $h_3$  и до конечной толщины  $h_{3K}$  (рис. 1) формоизменение заготовки характеризуется разнонаправленными потоками металла: в отросток штампа, заполняемый выдавливанием, и в облойную канавку. Поверхность раздела этих двух потоков можно условно представить в виде цилиндрической поверхности радиуса  $R$ . В зависимости от соотношения сопротивлений течению металла в отросток и в облойную канавку величина радиуса этой поверхности постоянно меняется: интенсивно увеличивается от  $R_1$  до  $R_2$  и достигает максимального

значения  $R_2$  в момент касания металлом дна отростка в конце III стадии процесса. Чем больше значение  $R_2$ , тем интенсивнее идет заполнение штампа и меньше металла поступает в облой. Заполнение углов отростка требует значительного повышения давления, что приводит к уменьшению радиуса раздела потоков металла. После заполнения штампа наблюдается IV стадия процесса, доштамповки на которой происходит вытеснение избытка металла из полости штампа при  $R_3=0$ .

С достаточной для практических расчетов точностью изменение радиуса поверхности раздела можно аппроксимировать в виде отрезков прямых в интервалах  $R_0-R_1$ ,  $R_1-R_2$ . Аппроксимацию можно выполнить методом наименьших квадратов в пределах каждого интервала в виде уравнения

$$h_3 = C_1 + C_2 R, \quad (1)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{\sum_{i=1}^n h_{3i} \sum_{i=1}^n R_i^2 - \sum_{i=1}^n h_{3i} R_i \sum_{i=1}^n R_i}{n \sum_{i=1}^n R_i^2 - (\sum_{i=1}^n R_i)^2}$$

$$C_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n h_{3i} \sum_{i=1}^n R_i - \sum_{i=1}^n h_{3i} R_i \sum_{i=1}^n R_i}{n \sum_{i=1}^n R_i^2 - (\sum_{i=1}^n R_i)^2}$$

$n$  - число экспериментальных точек в пределах каждого интервала.

Кусочно-линейная аппроксимация изменения радиуса поверхности раздела позволяет легко рассчитать объемы металла, смещенные в полость штампа и в облойную канавку на любой стадии или этапе формоизменения. Объем металла, выдавленный в отросток на III стадии процесса, равен объему фигуры, полученной от вращения площади  $V_{\text{выд. III}}$  вокруг вертикальной оси. Учитывая, что эта фигура представляет из себя усеченный конус, получим

$$V_{\text{выд. III}} = \frac{\pi \Delta h_{\text{III}}}{3} (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2). \quad (2)$$

Технологически необходимый объем облоя ( $V_{\text{з техн}}$ ) зависит от принятых размеров облойной канавки и объема заготовки. В целях экономии металла необходимо стремиться к его уменьшению. Этот объем равен объему фигуры, полученной от вращения площади  $V_{\text{з техн}}$  где  $R_{\text{п}}$  - радиус поковки по линии разъема штампов. Аналогично объем металла, вытесненный в облой при доштамповке,

$$V_{\text{здошт}} = \pi R^2 \Delta h_{\text{IV}} \quad (4)$$

общий объем облоя

$$V_{\text{з общ}} = V_{\text{з техн}} + V_{\text{здошт}}. \quad (5)$$

Объем металла, вытесненный в отросток штампа на I и II стадиях,

$$V_{\text{выд(I+II)}} = \frac{\pi \Delta h_{\text{(I+II)}}}{3} (R_0^2 + R_{12}^2 + R_0 R_1). \quad (6)$$

### 1.1. Влияние объема заготовки и размеров мостика на интенсивность заполнения открытого штампа

На рис. 2 показаны кусочно-линейные зависимости изменения радиуса поверхности раздела потоков металла, полученные при штамповке двух образцов разного объема (I и II) для одинаковых конечных размеров облойной канавки. Оба образца обеспечивают качественное заполнение штампа. При штамповке первого образца наблюдается развитая IV стадия. В результате как технологически необходимый объем облоя, так и общий будут большими. При штамповке второго образца объем облоя значительно меньше, так как продолжительность IV стадии минимальна.

Повышение сопротивления облойной канавки с целью уменьшения технологически необходимого объема облоя вызывает значительное повышение усилия процесса и снижает стойкость штампа. На рис. 3 показан характерный график изменения усилия по стадиям процесса. Из графика видно, что наиболее резкое возрастание усилия наблюдается на IV стадии процесса. При этом конечная толщина мостика оказывает существенное влияние на величину максимального усилия.

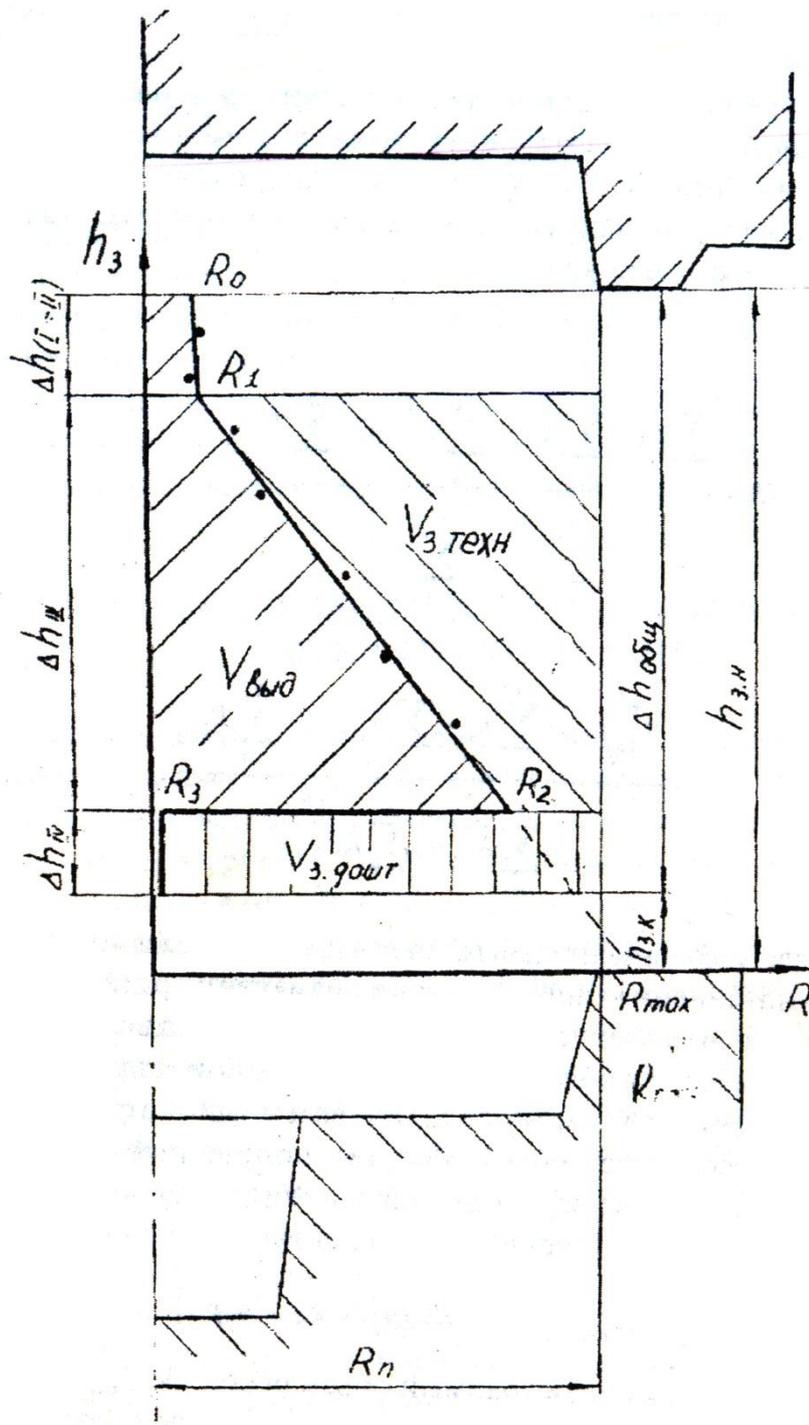


Рис. 1. Схема к расчету смещенных объемов при заполнении открытого штампа (рис. 1) вокруг вертикальной оси. И может быть рассчитан из выражения

$$V_{\text{зтехн}} = \pi R^2 \Delta h_{\text{III}} - V_{\text{выдш}}, \quad (3)$$

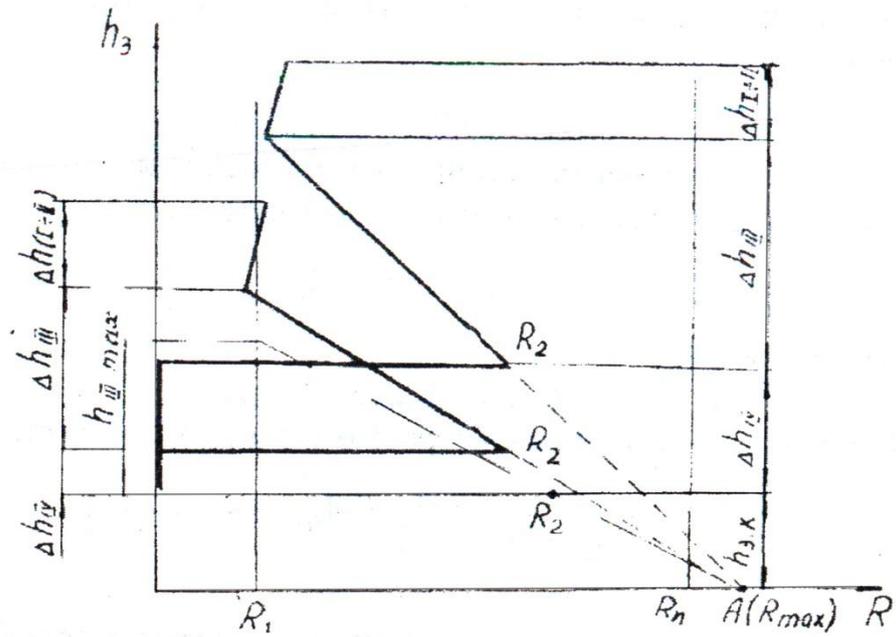


Рис. 2. Изменение радиуса поверхности раздела потоков металла при штамповке заготовок разного объема

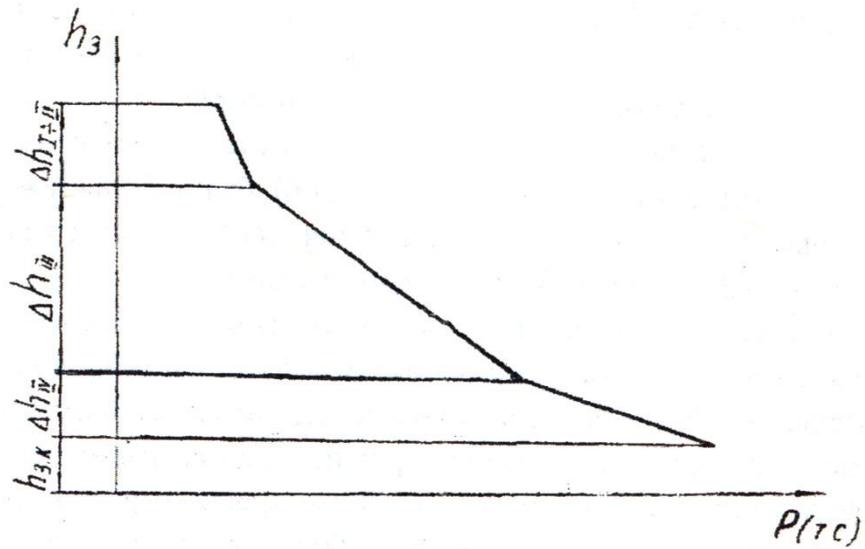


Рис. 3. Изменение усилия по стадиям процесса

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ШТАМПА. ОБОРУДОВАНИЕ. ОБРАЗЦЫ

Эксперименты проводятся в штампе, представленном на рис. 4. Штамп состоит из верхней 1 и нижней 2 половин, которые центрируются в направляющей втулке 3.

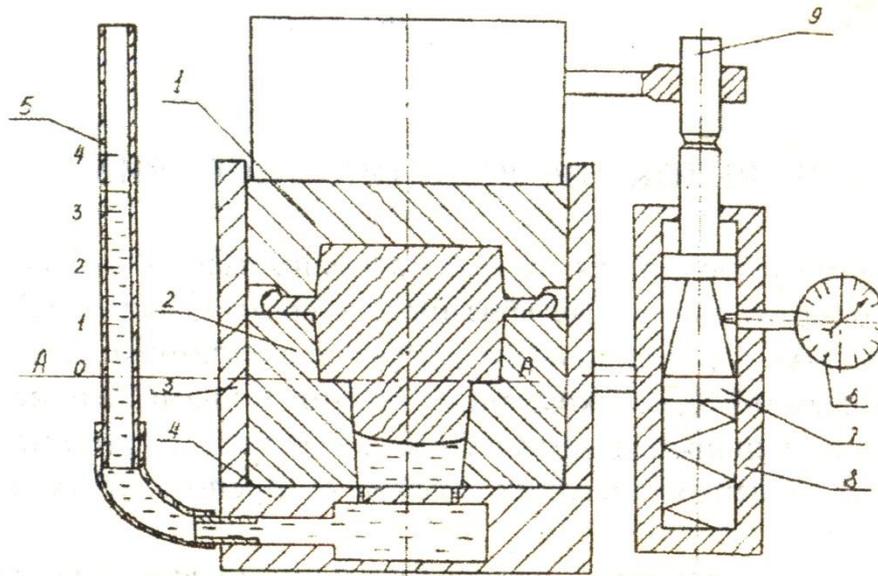


Рис. 4. Схема экспериментального штампа

Полость отростка нижнего штампа соединена через полость подставки 4 с мерительной трубкой 5 и представляет совместно сообщающиеся сосуды. Перед экспериментом в эти полости заливается вода таким образом, чтобы установился общий уровень (AA) в мерительной трубке и по верху отростка нижнего штампа. При штамповке уровень воды в мерительной трубке будет подниматься пропорционально объему металла, выдавленному в полость штампа на любом этапе смыкания штампов. Текущая толщина мостика замеряется ходографом, выполненным на базе индикатора часового типа 6. Подпружиненная коническая шпилька 7 перемещается в корпусе ходографа 8 под действием толкателя 9, соединенного с верхней половиной штампа. Конус шпильки 7 позволяет увеличить масштаб М измерения индикатора.

Конструкция экспериментального штампа позволяет получить данные для расчета условного радиуса раздела потоков металла для любого этапа смыкания штампов. Действительно, если штампы сомкнулись на величину  $\Delta h$ , а в полость штампа вытеснилось  $\Delta V$  металла (объем воды в мерительной трубке изменился на  $\Delta V$ ), то условный радиус раздела потоков металла на этом этапе будет:

$$R = 0,56\sqrt{\Delta V/\Delta h}. \quad (8)$$

### 3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа выполняется на испытательной машине. Деформации подвергаются свинцовые образцы размером  $\varnothing 38$ мм, 65...88 мм. Работу можно проводить после инструктажа по технике безопасности на рабочем месте, ознакомления с работой машины, в присутствии лаборанта или преподавателя. Перед началом эксперимента каждая бригада студентов получает задание от преподавателя, которое содержит:

- форму и размеры мостика облойной канавки, определяемые конструкцией верхней половины штампа;
- свинцовый образец, мерительный инструмент (штангенциркуль, угломер).

### 3.1. Подготовка к эксперименту

По верхней половине штампа измерить размеры мостика:  $b_3$  - ширину,  $\alpha$  - угол наклона. Измерить размеры свинцовых образцов ( $H$  и  $D$ ). Исходные данные занести в табл. 1.

Снять направляющую втулку 3 вместе с ходографом.

4). В полость отрезка нижнего штампа налить воду и установить уровень (АА) (рис. 4).

Собрать штамп без образца, сомкнув верхнюю и нижнюю половины штампа.

Установить показание индикатора  $b$  на ноль и закрепить индикатор винтом.

Вынуть верхнюю половину штампа, установить свинцовый образец, собрать штамп.

Для выравнивания торцов образца нагрузить штамп усилием 2-3 т. Не снимая нагрузки, скорректировать уровень воды в мерительной трубке, установив ноль. Для этого сдвинуть резиновый шланг вдоль мерительной трубки.

### 3.2. Проведение эксперимента

Деформация заготовки в штампе выполняется с небольшой скоростью деформирования на гидравлическом прессе или испытательной машине. В процессе деформации ведется одновременная запись трех параметров:

-  $K$  - показания индикатора ходографа;

-  $V$  - объем воды в мерительной трубке, соответствующий суммарному объему металла, выдавленному в отрезок гравюры;

-  $P$  - усилие процесса.

Ведущим параметром является  $h(K)$ , который фиксируется с шагом в 1 мм. В конце процесса шаг замеров уменьшается до 0,5 мм - 0,1 мм (выбирается произвольно)

В процессе эксперимента необходимо выделить значение  $L$ , при котором металл начнет выдавливаться в облойную канавку. Этот момент определяется визуально и соответствует началу III стадии процесса. Деформацию заканчивать при усилении прессы  $\approx 30-35$  т.

### 3.3. Обработка и анализ экспериментальных данных

1. Результаты прямых замеров записываются в табл. 1.

2. Результаты расчетов (табл. 1):

- текущая толщина мостика ( $h$ ) рассчитывается, начиная с ее конечного значения ( $h_i$ ). Для этого после извлечения поковок из штампа замеряется конечная толщина облоя ( $h_{об}$ ), значение которой присваивается последней толщине мостика, т.е.

$$h_i = h_{об}.$$

Предыдущие значения толщины мостика рассчитываются по схеме:

$$h_{i-1} = h_i + (K_{i-1} - K_i);$$

- продолжительность этапа между двумя последовательными замерами:

$$\Delta h_i = h_{i-1} - h_i;$$

- выдавленный объем металла на каждом этапе  $V_i = V_{i-1} - V_i$ .

- текущий радиус раздела потоков металла  $R_i$  рассчитывается по уравнению (7).

3. Построить экспериментальный график (нанести точки) изменения радиуса раздела потоков в зависимости от толщины мостика  $R_i = f(h_{3,i})$  по аналогии с рис. 1. Выделить точку  $h_{III}$  соответствующую началу III стадии процесса.

4. По уравнению (I) провести аппроксимацию полученных значений на двух участках (I+II стадии и III стадия) и построить по полученным уравнениям кусочно-линейную зависимость (рис. 1, рис. 2).

5. По результатам аппроксимации установить продолжительность стадий заполнения полости штампа ( $\Delta h_{(I+II)}$ ;  $\Delta h_{III}$ ;  $\Delta h_{IV}$ ) и характерные значения условного радиуса раздела потоков металла ( $R_0; R_1; R_2$ ).

6. Рассчитать минимальный технологически-необходимый объем облоя (уравнение 3), объем облоя на стадии доштамповки (уравнение 4) и общий объем облоя (уравнение 5).

7. На полученном графике, добавив по горизонтальной оси шкалу усилий, построить второй график  $P_i = f(h_{3,i})$  (изменение усилия процесса по мере смыкания штампов, рис. 3).

Анализ операции штамповки в открытом штампе в программном модуле DEFORM 3D.

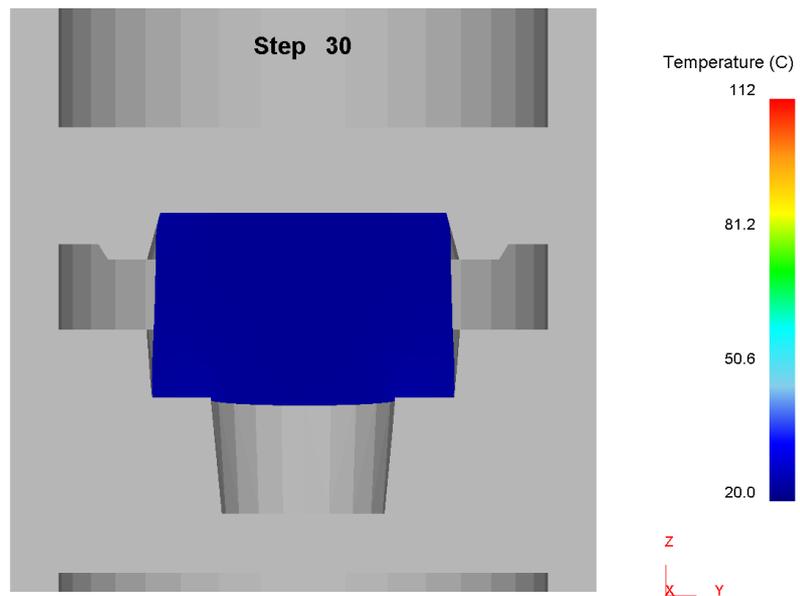
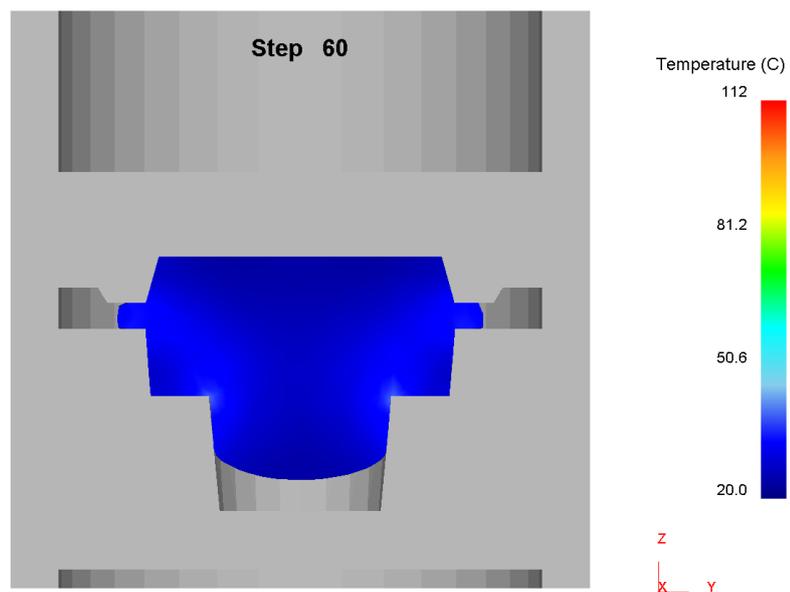
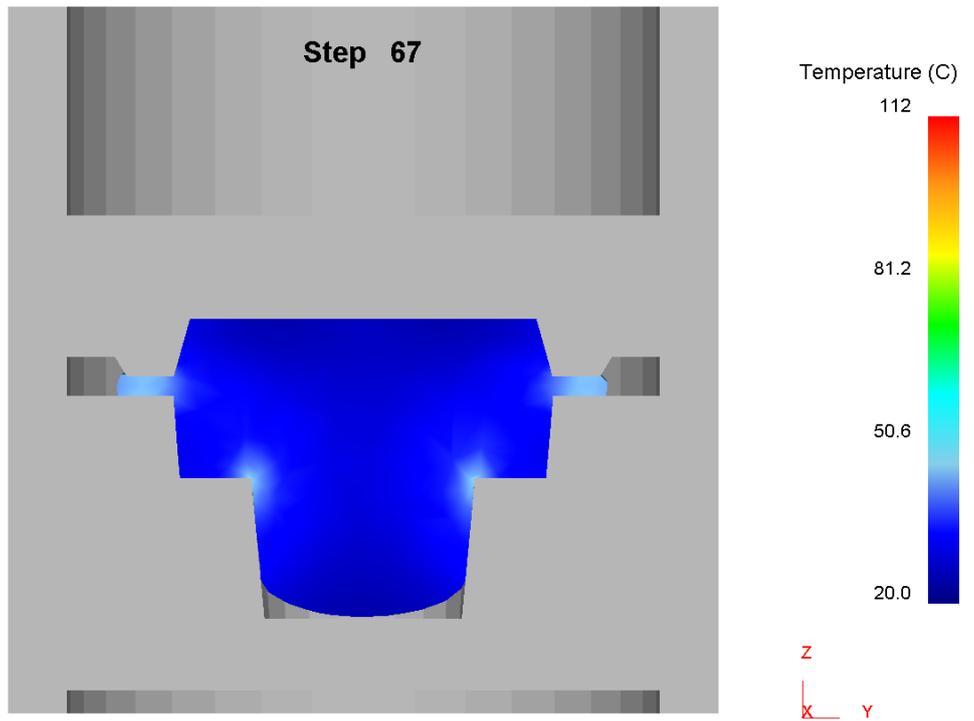


Рис. 1. Начало заполнения штампа. Шаг 30  
Анализ температурного распределения.

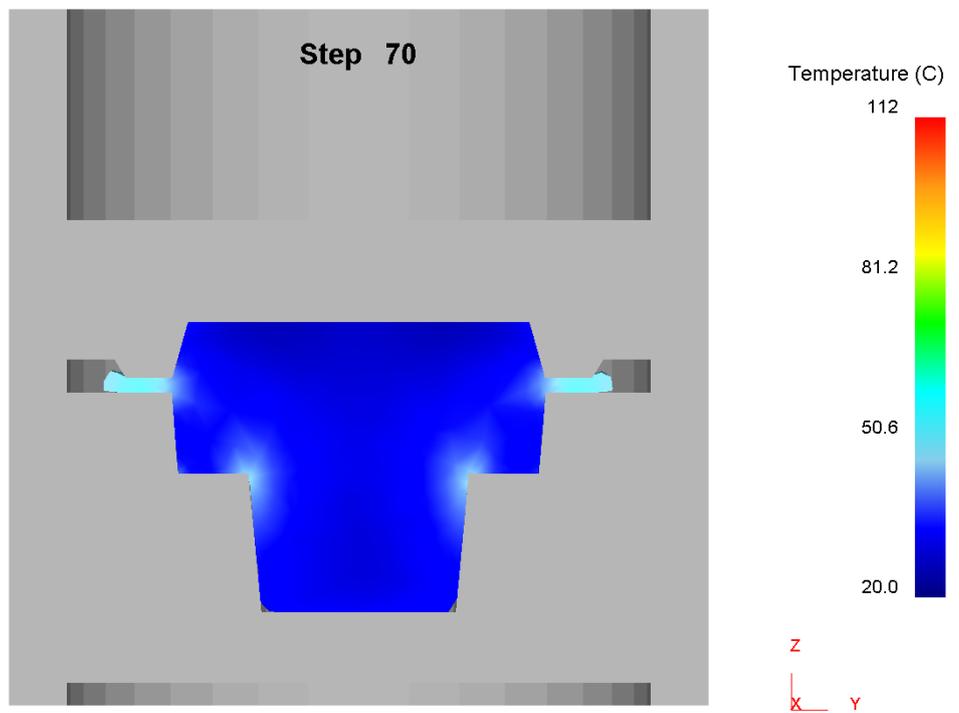


а) Шаг 60

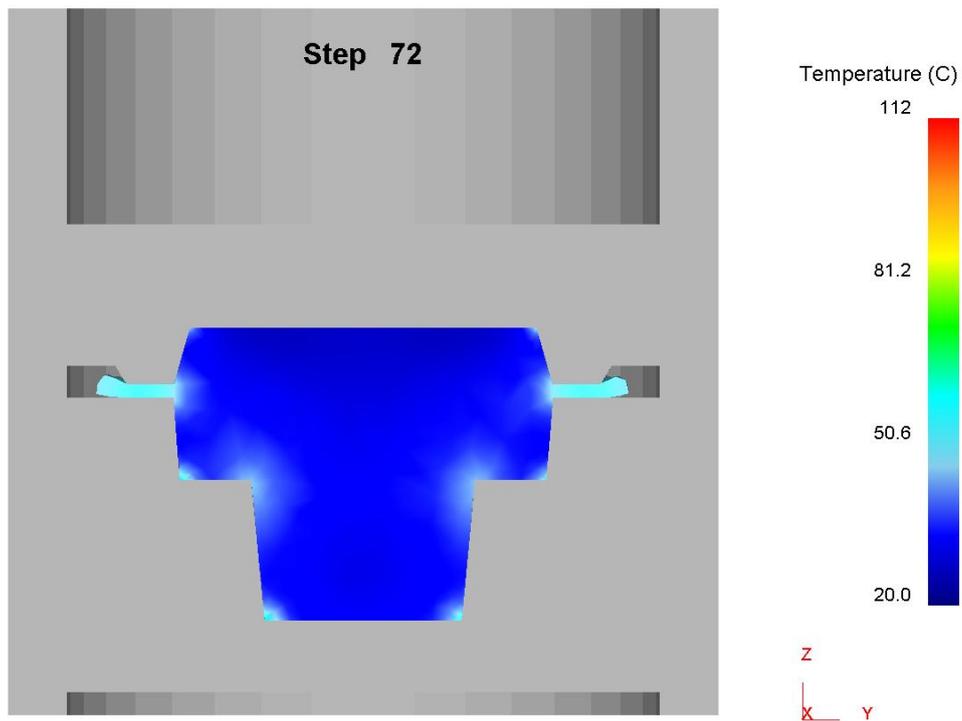


б) Шаг 67

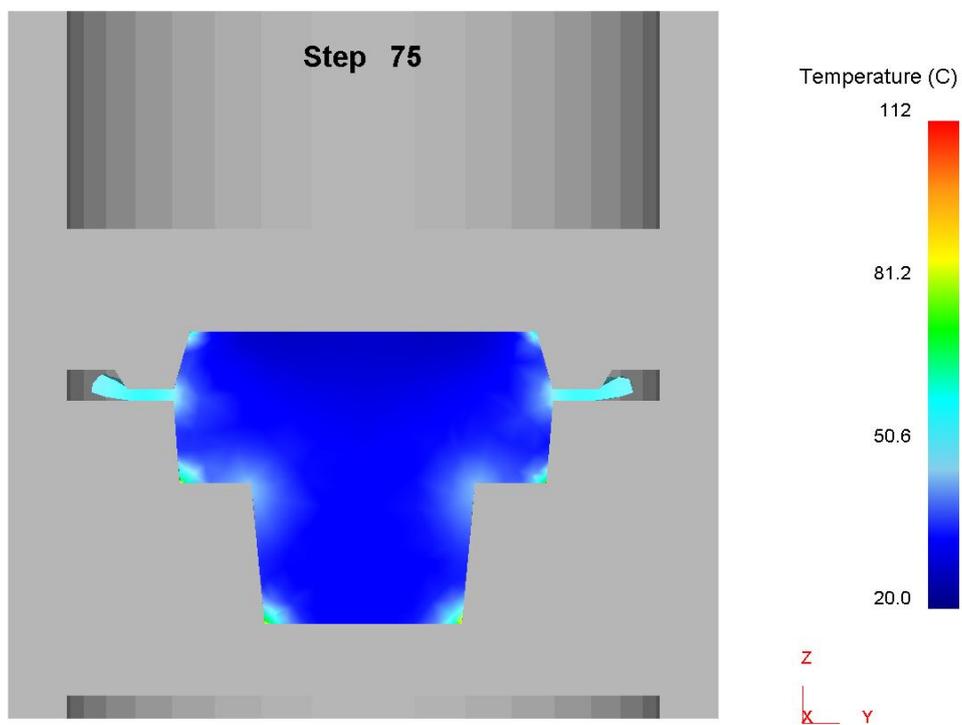
Рис. 2. Этап начала деформации заготовки, начало образования зон повышения температуры у границ контакта заготовки с инструментом.



а) Шаг 70



б) Шаг 72



в) Шаг 75

Рис 3. Этап распределения температуры по всему очагу деформации.

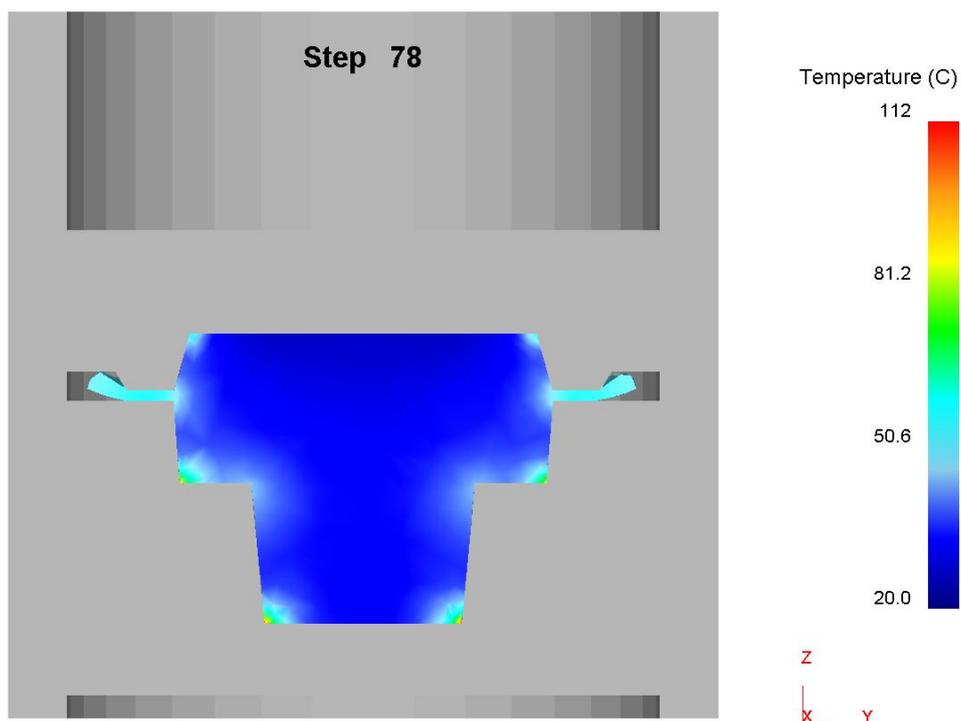
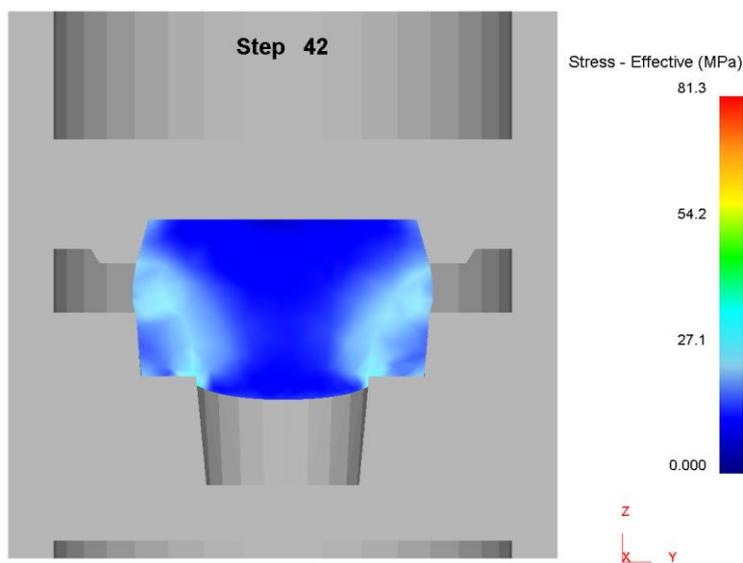


Рис 4. Этап окончательной деформации заготовки – достижение максимума нагрева заготовки в очаге деформации. Шаг 78

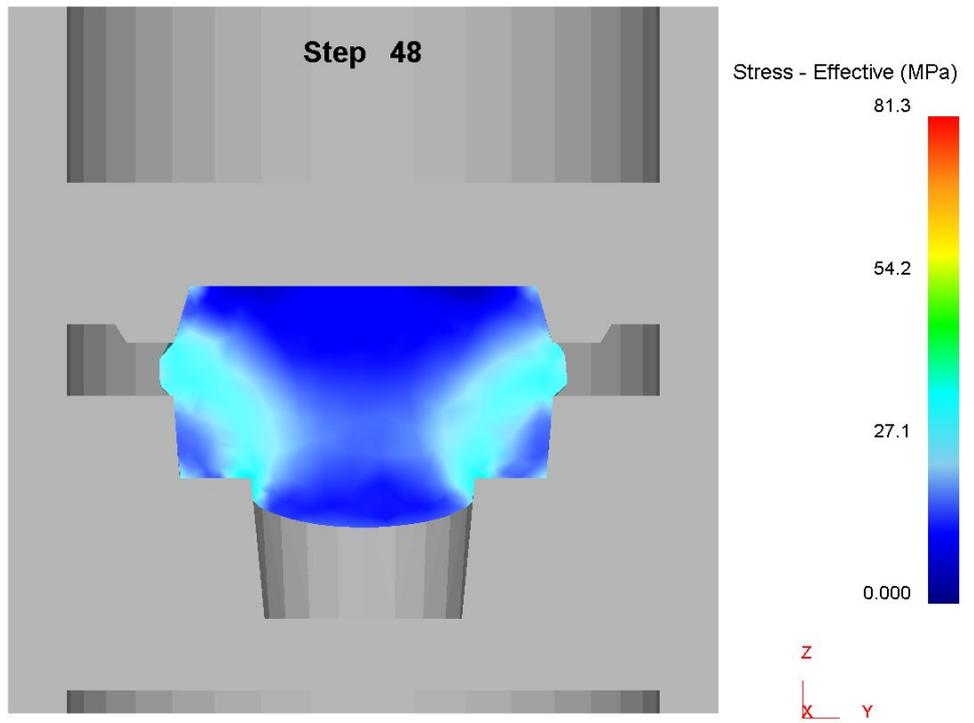
Во время протяжки трение между бойками и заготовкой велики, вследствие чего идет интенсивный разогрев заготовки. Не редко температурный режим в при контактных зонах нарушается.

Распределение температуры происходит по тем же закономерностям. Ввиду постоянного движения захлаживания в зоне деформации не происходит. По той же причине температурный режим выдержан и по всему объёму заготовки, т.е. она не успевает остыть, что снимает необходимость в дополнительных подогревах в ходе течения процесса.

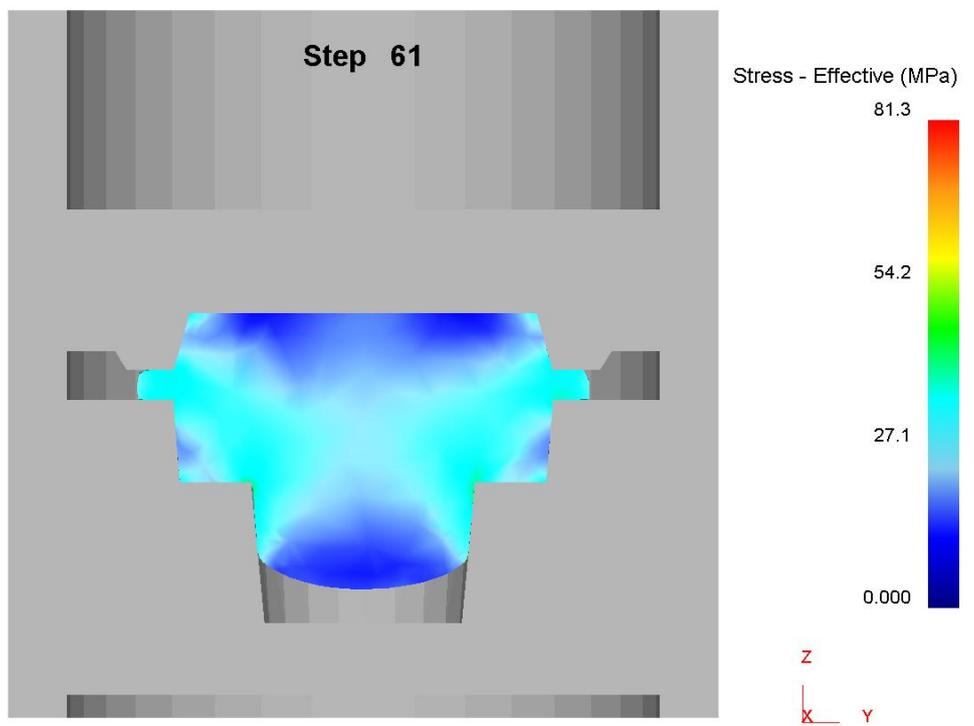
Анализ напряженного состояния заготовки.



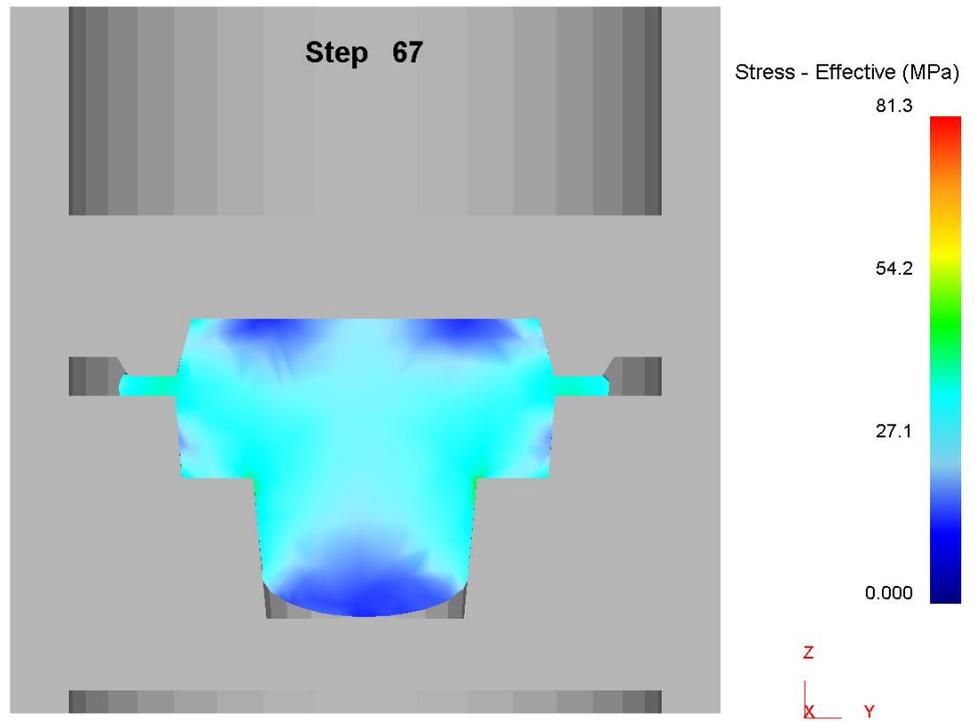
а) Шаг 42



б) Шаг 48



в) Шаг 61



г) Шаг 67

Рис. 5. Напряженное состояние заготовки в очаге деформации.

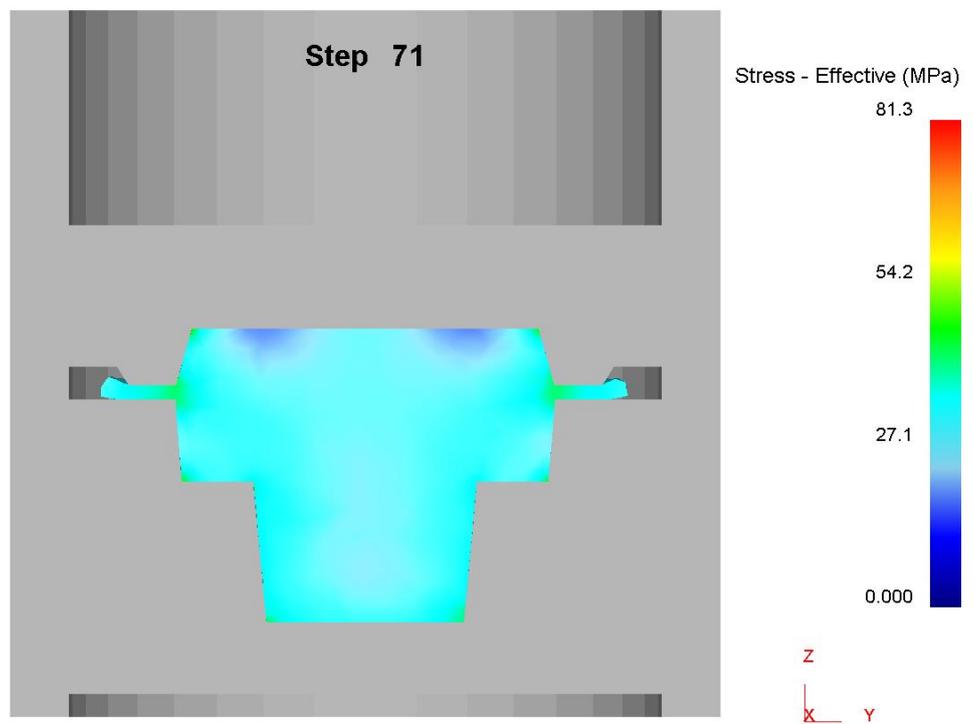


Рис 6. Появление достаточно равномерного напряженного состояния во всем очаге деформации. Шаг 71

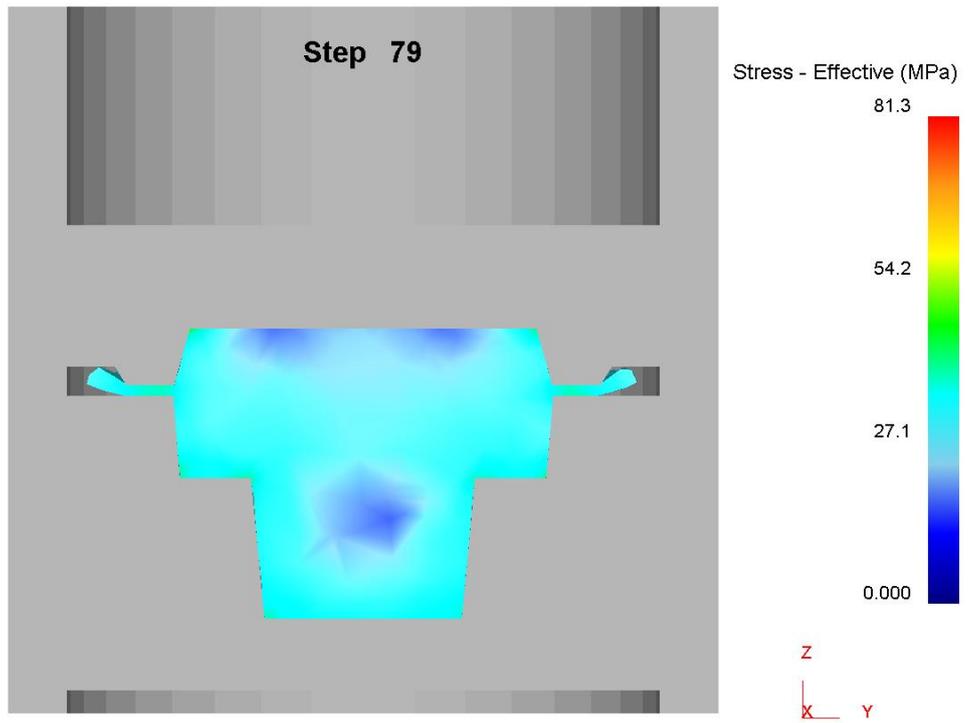
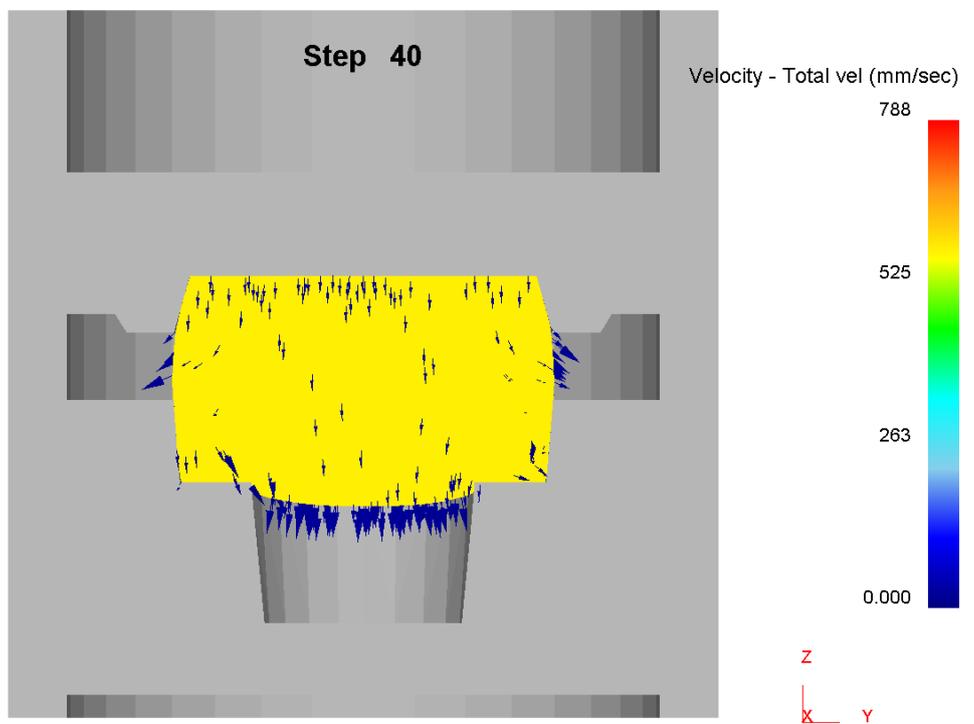
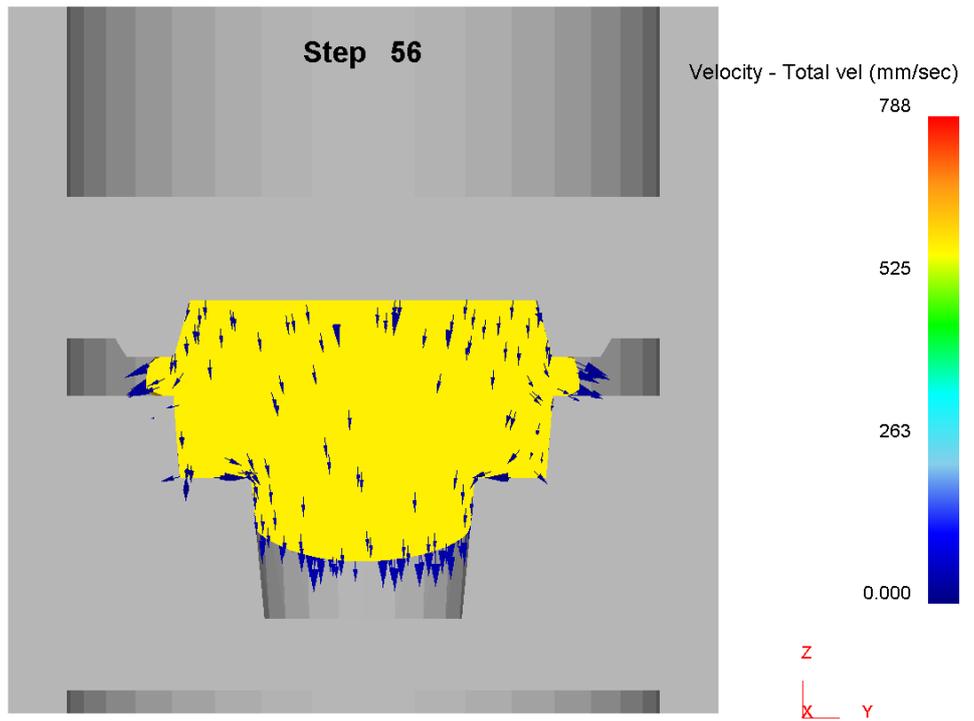


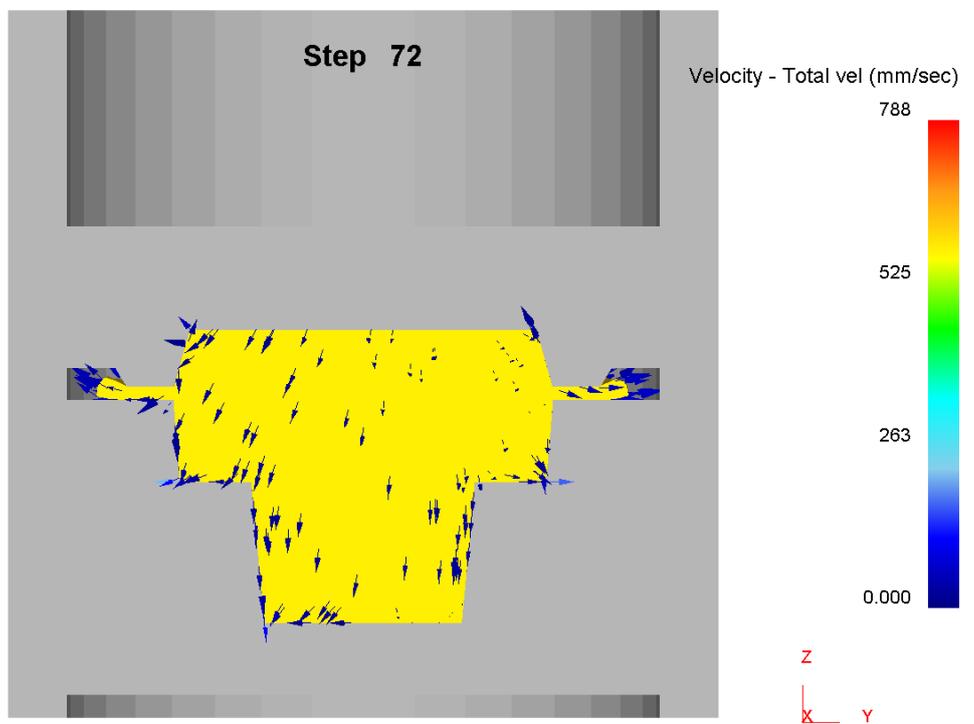
Рис. 7. Напряжение на стадии доштамповки.



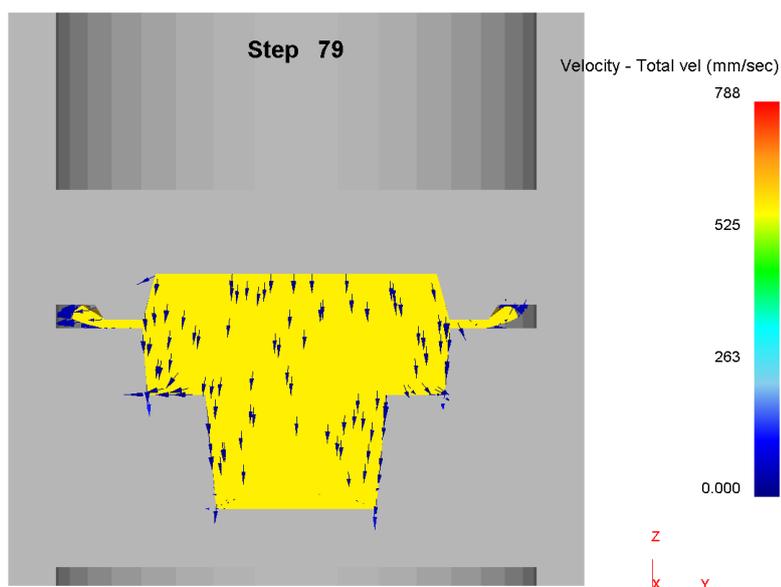
а) Начало заполнения штампа. Шаг 40



б) Интенсивное затекание металла в гравюру штампа и начало затекания в облой. Шаг 56



в) Заполнения гравюры штампа интенсивное затекания металла в облой. Шаг 72



г) Процесс доштамповки. Шаг 79  
Рис. 8.

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Аппроксимированные графики изменения условного радиуса раздела потоков металла.
2. Исходные данные и результаты эксперимента (табл. 1)
3. График изменения усилия по стадиям процесса.
4. Выводы о проделанной работе.

Таблица 1

Исходные данные и результаты экспериментов

Исходные данные				Результаты замеров			Результаты расчётов			
Размеры образца		Размеры мостика		Показания индикатора (К) с учётом масштаба $K=K_i+M$	Суммарный выдавленный объём $V, \text{см}^3$	Усилие $P, \text{т}$	Текущая толщина мостика $h, \text{мм}$	Продолж. этапа $\Delta h, \text{мм}$	Выдавленный объём на этапе $\Delta V_{\text{выд}}, \text{см}^3$	Текущий радиус $R_{\text{тек}}, \text{мм}$
Д	Н	$b_3, \text{мм}$	$\alpha, \text{град}$							
				$K_1$	$V_1$	$P_1$	$h_1$			$R_i$
				$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\Delta h_1 = h_2 - h_1$	$\Delta V_1 = V_2 - V_1$	$\cdot$
				$K_{i-1}$	$\cdot$	$\cdot$	$h_{i-1}$			$\cdot$
				$K_i$	$V_i$	$P_i$	$h_i$	$\Delta h_2 = h_3 - h_2$	$\Delta V_2 = V_3 - V_2$	$R_i$
								$\Delta h_i$	$V_i$	

Примечание: М - масштаб показаний индикатора.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Стадии заполнения штампа при открытой штамповке. Признаки начала и окончания каждой стадии.
2. Назначение облойной канавки.
3. Технологически необходимый объем облоя. На какой стадии он образуется?
4. Общий объем облоя. Чем он отличается от технологически необходимого?
5. Что подразумевается под условной поверхностью раздела потоков металла при заполнении открытого штампа?
6. Какой характер изменения радиуса условной поверхности раздела потоков металла по стадиям процесса штамповки?
7. В какой момент заполнения штампа условный радиус достигает максимального значения?
8. Как по известному графику изменения условного радиуса раздела потоков металла рассчитать объем выдавленного в полость штампа металла, общий и технологически необходимый объемы облоя?
9. Какими способами можно уменьшить технологически необходимый объем облоя?
10. Какая стадия процесса определяет максимальное усилие оборудования?
11. На какой стадии процесса происходит наиболее интенсивное заполнение штампа?
12. Как можно увеличить максимальное значение радиуса условной поверхности раздела металла?

### Список использованной литературы

1. Сторожев М.П., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977.