

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

И. П. Попов

**Процессы формообразования листовой заготовки с учетом
заданной толщины детали**

Электронное учебное пособие

САМАРА
2011

Автор: **Попов Игорь Петрович**

Попов, И. П. Процессы формообразования листовой заготовки с учетом заданной толщины детали [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / И. П. Попов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (2,87 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Листовая штамповка характеризуется тем, что заготовка имеет один из параметров (размер-толщина) намного меньший двух других (листовой материал, рулон, полосы, трубы, профиль). Формообразование производится в штампах на штамповом оборудовании.

В данном учебном пособии представлены способы штамповки, отличные от традиционных, и их можно отнести к специальным способам штамповки в рамках одного или нескольких процессов. В пособии рассмотрены некоторые специальные способы формообразования основных процессов: вытяжки, обжима, осадки, формовки, отбортовки, раздачи.

Пособие предназначено для бакалавров инженерно-технологического факультета, обучающихся по направлению 150700.62 «Машиностроение» по дисциплине «Технология холодной штамповки», для 7 семестра.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 НАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ	8
2 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАДАННОЙ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛИ	9
3 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛИ	11
3.1 НАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПОСОБОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ	12
3.2 НАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА	23
4 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛИСТОВОМ МАТЕРИАЛЕ	30
4.1 ОЦЕНКА ШТАМПУЕМОСТИ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ	30
4.2 ОЦЕНКА ШТАМПУЕМОСТИ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОБАМ	30
4.3 КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ШТАМПУЕМОСТИ	31
4.3.1 КРИТЕРИЙ ТОМЛЁНОВА	32
4.3.2 КРИТЕРИЙ КОЛМОГОРОВА	33
4.3.3 КРИТЕРИЙ ЭЙЛЕРА	33
5. РЕЗКА	33
5.1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗКИ	37
5.2 ОСОБЕННОСТИ ВЫРУБКИ И ПРОБИВКИ	38
5.3 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЗА	38
5.3.1 СОЗДАНИЕ БОЛЬШИХ УСИЛИЙ ПРИЖИМА	39
5.3.2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕБЕР ЖЁСТКОСТИ	39
5.3.3 ВЫРУБКА, ПРОБИВКА, ПУАНСОНОМ ПОЛНЕЕ МАТРИЦЫ	40
5.4 СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ УСИЛИЯ РЕЗА	40
6 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПЕРАЦИЯХ ВЫТЯЖКИ И ОБЖИМА	41
6.1 ВЫТЯЖКА	41
6.1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ВЫТЯЖКЕ	44
6.1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫТЯЖКЕ	51
6.1.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ	52
6.1.2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ	52
6.1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ	54
6.1.2.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПЕРЕХОДОВ ПРИ ВЫТЯЖКЕ	59
6.2 ОБЖИМ	62
6.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБЖИМЕ	65
6.2.2 РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБЖИМЕ	66
6.2.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ	67
6.2.2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИМА	69
6.2.2.3 РАСЧЕТ ЧИСЛО ПЕРЕХОДОВ ПРИ ОБЖИМЕ И ПРЕДЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЖИМА	70
6.2.2.4 ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБЖИМА	72
6.2.2.5 ОСОБЕННОСТИ ОБЖИМА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТАКАНА (РИСУНОК 62)	75
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	77

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

$\sigma_\rho = \sigma_h; \sigma_\theta; \sigma_H$ - напряжения в меридиональном, широтном, направлении и в направлении перпендикулярном срединной поверхности листовой заготовки;

$R_\rho; R_\theta$ - радиусы кривизны бесконечно малого элемента в меридиональном и широтном направлениях;

$e_\rho; e_\theta; e_s$ - деформации бесконечно малого элемента в меридиональном, широтном направлениях и по толщине;

f - коэффициент трения;

μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;

$dl_H; dl$ - длины бесконечно малого элемента до и после деформации;

r - координата рассматриваемого бесконечно малого элемента до деформации.

ВВЕДЕНИЕ

Листовая штамповка характеризуется тем что заготовка имеет один из параметров (размер-толщина) намного меньший двух других (листовой материал, рулон, полосы, трубы, профиль). Формообразование производится в штампах на штамповом оборудовании.

Штамп - это устройство, которое имеет возможность повторять движения, величина хода которых соизмерима с размерами штампа.

Листовая штамповка нашла себе применение благодаря:

1. Большой номенклатуре деталей из листа.
2. Низкой себестоимости изделий.
3. Высоким эксплуатационным качествам изделия.

К основным понятиям в листовой штамповке относятся:

- Процесс – характеризуется схемой напряженно-деформированного состояния. В листовой штамповке существует 8 схем напряженно-деформированного состояния, относящимся к процессам:

4. Резка.
5. Гибка.
6. Вытяжка.
7. Обжим.
8. Раздача.
9. Отбортовка.
10. Формовка.
11. Осадка.

- Способ – это схема приложения внешних сил, с помощью которых реализуется процесс.

- Операция – это способ со вспомогательными приемами (предварительная смазка, передача заготовки, удаление детали и. т.п.).

- Технологический процесс – это последовательность операций для изготовления детали.

- Технологические параметры – это объективные показатели (усилие, число переходов и т.д.) технологического процесса.

Большое количество деталей авиационной техники изготавливают по технологии, в которой заложены инструментальные процессы штамповки. К ним в первую очередь относятся процессы вытяжки, обжима, раздачи, отбортовки, осадки, формовки.

К деталям авиационной техники предъявляются высокие требования по точности, надежности в эксплуатации. Задача технолога состоит в том, чтобы спроектировать технологический процесс с минимальным числом переходов, высоким коэффициентом использования материала. Кроме того, полученная деталь должна удовлетворять заданным эксплуатационным характеристикам. Важное место в достижении этого результата должно уделяться вопросам технологии, которые учитывают разнотолщинность получаемых в результате листовой штамповки деталей.

Известно, например, что разнотолщинность многократной вытяжки составляет 50-100%. Это является одной из основных причин уменьшения степени формообразования на последующих операциях штамповки, снижения коэффициента использования материала, т.к. не всегда полученный характер изменения толщины, ее величина на штампованной детали соответствует эксплуатационным характеристикам. Находят выход в том, что исходную толщину заготовки выбирают завышенной на определенную величину разнотолщинности. Для деталей авиационной техники, подвергающихся механической обработке, положение ухудшается тем, что увеличивается трудоемкость механической обработки из-за дополнительного объема металла, снимаемого в стружку. Поэтому с технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленнно изменял толщину заготовки.

В первую очередь этого можно достичь последовательным совмещением разных схем напряженно-деформированного состояния для всей заготовки или отдельных ее участков, как в однопереходных, так и многопереходных процессах.

Такой подход, во-первых, дает возможность вести формоизменение на

каждой операции с максимальными коэффициентами даже для деталей, имеющих жесткие ограничения по толщине стенки. Это объясняется тем, что, накладывая на элементы заготовки разные схемы напряженно-деформированного состояния, на последующих операциях можно компенсировать полученное ранее утонение или утолщение, во-вторых, получать техпроцессы с более высоким коэффициентом использования металла.

Во вторую очередь направленно изменять толщину заготовки, приближая ее к заданной, возможно путем использования технологических параметров процесса: исходными размерами заготовки, трением, геометрией инструмента, граничными условиями. Последние обстоятельства приводят к способам штамповки, отличным от традиционных, и их можно отнести к специальным способам штамповки в рамках одного или нескольких процессов. Рассмотрим некоторые специальные способы формообразования основных процессов: вытяжки, обжима, осадки, формовки, отбортовки, раздачи.

1 НАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

Удовлетворить требования, предъявляемые к деталям авиационной техники, возможно, если выполнить условия:

$$\iint_F (S_q - S_T)^2 dF \longrightarrow \min, \quad (1.1)$$

где S_q – заданная толщина детали;

S_T – технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки;

F – площадь детали по срединной поверхности.

Выражение (1.1) является функционалом. Он требует приближение технологически возможной толщины S_T к заданной толщине детали S_q при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин.

Рассмотрим на примере, каким образом выполнение условия (1.1) дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысит эксплуатационные характеристики детали. На рисунке 1А показана осесимметричная деталь с характерным изменением толщины, полученной после вытяжки в традиционных условиях [1], т.е. вытяжки с технологическими параметрами, рассчитанных с использованием справочной литературы [2]. Техническими условиями оговорена минимально допустимая толщина стенки S_{min} . Видно, что деталь относительно исходной толщины заготовки S_q в зоне радиусного закругления r_n получила утонение, а на торце – утолщение. Кроме того, сам торец заготовки по окружности имеет неравномерное утолщение из-за наличия фестонов. Последние придают вытянутой детали и разную по окружности высоту от H_{min} до H_{max} . Если предположить, что при определенных условиях можно получить деталь с теми же размерами (d_q, r_n) с толщиной одинаковой по всей поверхности, причем значение толщины будет соответствовать минимально допустимому значению $S_q = S_{min}$, то при равенстве в обоих случаях (рисунок 1А, рисунок 1Б) диаметров и толщин исходных заготовок

в случае (рисунок 1Б) получаем деталь высотой H_q . Эта высота детали будет выше, относительно детали, представленной на рисунке А. С технологической точки зрения, возможно, интенсифицировать процесс, так как чтобы получить деталь высотой H_q . Используя традиционные условия вытяжки, потребуется увеличить диаметр заготовки, что приводит к увеличению числа переходов, т.е. увеличению трудоемкости. С другой стороны, если проводить вытяжку с направленным изменением толщины заготовки для получения детали высотой H_q , то в этом случае потребуется заготовка меньшего диаметра, что приводит к экономии металла, т.е. росту КИМ. Наконец, если есть возможность получить деталь высотой H_q , и с равномерной толщиной $S_q = S_{min}$ из заготовки с толщиной $S_{заг} = S_{min}$, т.е. более тонкой заготовки, то в этом случае закладывается в полученную деталь более высокие эксплуатационные свойства. Известно, чем меньше прокат, тем у металла более высокие эксплуатационные свойства. К ним в первую очередь следует отнести показатель удельной прочности детали (отношение показателя разрушения детали, например, давления к весу детали). Так при прочих равных условиях прочность детали будет определена, как правило, сечением с минимальной толщиной. Понятно, что те части детали, которые имеют толщину превышающей минимальное значение, являются балластом. Это в первую очередь относится к сосудам высокого давления. Часто для устранения этого недостатка используют весьма трудоемкую механическую обработку.

2 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАДАННОЙ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛИ

Заданная толщина детали может быть установлена исходя из технологических или эксплуатационных (конструкторских) требований. К технологическим требованиям относятся: увеличение степени деформирования, коэффициента использования металла, снижение фестоности и т.п.

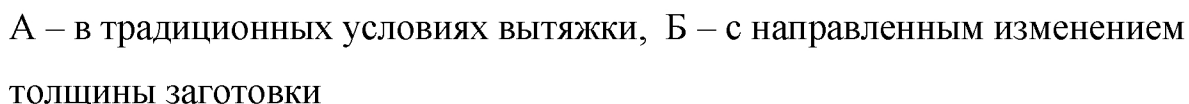
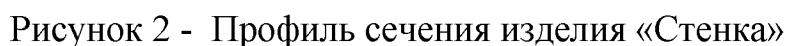


Рисунок 1 - Характер изменения толщины деталей, полученных в разных условиях вытяжки



Все эти условия можно связать с толщиной детали. Так получение ровного торца детали при вытяжке, т.е. устранение фестонистости связано с необходимостью получения осесимметричного распределения толщин для цилиндрических деталей, увеличение степени формообразования – с уменьшением утонения в опасном сечении, увеличение КИМ – с получением детали, толщина которой близка к минимально допустимой. Более сложно определяется заданная толщина, если она определена конструктором и имеет переменный по толщине профиль, например, изделия двигателей летательных аппаратов (стенки, рубашки,

форсунки, насадки, диффузоры). Последний определяется образующими наружной и внутренней поверхностями, которые задаются либо в виде основных геометрических параметров (радиусов, диаметров, углов), либо в виде дискретных точек в прямоугольной системе координат (рисунок 2). Упомянутые изделия получают механической обработкой штампованной детали из листа. Заданную толщину следует определить относительно срединной поверхности штампованной детали. Прежде, чем определять срединную поверхность детали, следует учесть следующие требования, предъявляемые к ней.

3 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛИ

По этой методике, предложенной Е.А.Поповым [1], решается статическая система уравнений без учёта упрочнения и изменения толщины и считается, что найденные соотношения напряжений $\sigma_\rho / \sigma_\theta$ не зависят от изменения толщины и упрочнения ($\sigma_e = \sigma_{e2} = \text{const}$). Другими словами изменение толщины и упрочнения приводит к пропорциональному изменению напряжений $\sigma_\rho \cdot m / \sigma_\theta \cdot m$ (где m - коэффициент пропорциональности), а соотношение напряжений не меняется. Система уравнений примет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho + \sigma_\theta - \frac{f\sigma_H}{\sin\alpha} \cdot \frac{\rho}{S} = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\sigma_H}{S} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_e = \sigma_\rho^2 + \sigma_\theta^2 - 2\mu(\sigma_\rho \sigma_\theta). \quad (3.3)$$

Система имеет три уравнения с тремя неизвестными σ_ρ , σ_θ , σ_e . Определяются напряжения и соотношение напряжений. Поделив их почленно, получим:

$$e_s = (1 - \mu) \cdot \frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} + 1}{\mu \frac{\sigma_e}{\sigma_\theta} - 1} e_\theta \quad (3.4)$$

или

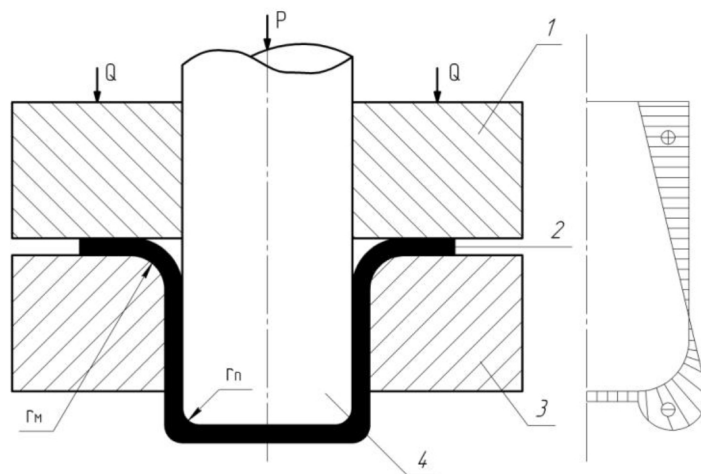
$$S_{o1} = S_o \left(\frac{\rho}{r} \right)^{(1-\mu) \frac{\frac{\sigma_\rho + 1}{\sigma_\theta}}{\mu \frac{\sigma_\rho - 1}{\sigma_\theta}}} . \quad (3.5)$$

Чтобы воспользоваться последним уравнением, необходимо знать связь между ρ и r , воспользовавшись связью геометрических параметров заготовки в очаге деформации и в исходном состоянии при постоянном значении толщины.

3.1 НАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПОСОБОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

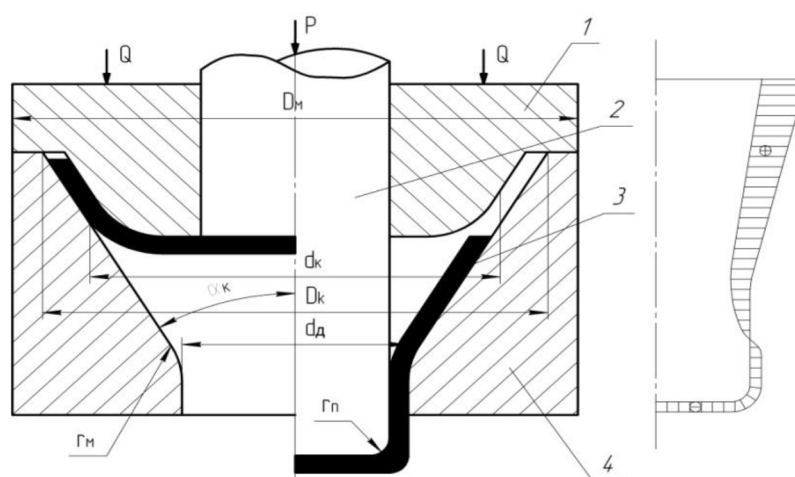
Минимизация функционала (1.1), как и любая вариационная задача связана в первую очередь с выбором процесса формообразования, характеризуемым схемой напряжённо-деформированного состояния. В листовой штамповке процессами осесимметричного деформирования являются: вытяжка, обжим, раздача, отбортовка, формовка, осадка. Реализация каждого процесса возможна несколькими способами, число которых со временем увеличивается, благодаря изобретательской деятельности людей в этой области. Каждый процесс имеет реликтовые признаки, в том числе и те, которые определяют характер изменения толщины заготовки и, в конце концов, детали. Так, например, процесс вытяжки характеризуется неравномерным изменением толщины, при котором имеет место, как утонение, так и утолщение заготовки. Процессы обжима, осадки характерны неравномерным утолщением заготовки, а процессы раздачи, отбортовки, формовки – утонением. Способы не меняют характер толщины детали, полученной при формообразовании заготовки в выбранном процессе. Однако они могут изменить значения толщин, размеры участков, которые определяет утонение, или утолщение заготовки.

Рассмотрим некоторые способы вытяжки (рисунки 3-6).



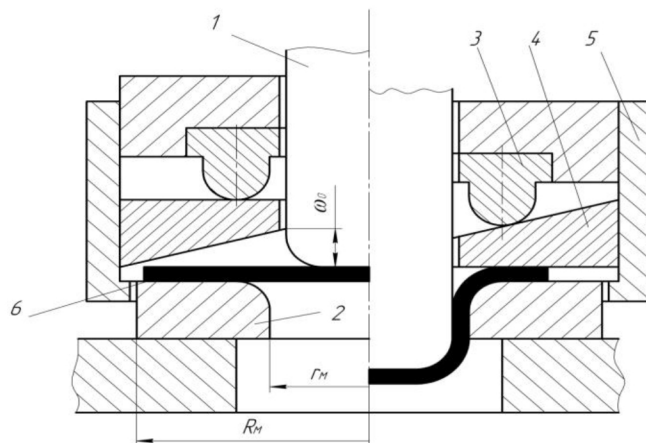
1 – прижим, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – пуансон, r_m – радиус закругления матрицы, r_n – радиус закругления пуансона

Рисунок 3 - Схема штампа с плоским прижимом и эпюра деформации детали по толщине



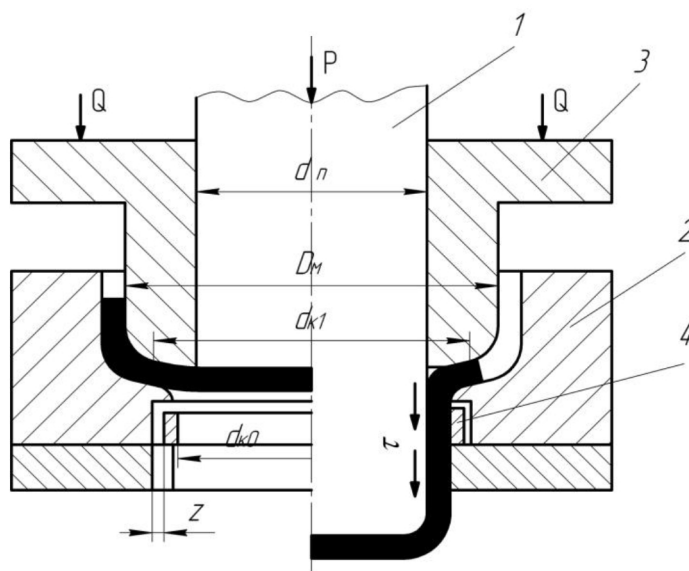
1 – конусный прижим, 2 – пуансон, 3 – заготовка, 4 – матрица, α_k – угол конусности матрицы, D_k – наибольший диаметр конусной части прижима, d_k – наименьший диаметр конусной части прижима, D_n – диаметр заготовки, d_o – диаметр детали

Рисунок 4 - Схема штампа с усеченным конусным прижимом и эпюра деформации детали по толщине



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – кольцевой упор, 4 – упругий прижим, 5 – направляющая, 6 – заготовка, r_m – радиус закругления матрицы, R_n – радиус закругления пуансона, W_o – упругий прогиб прижима

Рисунок 5 - Схема штампа с упругим прижимом



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – прижим, 4 – упругое кольцо, D_n – диаметр заготовки, d_{k1} – наименьший диаметр конусной части прижима, d_n – диаметр пуансона, d_o – диаметр детали, z – зазор между кольцом и матрицей

Рисунок 6 - Схема штампа последующей вытяжки с активными силами трения

Широко известный способ вытяжки с плоским прижимом и матрицей (рисунок 3) позволяет получать разные величины утонения и протяженности

утоненного участка заготовки с помощью постоянных в процессе технологических параметров:

- усилия прижима,
- радиусов закругления матрицы и пуансона,
- коэффициента трения,
- показателя анизотропии материала,
- коэффициента вытяжки.

На рисунке представлена схема для способа вытяжки в штампе с усечённым конусным прижимом [3]. Такой способ кроме перечисленных технологических параметров изменяет условия трения на радиусе матрицы из – за угла конусности и даёт возможность уменьшить величину и протяженность зоны утонения. Для относительно тонких заготовок ($S/D_{\text{заг}} \leq 0,01$) применение способа вытяжки в штампе с упругим прижимом (рисунок 5) [4] даёт возможность, как и в случае с конусным прижимом, уменьшить величины утонения. Объяснение этому явлению даёт то обстоятельство, что, несмотря на разнотолщинность фланца, прижим за счёт своих упругих перемещений контактирует с фланцем заготовки по всей поверхности. Это даёт возможность избежать потерь устойчивости фланца при меньших усилиях прижима и снизить величину утонения. На рисунке 6 представлена схема для способа вытяжки с активными силами трения. Условия эти созданы упругим кольцом.

В начальной стадии вытяжки вновь образованная цилиндрическая часть заготовки охватывается кольцом 4 и прижимается по внутренней поверхности к пуансону 1. Это вызывает активные силы трения на внутренней поверхности заготовки. С увеличением высоты цилиндрической части увеличиваются и активные силы трения, которые разгружают все больше опасное сечение. Наибольшие напряжения в опасном сечении приходятся на заключительные стадии в момент, когда в очаг деформации входит кромка заготовки. Поэтому разгрузка опасного сечения в этот момент очень своевременна и позволяет либо снизить величину утонения, либо увеличить степень формообразования. Кроме того, упругое кольцо обладает свойством проглаживания. Оно уменьшает

разнотолщинность детали, как по периметру, так и по образующей за счет контактного давления на заготовку. Величина давления не должна превышать в среднем 15-20% от временного сопротивления материала заготовки за исключением последних стадий вытяжки. Такое условие достигается варьированием геометрии кольца и его механическими свойствами.

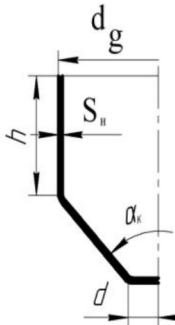
Количество способов формообразования значительно увеличивается, если эскизная заготовка является осесимметричной оболочкой. Рассмотрим некоторые способы обжима из полой цилиндрической заготовки, полученной вытяжкой (рисунок 7).

Способы штамповки, основанные на операции вытяжки и последующего обжима заготовки с дном разработаны относительно недавно. Схемы обжима зависят от применяемой формы заготовки: либо в виде цилиндрического стакана (рисунок 7) [5], либо в виде стакана с конусной юбочной частью (рисунок 8) [6]. Особенность обжима рассматриваемых схем является наличие у заготовки донной части, которая за счет действия изгибающих моментов выворачивается наружу и участвует в процессе формообразования. Благодаря этому обстоятельству операция обжима заготовки с дном имеет преимущество в степени формообразования (таблица 1) [7]. Анализируя данные предельных коэффициентов обжима цилиндрического стакана в деталь конусной формы, видно, что в этом случае, возможно, достичь минимального диаметра, который на 40% меньше, чем в случае обжима трубной заготовки.

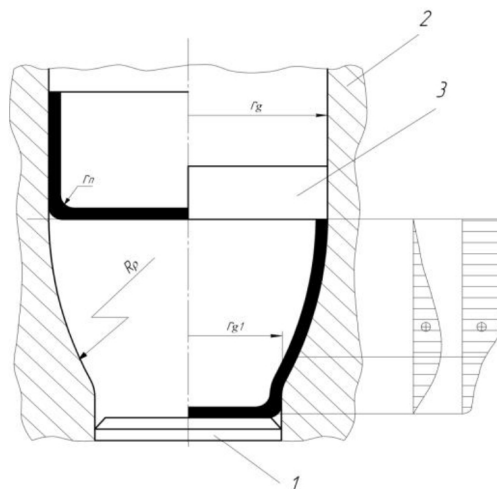
Таблица 1

Предельные значения относительного уменьшения диаметра d/d_0 при обжиме цилиндрического стакана, с наружным подпором стенки ($\alpha_k=60^\circ$, $S_H/d_q = 0,02 - 0,012$)

Матер.	ADIM	M1	Л63	08КП	12Х18 Н9Т	12Х21 Н5Т
$\frac{h}{d_g}$	0,75	0,45	0,35	0,65	0,6	0,7
$\frac{h}{d_g}$	0,5	0,45	0,35	0,65	0,6	0,7
$\frac{h}{d_g}$	0,15	0,4	0,3	0,55	0,4	0,6



Характер изменения деформации по толщине стенки для рассматриваемого случая обжима цилиндрического стакана может быть представлен двумя крайними видами эпюр (рисунок 7).



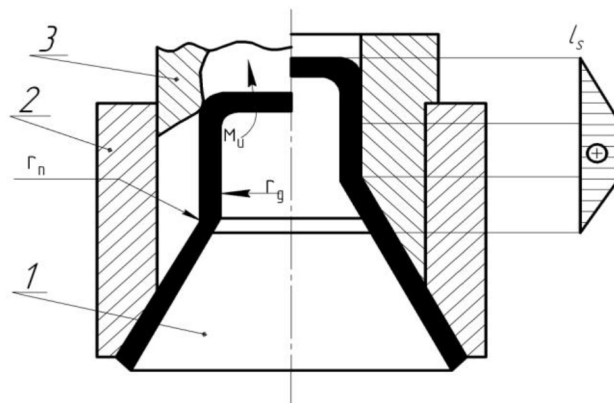
1 – выталкиватель, 2 – матрица, 3 – пуансон

Рисунок 7 - Схема обжима цилиндрического стакана и эпюры распределения деформации детали по толщине

Для небольших степеней деформаций при малом уменьшении диаметра эпюра деформаций имеет характер распределения близкий к кривой Гаусса (нормальному закону распределения). При этом донная и торцевая части заготовки толщину не меняют. Экстремум функции приходится на область, в которой происходит стыковка цилиндрической и донной частей.

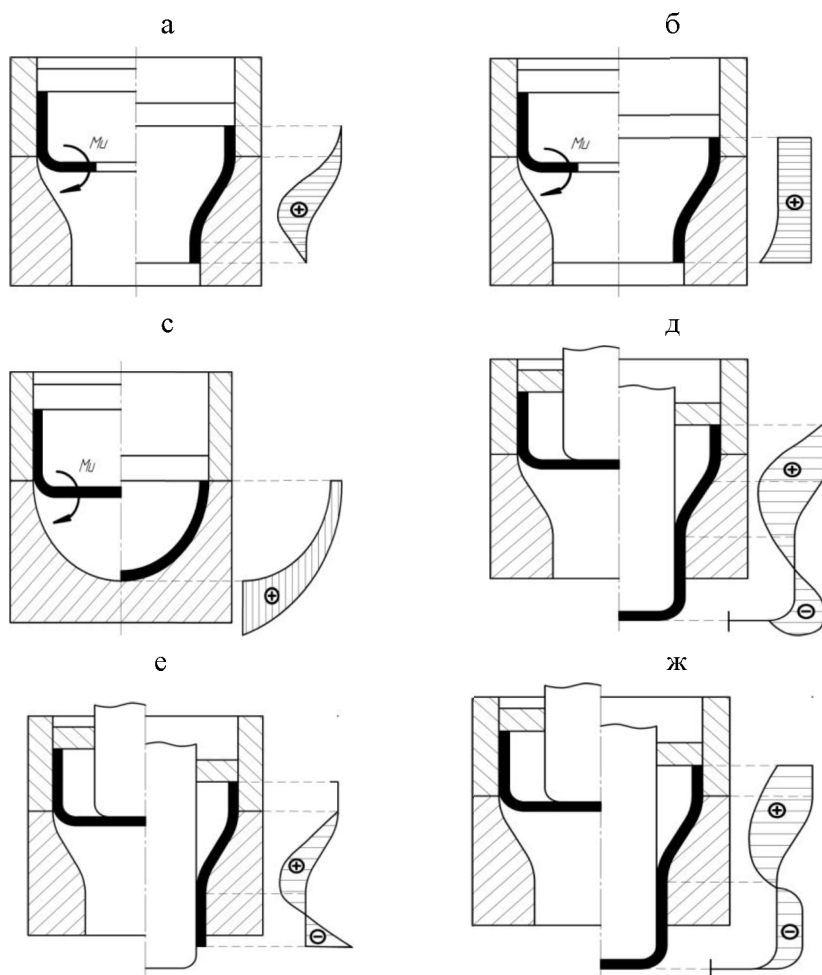
В случае значительного уменьшения диаметра при обжиме возможно утолщение цилиндрической части заголовки. Исследования, проведенные в работе [8] говорят о влиянии на характер изменения толщины и её величину коэффициента трения, показателей механических свойств. Однако в работах отсутствует учет влияний показателей анизотропии на изменение толщины заготовки. Обжим заготовки с цилиндрической и конусной части дает эпюру деформации по толщине, у которой просматривается постоянный участок (рисунок 8). В последние годы на основе схем штамповки (рисунки 7, 8) разработан ряд способов формоизменения, которые обладают широкими возможностями получения деталей не только по форме заготовки, но и по величине и характеру изменения толщины. Способы характеризуются тем, что независимо от вариантов совмещения процессов все они основаны на процессе

обжима заготовки с дном (рисунки 9, 10).



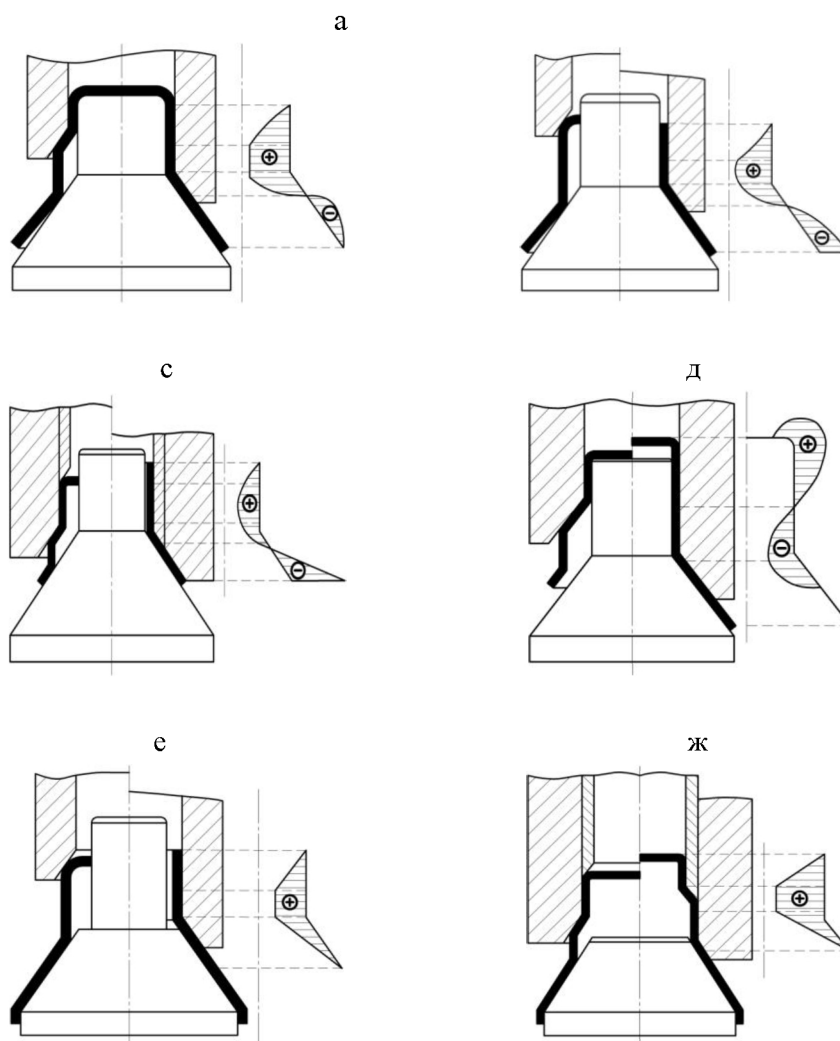
1 – оправка, 2 – прижим, 3 – пуансон-матрица

Рисунок 8 - Схема обжима цилиндрического стакана с конусной юбочной частью и эпюра распределения деформации детали по толщине



а – обжим-отбортовка, б – обжим-отбортовка-осадка, в – обжим-осадка,
д – обжим-формовка, е – обжим-вытяжка, ж – обжим-вытяжка-отбортовка

Рисунок 9 - Основные, совмещенные с обжимом схемы штамповки из полых цилиндрической заготовки с дном и эпюры деформации детали по толщине

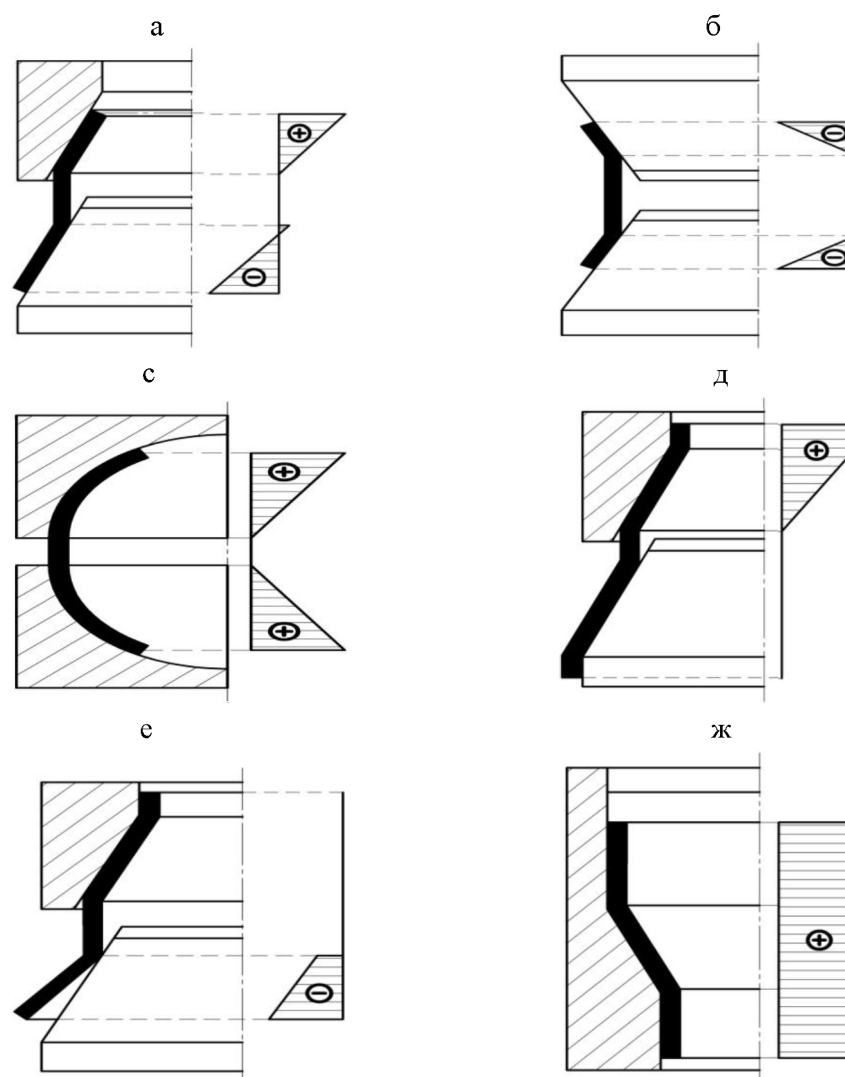


а — вытяжка-обжим, б — обжим-отбортовка-раздача, с — обжим-раздача-отбортовка, д — вытяжка-обжим, е — обжим-отбортовка, ж — обжим-обжим

Рисунок 10 - Основные схемы штамповки, совмещенные с операцией обжима из полой цилиндрической заготовки с дном с расширяющейся юбочной частью и эпюры деформации детали по толщине

Рассматриваемые схемы позволяют совмещать обжим со всеми основными формообразующими процессами: вытяжкой, отбортовкой, формовкой, осадкой, раздачей. Процессы осадка, формовка, протяжка используются в целях интенсивного изменения толщины стенки, и как вспомогательные приемы для интенсификации основного процесса обжима. Операции раздачи, отбортовки связаны с увеличением размеров детали. Поэтому раздача применяется в качестве калибрующей операции с небольшими деформациями. Представленные схемы штамповки (рисунки 7, 8, 9) обладают широкими возможностями получения деталей с различным характером изменения толщины заготовки.

Если при обжиге полой цилиндрической заготовки с дном очаг деформации охватывает практически всю заготовку, то заготовки с расширяющейся юбочной частью по этому признаку можно разделить на две группы. К первой группе относятся заготовки, которые изменяют толщину только для цилиндрической части. У таких заготовок юбочная часть в процессе штамповки либо прижата, либо настолько велика, что для её деформации недостаточны усилия, прикладываемые к цилиндрической части (рисунки 10а, 11ж). Ко второй группе относятся заготовки, у которых зона пластической деформации охватывает весь объем заготовки, включая и юбочную часть (рисунок 11).



а – обжим-раздача, б – раздача-раздача, с – обжим-обжим, д – последующий обжим, е – последующая раздача, ж – обжим-осадка

Рисунок 11 - Совмещенные схемы обжима и раздачи трубной заготовки и эпюры деформации детали по толщине

d, c, ж - детали с толщиной стенки, изменяющейся по прямолинейному закону,

б,и, k - детали с толщиной стенки выпуклого характера,

d, e, з - детали с толщиной стенки вогнутого характера.

Спектр изменения толщины стенки значительно расширяется на основании принципа суперпозиции деформаций по толщине для технологических процессов, которые включают кроме рассмотренных схем штамповки, предварительные или последовательные операции: вытяжки, протяжки, совмещенной вытяжки, отбортовки, обжима и осадки.

Выбор модели наиболее удобно проводить по классификационному признаку.

В основу классификации положен характер изменения функции описывающий толщину детали. Классификация составлена на основе уравнения второго порядка (рисунок 12). Она охватывает варианты изменения толщин деталей, полученных в традиционных операциях штамповки, с учетом основных (базисных) признаков.

Если учесть изменение толщины заготовки относительно исходного значения, то число вариантов классификации утроится. Это объясняется тем, что относительная толщина может находиться как выше, так и ниже представленных эпюр толщин, а также занимать промежуточное положение.

Согласно принятой классификации каждую ее позицию можно сопоставить с эпюрами толщин штампованных деталей. Эпюры (рисунок 12 а,ж,з) согласуются с характером изменения толщины деталей, полученных в результате вытяжки.

Если эпюры с индексом ж,з можно отнести к вытяжке деталей с обычными параметрами, то эпюры с постоянной толщиной требуют применение дополнительных технологических решений, например, вытяжку с активными силами трения (рисунок 6).

Особенностью вытяжки является то, что эпюры изменения толщин в местах наименьших значений обусловлены утонением исходной заготовки, а в местах наибольших значений - утолщением. Поэтому исходная толщина заготовки лежит

в интервале наибольшего и наименьшего значений.

Эпюры (рисунок 12 ж,з,и) наиболее вероятно получить в операциях отбортовки, формовки. В этом случае, в отличие от вытяжки, толщина детали всегда меньше исходной толщины заготовки. Последовательное совмещение операций вытяжки и обжима цилиндрического стакана с дном дает возможность получать эпюры (рисунок 12 б,е). При параллельном совмещении операций обжима и осадки, обжима-отбортовки-осадки можно получить эпюры, которые представлены позициями (рисунок 12 с,d,k). Последовательное совмещение операций вытяжки и обжима цилиндрической заготовки, полученной в результате обрезки донной части, а также параллельное совмещение обжима с осадкой дает эпюры толщин (рисунок 12 ж,з,и,а,е).

Это объясняется с одной стороны возможностью обжима наиболее утолщенной при вытяжке части заготовки, а с другой - наибольшими коэффициентами обжима утоненной части.

Последовательное совмещение операций вытяжки и обжима цилиндрического стакана с дном, имеющим фланец со стороны торца, дает возможность получать эпюры толщин, охватывающих всю классификацию. Если сравнить исходную толщину заготовки с толщиной детали то первая, может находиться как в интервале наибольшего и наименьшего значений, так и превышать наибольшее значение толщины детали. В последнем случае обжим параллельно совмещен с осадкой.

Для выбора операций листовой штамповки удобно пользоваться таблицей 2. Из таблицы видно, что выбор модели формообразования, основанной на операциях вытяжки и обжима дает наибольшее число вариантов изменения толщин согласно принятой классификации. Просматривается закономерность, при которой возможности получения деталей различных форм и толщин растут с увеличением числа переходов. При использовании таблицы 6 необходимо в первую очередь согласовать по принятой классификации заданную толщину детали с технологически возможной. В дальнейшем будем считать, что деформация не зависит от исходной толщины плоской заготовки.

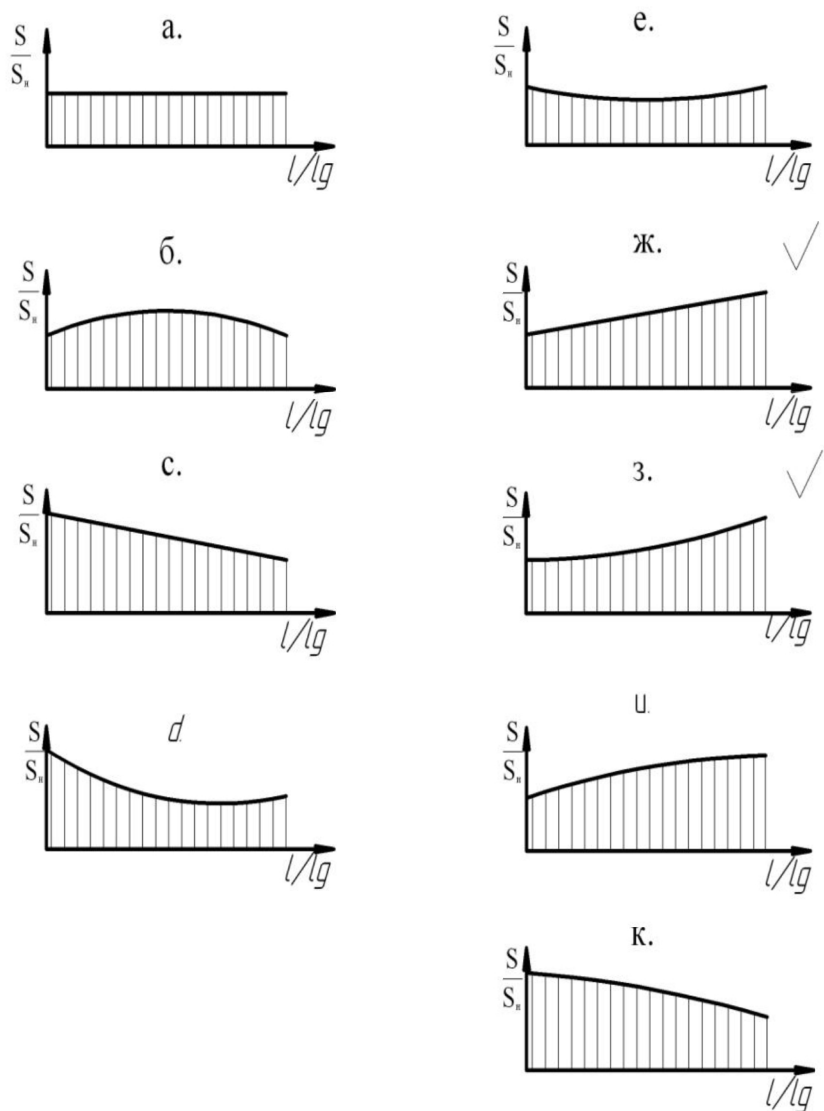


Рисунок 12 - Классификация деталей по характеру изменения толщины стенки

3.2 НАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Минимизацию выражения (1.1), как функционала можно провести по технологическим параметрам или параметрам, определяющим их, но постоянных в процессе формообразования. К ним относятся исходная толщина заготовки, коэффициенты формообразования, геометрические параметры не влияющие на размеры детали, коэффициент трения, граничные условия. Возможно использовать и показатель механических свойств, в том числе и показатель анизотропии. Надо иметь ввиду, что с увеличением числа переходов,

увеличивается и число варьируемых параметров. Если какой-то параметр или граничные условия переменны в процессе формообразования, то варьирование этой функции следует проводить по тем значениям, которые в них содержатся в виде постоянных. Таким образом условие минимума функционала для осесимметричной задачи примет вид:

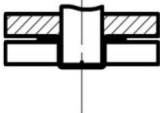
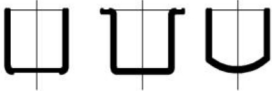
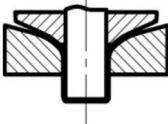
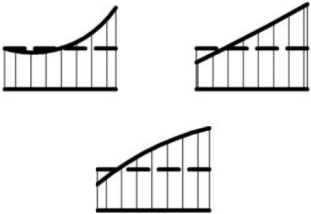
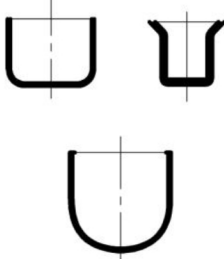
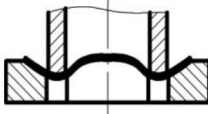
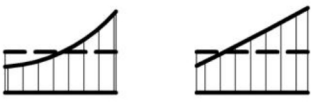
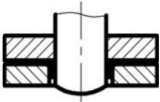
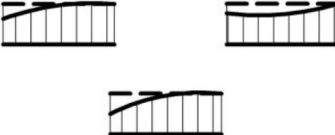
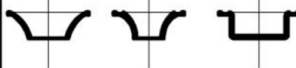
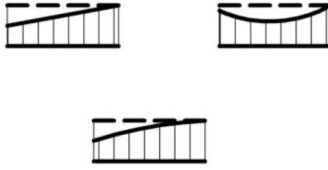
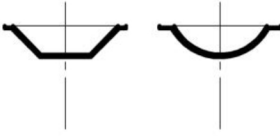
$$\frac{\partial}{\partial P_J} \int_0^l (S_q - S_T)^2 dl = 0, \quad (J = 1, 2, 3 \dots K) \quad (3.6)$$

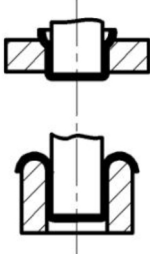
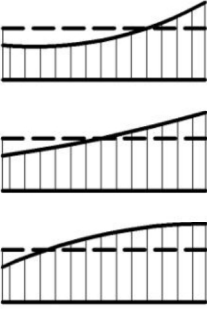
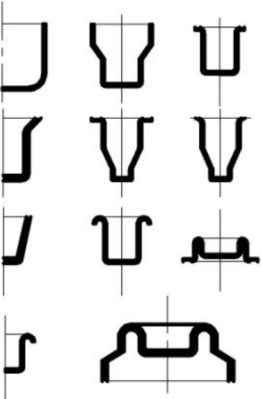
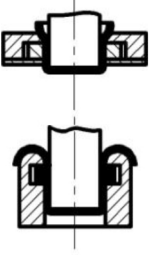
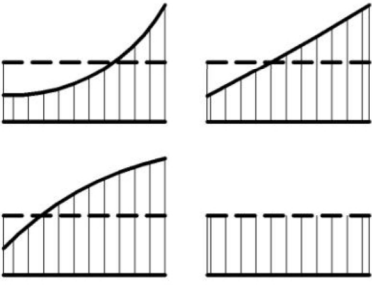
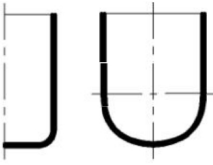
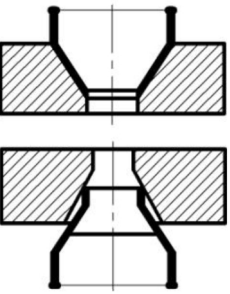
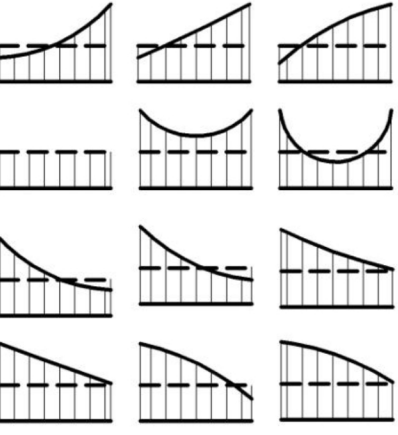
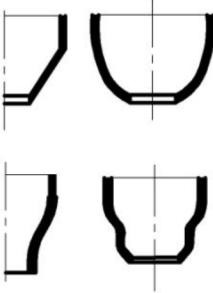
где P_J -варьируемый параметр;

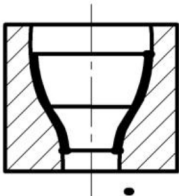
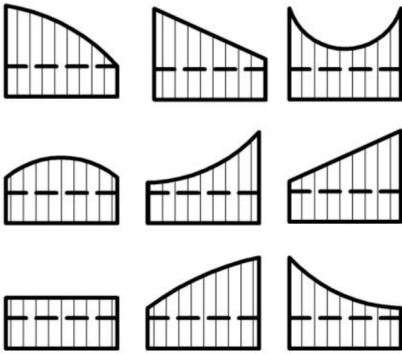
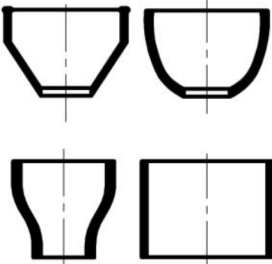
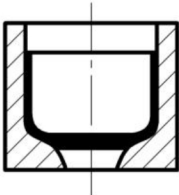
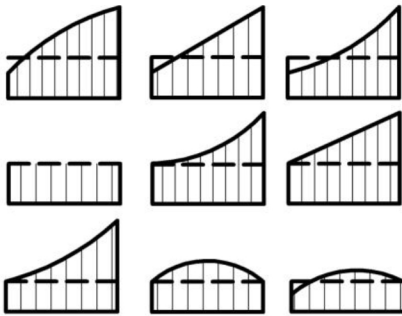
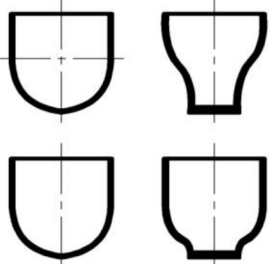
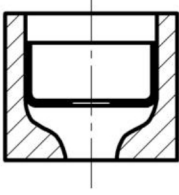
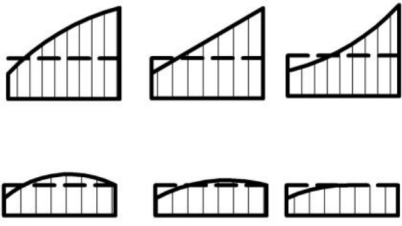
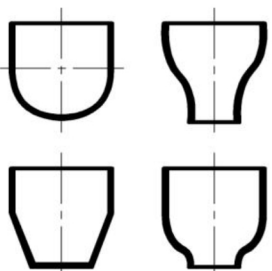
K -число варьируемых параметров;

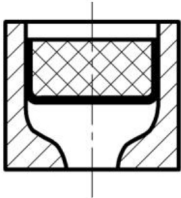
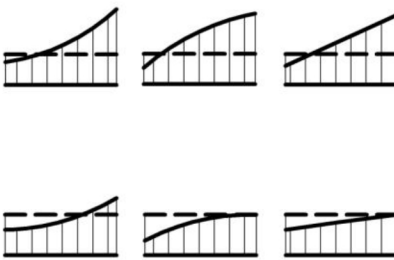
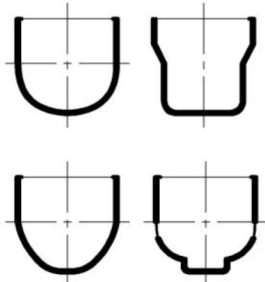
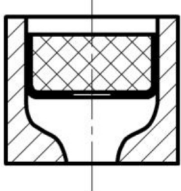
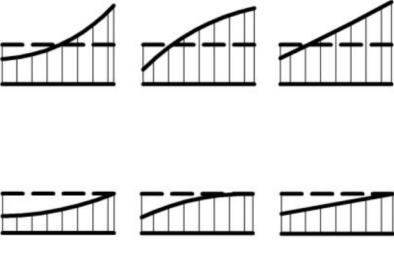
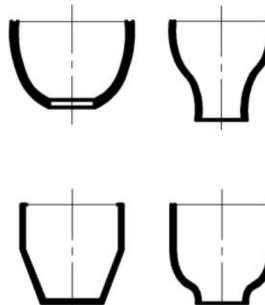
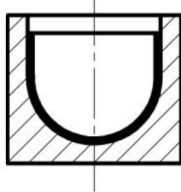
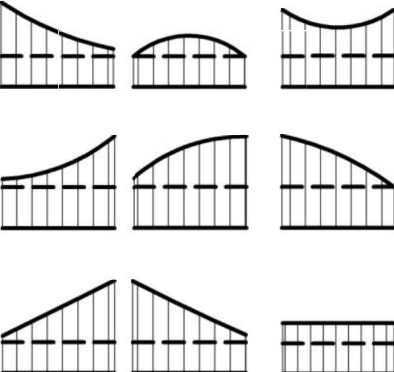
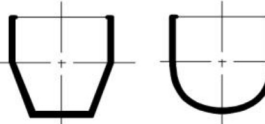
l -длина образующей детали.

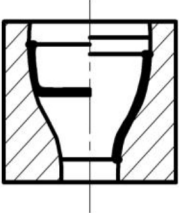
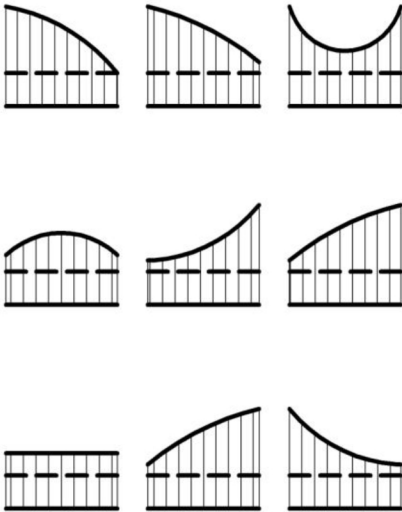
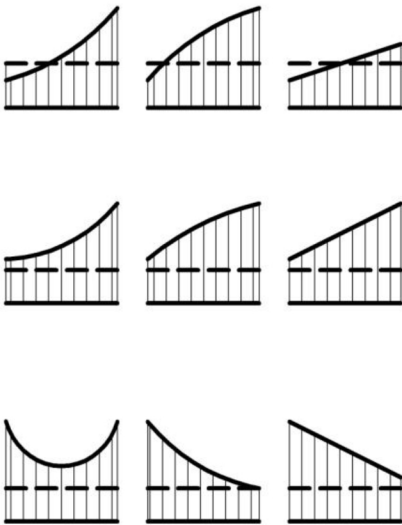
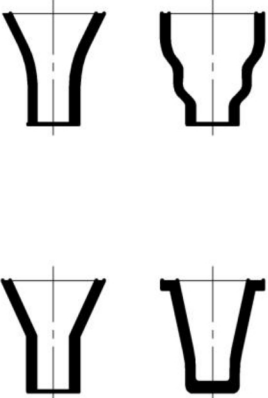
Соответствие основных способов штамповки с эпюрами
толщин и формой деталей

Способы штамповки	Эпюры толщин штампованных деталей	Основные формы деталей
1	2	3
1.Вытяжка в плоской матрице с прижимом и без него 		
2.Вытяжка в конусной матрице с прижимом и без него 		
3.Реверсивная вытяжка 		
4.Отбортовка 		
5.Формовка 		

1	2	3
6. Последующая вытяжка с прижимом и без него 		
7. Последующая вытяжка с активными силами трения с прижимом и без него 		
8. Вытяжка(поз.1-3,6,7) и последующий обжим трубной заготовки 		

1	2	3
9. Вытяжка (поз. 1-3, 6, 7) и последующий обжим-осадка трубной заготовки 		
10. Вытяжка (поз. 1-3, 6) и последующий обжим цилиндрического стакана 		
11. Вытяжка (поз. 1-3, 6, 7) и последующий обжим-отбортовка цилиндрического стакана 		

1	2	3
12.Вытяжка(поз.1-3,6,7) и последующий обжим- осадка трубной заготовки 		
13.Вытяжка(поз.1-3,6)и последующий обжим- формовка-отбортовка цилиндрического стакана 		
14. Вытяжка(поз.1-3,6,7) и последующий обжим- осадка стакана. 		

1	2	3
15.Вытяжка(поз.1-3,6,7) и последующий обжим- отбортовка-осадка цилиндрического стакана 		
16.Вытяжка(поз.1-3,6)и последующий обжим заготовки с дном с расширяющейся юбоч- ной частью и совме- щенные с обжимом операции (рис.15)		

4 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛИСТОВОМ МАТЕРИАЛЕ

Листовая штамповка включает следующий сортамент листового материала: рулон, лента, полоса, карточка, труба, профиль, размеры которых определены ГОСТом. Для технолога важно знать – какой штампуемостью обладает материал. Штампуемость – это способность металла к формообразованию. Штампуемость можно оценить:

- По механическим свойствам
- По технологическим пробам
- Критериальной оценкой

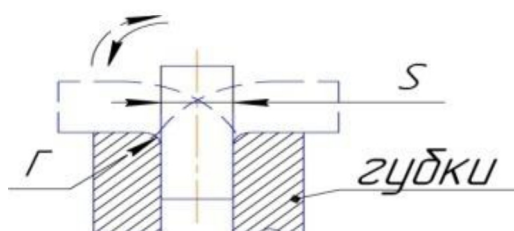
4.1 ОЦЕНКА ШТАМПУЕМОСТИ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Рассматриваются пластические показатели: $\delta_p = \frac{l_p - l_0}{l_0} \delta_p$ – относительное удлинение, $\Psi_p = \frac{\delta_p}{1 + \delta_p}$ – относительное сужение. Прочностные показатели: $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести, σ_s – условный предел прочности.

Чем меньше $\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_s}$ и больше δ_p , тем штампуемость выше.

4.2 ОЦЕНКА ШТАМПУЕМОСТИ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОБАМ

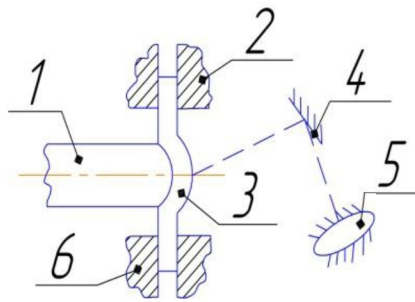
Технологическая проба – это испытание близкое к реальному процессу. Наиболее часто используются 3 вида испытаний:



r – радиус губок, S – толщина материала

Рисунок 13 - Испытание на двойной перегиб

Подсчитывают число двойных перегибов до появления трещины.



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка, 4 – зеркало, 5 – наблюдатель,
6 – прижим

Рисунок 14 - Испытание на выдавливание лунки

Определяют глубину лунки до появления трещины.

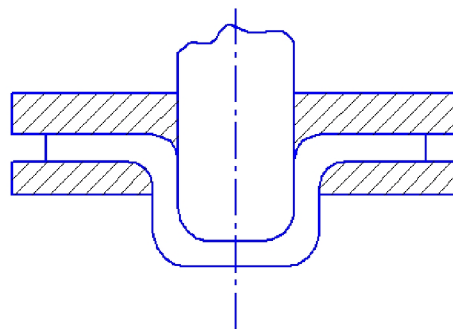


Рисунок 15 - Определение предельного коэффициента вытяжки

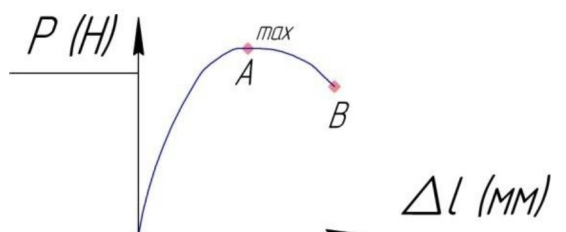
Проводят вытяжку из разных по диаметру заготовок, близких по размеру друг к другу, пока не появится трещина на заготовке в зоне радиусного скругления пуансона. Предельный коэффициент рассчитывается по диаметру заготовки.

4.3 КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ШТАМПУЕМОСТИ

Эти оценки относятся к бесконечно малым элементам, кроме критерия Эйлера, так как они являются функциями напряжения и деформации. Чтобы применить критерий, надо знать напряжение во всех элементах очага деформации.

4.3.1 КРИТЕРИЙ ТОМЛЁНОВА

Этот критерий применяется для случая, когда 1 или 2 напряжения растягивающие. Его физический смысл состоит в том, что если одно из направлений растяжения достигает максимума, то этот момент считается критическим, а деформация критической. Аналог этому явлению можно рассмотреть на примере линейного растяжения.



ОА – участок равномерного деформирования; АВ – участок образования шейки

Рисунок 16 - Диаграмма линейного растяжения

Характер усилия определяется двумя факторами:

1. Упрочнение.
2. Уменьшение площади поперечного сечения.

Как только влияние этих факторов становится равнозначным, то процесс достигает максимального значения. Далее фактор уменьшения площади оказывает решающее влияние и усилие падает. Томлёнов считает, что деформирование в условии снижения усилия и образовании шейки практически одномоментны, поэтому за величину критической деформации берется условие:

$$\frac{dP}{dl} = 0.$$

Если считать, что упрочнение подчиняется степенному закону, то величина критической деформации:

$$e_{кр} = \frac{2\delta_\rho \sqrt{1-m+m^2}}{2-m}, \quad (4.1)$$

где $m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$.

Если $e_{кр} \leq e_i$ $l_{кр} \leq l_i$, то произойдет разрыв.

4.3.2 КРИТЕРИЙ КОЛМОГОРОВА

Применяется для всех процессов ОМД. Имеет вид:

$$\psi = \frac{\int_0^t d\varepsilon_i}{\varepsilon_{\rho}^{cc}}, \quad (4.2)$$

где $\int_0^t d\varepsilon_i$ - накопленная интенсивная деформация;

ε_{ρ}^{cc} - величина критической деформации при данной схеме напряженного состояния, где

$$\varepsilon_{\rho}^{cc} = 2\delta_{\rho} e^{\left(-2.16 \frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right)}, \quad (4.3)$$

где $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

4.3.3 КРИТЕРИЙ ЭЙЛЕРА

$$\delta(A_{внутр} + A_{внеш}) \rightarrow \min. \quad (4.4)$$

Вариация работ внешних $A_{внеш}$ и внутренних $A_{внутр}$ сил на возможных перемещениях всегда минимальна. С помощью этого критерия определяется гофрообразование.

5. РЕЗКА

Резка — процесс, который характеризуется схемой напряженного

деформированного состояния чистого сдвига.

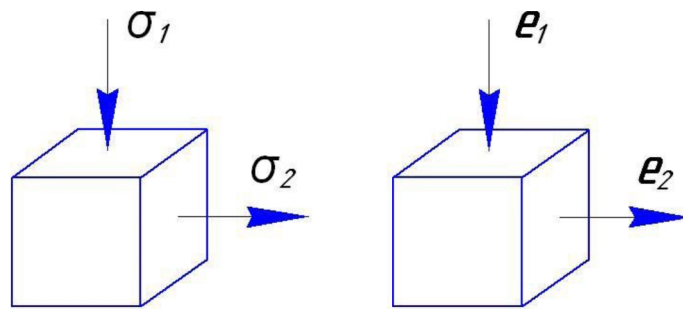
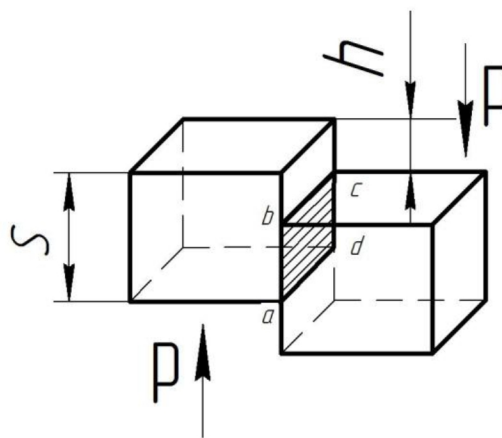


Рисунок 17 - Схема наряду деформированного состояния при резке

Рассмотрим идеальный случай резки:

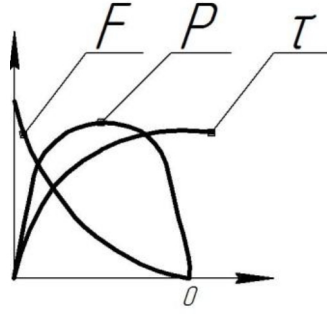
1. Металл обладает неограниченной пластичностью.
2. Резка происходит по бесконечно тонкой плоскости.
3. Материал обладает упрочнением.



P – усилие, $abcd$ – площадь сопротивления резания, S – толщина, h – величина сдвига одной части относительно другой

Рисунок 18 - Идеальный случай резки

В процессе резки площадь $abcd$ уменьшается, а напряжение увеличивается. В начальной стадии рост усилия объясняется упрочнением, а на конечной стадии спад усилия объясняется уменьшением площади сопротивления реза.



F – площадь реза, τ – напряжение реза, P – усилие

Рисунок 19 - Графики изменения параметров резки

Найдем величину перемещения, соответствующую $\max$ усилия:

$$P = \tau \cdot b(S - h) = \tau \cdot b \cdot S \left(1 - \frac{h}{S}\right) = \tau \cdot F_0 \cdot (1 - \psi)$$

$$P = \tau * b * (s - h) = \tau * b * s * \left(1 - \frac{h}{s}\right) = \tau * F_0 * (1 - \psi), \quad (5.1)$$

где $\tau = \frac{1}{2} A \psi^n$, $F_0 = Sb$, $F_{abcd} = b(S - h)$, $\psi = \frac{F_0 - F_{abcd}}{F_0} = \frac{h}{S}$,

где A , n – константы механических свойств;

$\frac{h}{s}$ – относительная глубина перемещения (внедрения).

$$A = \frac{\sigma_b}{(1 - \psi_u)^{\psi_u^n}}, \quad \delta_m = \frac{\psi_u}{1 - \psi_u}, \quad \psi_u = \frac{\delta_u}{1 + \delta_u},$$

С учётом принятия обозначений имеем:

$$P = \frac{1}{2} A \psi_u^n F_0 (1 - \psi_u) \quad P = \underbrace{\frac{1}{2} A \psi_u^n}_{\tau} * \underbrace{F_0 (1 - \psi)}_F, \quad \tau = \frac{1}{2} A \psi_u^n, \quad F = F_0 (1 - \psi_u).$$

(5.2)

$$\psi = 0; \psi = 1 \Rightarrow P = 0.$$

Взяв производную по ψ получим:

$$n(1 - \psi_u)^{-\psi_u} = 0 \quad \text{или} \quad n = \frac{\psi_u}{(1 - \psi_u)} \quad \text{или} \quad \psi_u = \frac{n}{(1 + n)},$$

Окончательно максимальное усилие для идеального случая примет вид:

$$P = \frac{1}{2} \sigma_s F_0. \quad (5.3)$$

5.1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗКИ

К ним относятся:

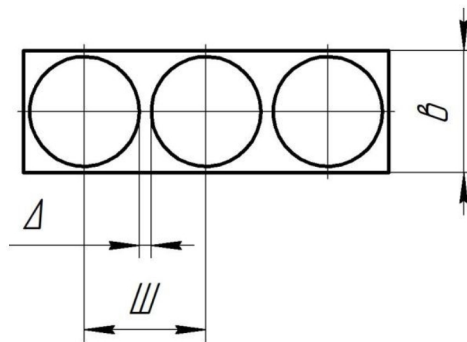
1. Усилие процесса.
2. Величина зазора.
3. Величина перемычек между линиями реза.
4. Коэффициент использования металла.

Усилие для реального процесса почти в 2 раза больше идеального и составляет:

$$P = \sigma_s F_0 \quad (5.4)$$

Наличие объемного очага приводит к тому, что наблюдается втягивание элементов металла, находящиеся рядом с зазором.

Перемычки необходимы, чтобы избежать втягивания металла в зазор. Их величина $\Delta = (l \div 2)S$, где S – толщина металла.



b – ширина полосы, $ш$ – шаг подачи, Δ – величина перемычки

Рисунок 21 - Схема раскроя полосы

Наличие перемычек снижает коэффициент использования металла. Его определяют:

$$K_{исп} = \frac{NF_{дет}}{F_{мат}},$$

где N - число деталей из материала;

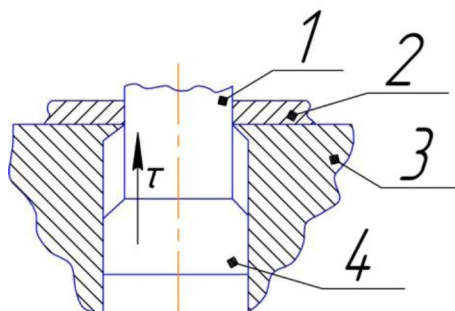
$F_{дет}$, $F_{мат}$ - площади детали и материала (лист, лента, рулон, полоса).

Величина зазора между режущими кромками определяется:

$$Z = (S - h) \operatorname{tg} \gamma = S(l - \psi_u) \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (5.5)$$

где $\gamma = 6 \div 8^\circ$.

5.2 ОСОБЕННОСТИ ВЫРУБКИ И ПРОБИВКИ



1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – пробиваемая часть, τ – касательное напряжение

Рисунок 22 - Схема вырубной, пробивки

За счёт упругой разгрузки после разделения металла волокно во внешней части заготовки стремятся выпрямиться. Уменьшаются диаметры внешней части и увеличиваются внутренние. Возникающие силы трения создают дополнительное напряжение. Кроме того, внешние части необходимо снимать с пуансона. Для этого применяются съемки (жесткие, либо подпружиненные к верхней плите). Надо всегда иметь в виду, что при вырубке заготовки количество деталей в матрице было не более 5-7 штук. Иначе резко возрастает усилие проталкивания, в связи с этим рабочий поясok матрицы должен быть не очень большим.

5.3 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЗА

В холодной штамповке это связано с увеличением пластичности металла. Пластичность можно повысить за счет схем всестороннего сжатия в зоне реза. Рассмотрим варианты конструкций штампа.

5.3.1 СОЗДАНИЕ БОЛЬШИХ УСИЛИЙ ПРИЖИМА

Недостаток: требуется значительное усилие прижима.

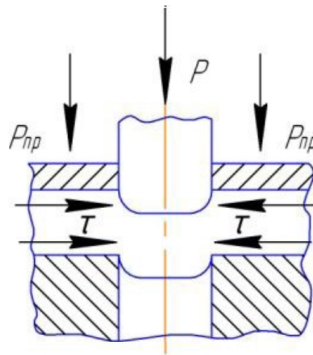
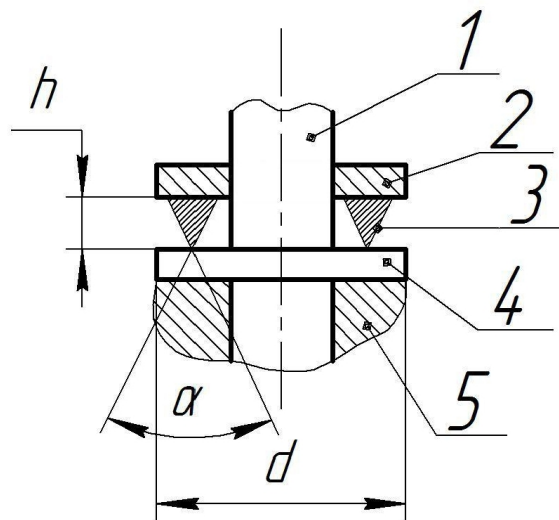


Рисунок 23 - Схема вырубki, прибивки с большим усилием прижима

5.3.2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕБЕР ЖЁСТКОСТИ

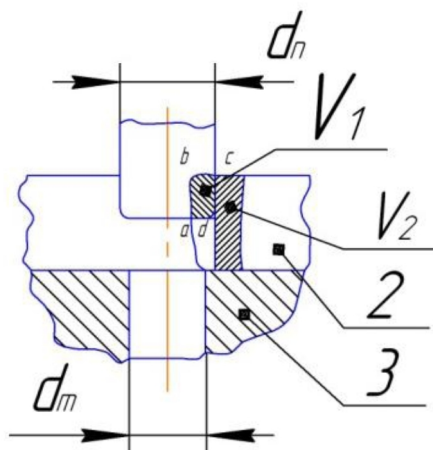


1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – ребро жесткости, 4 – заготовка, 5 – матрица, h – высота ребра, α – угол конусности ребра, d – диаметр ребра

Рисунок 24 - Схема штампа с ребрами жёсткости

Угол α выбирается из условия, чтобы ребро легко освобождалось вверх от металла: $\operatorname{tg} \alpha$ больше коэффициента трения f .

5.3.3 ВЫРУБКА, ПРОБИВКА, ПУАНСОМ ПОЛНЕЕ МАТРИЦЫ



1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица

Рисунок 25 - Схема вырубki пуансоном полнее матрицы

Конструкция должна быть спроектирована так, чтобы обеспечить перемещение смещенного объема V_1 во внешние части заготовки. В результате создается сжимающие усилия от действия противодействия под действием смещенного объема V_2 .

Недостаток: необходимо точно регулировать ход пуансона и ход пресса.

5.4 СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ УСИЛИЯ РЕЗА

Основным направлением при снижении усилия является, уменьшение площади сопротивления реза. Наиболее распространена схема резки с наклонными режущими кромками (рисунок 26).

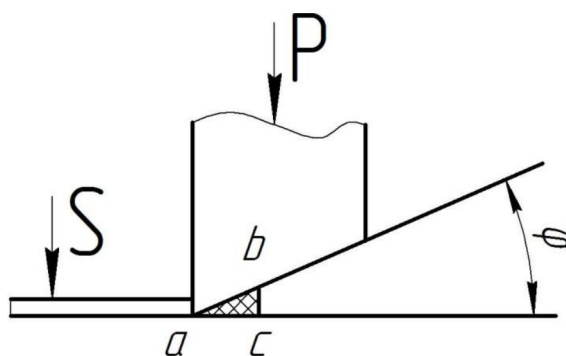


Рисунок 26 - Схема резки на гильотинных ножницах

Усилие реза:

$$P = \sigma_b F_p,$$

где площадь реза:

$$F_p = F_{abcd} = \frac{1}{2} ac \cdot bc = \frac{1}{2} \frac{s^2}{\operatorname{tg} \gamma},$$

где угол принимается из условия: $\operatorname{tg} \gamma \leq f \operatorname{tg} \gamma$ и f - коэффициент трения по металлу.

6 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПЕРАЦИЯХ ВЫТЯЖКИ И ОБЖИМА

6.1 ВЫТЯЖКА

Вытяжка - это процесс, характерной схемой напряженно-деформированного состояния является:

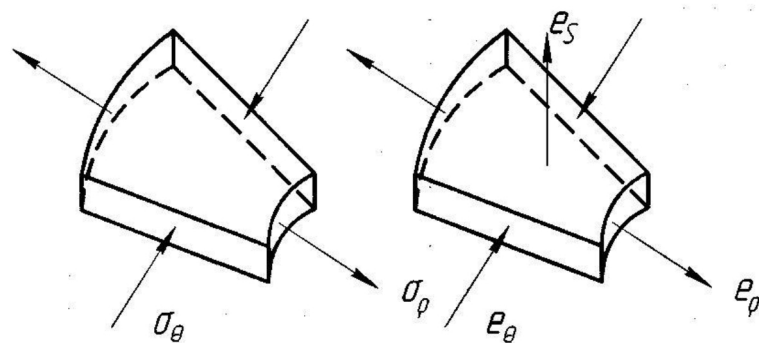
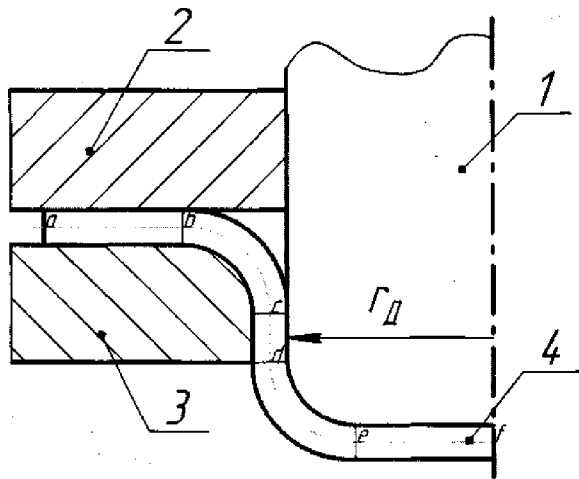


Рисунок 27 - Характерная схема напряженно-деформированного состояния при вытяжке

Некоторые способы инструментальной вытяжки представлены на рисунках 3, 4, 5, 6.

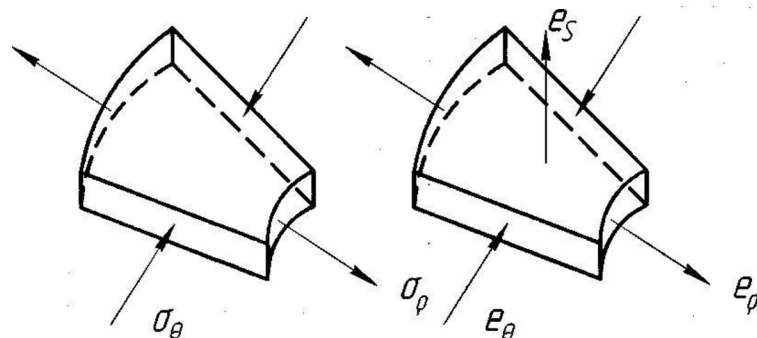
Рассмотрим наиболее простую схему вытяжки с прижимом круглой плоской заготовки.



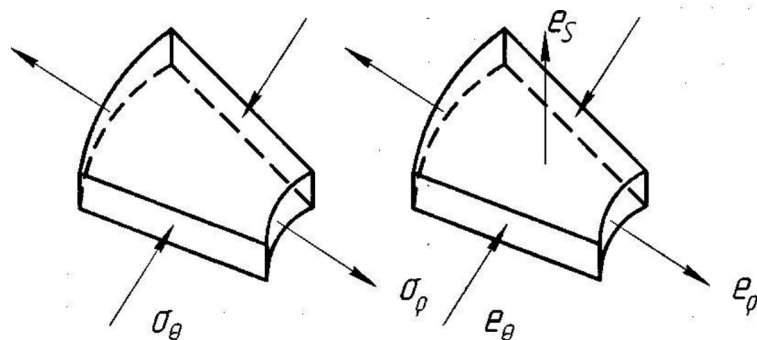
1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – матрица, 4 – заготовка

Рисунок 28 - Схема вытяжки с характерными участками

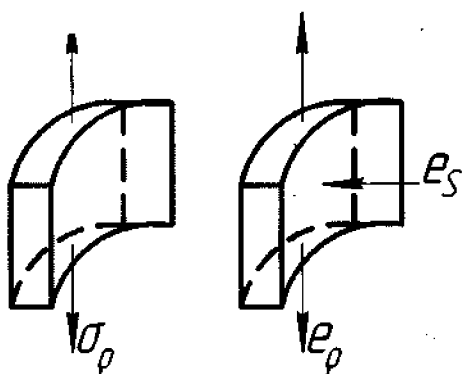
Участок ab - характерный участок, который присущ вытяжке.



Участок be - участок радиусного закругления матрицы. На этом участке происходит утонение заготовки.



Участок cd - цилиндрический участок.



Участок de и ef- участки радиусных закруглений пуансона.

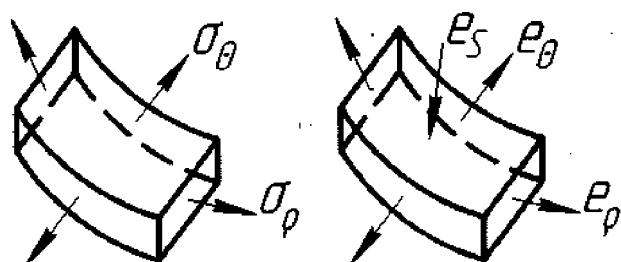


Рисунок 29 - Схемы напряжённо-деформированного состояния заготовки при вытяжке по участкам

Процесс вытяжки условно можно разбить на 3 стадии:

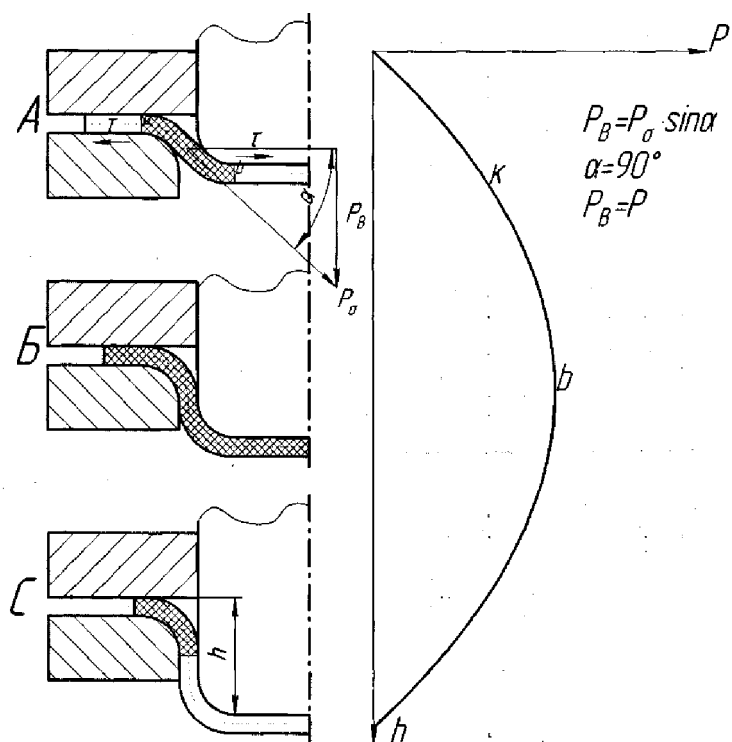


Рисунок 30 - Стадия процесса вытяжки

Первая стадия характерна ростом усилия и тем, что пластическая деформация охватывает только часть заготовки, а именно свободную часть - участок ab (участок диаграммы). Центральная и периферийная часть деформируются упруго. Переход их в пластическое состояние сдерживает сила трения. По мере опускания пуансона происходит утонение и упрочнение свободной части. Она становится способной передавать усилие на соседние элементы и переводить их в пластическое состояние. Кроме того, на этой стадии происходит рост усилия за счет изменения угла, обеспечивающего вертикальную проекцию усилия на свободном участке. Рост усилия происходит не только за счет упрочнения, но и за счет изменения угла. Наконец наступает момент, когда вся заготовка охвачена зоной пластической деформации. На участке диаграммы kb происходит рост усилия только за счет упрочнения фланца заготовки, не смотря на то, что размеры фланца уменьшаются. Однако наступает момент, когда фланец упрочняется, а его размеры малы и сопротивление его уменьшается. В этот момент наступает максимум усилия. Как правило, для глубокой вытяжки происходит полностью обхват заготовкой пуансона и матрицы в радиусной части. Последняя стадия характеризуется тем, что очаг пластической деформации имеет место на фланце и радиусе ее закругления. При этом усилие падает, так как уменьшается сопротивление фланца. Донная часть переходит в упругую область (участок bh диаграммы).

Рассмотрим случай глубокой вытяжки на второй- стадии, именно на этой стадии наблюдаются наибольшие усилия и деформации.

6.1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

Наиболее просто определяются деформации и напряжения на кромке фланца. На кромке фланца меридиональные напряжения приблизительно равны контактными $\sigma_p \approx \sigma_k \approx 0$. То есть, имеем схему линейного напряженного состояния.

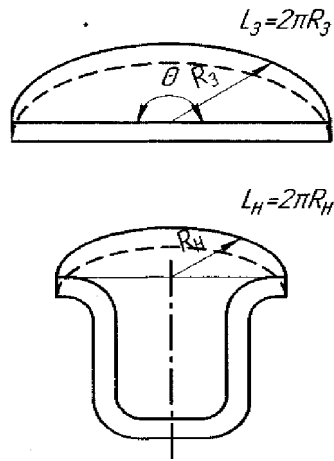


Рисунок 31 - Схема к определению деформации кромки заготовки

Зная длины окружности кромок заготовки и фланца детали L_3, L_H можно найти тангенциальную деформацию кромки (рисунок 31):

$$e_\theta = \ln \left| \frac{L_H}{L_3} \right| = \ln \left| \frac{R_H}{R_3} \right|. \quad (6.1)$$

Для изотропного тела $e_\rho = e_s = e_s = \frac{1}{2} e_\theta$, тогда

$$e_s = \ln \left| \frac{S_H}{S_3} \right| = -\frac{1}{2} \cdot \ln \frac{R_H}{R_3}, \quad (6.2)$$

$$\ln \left| \frac{S_H}{S_3} \right| = \ln \sqrt{\frac{R_3}{R_H}}. \quad (6.3)$$

Толщина кромки:

$$S_H = S_3 \cdot \sqrt{\frac{R_3}{R_H}}.$$

Чем меньше наружный R_H , тем толще кромка. Максимальная толщина кромки детали определяется как:

$$S_{HMAX} = S_3 \cdot \sqrt{\frac{R_3}{r_D}},$$

где r_D - радиус детали.

Чтобы определить максимальную величину утонения следует предположить, что наибольшее напряжение и наибольшее утонение находятся в зоне границы

радиусной и цилиндрической части. Это объясняется тем, что в этой зоне действуют наибольшие растягивающие напряжения от сопротивления участка фланца заготовки и радиусного участка. На радиусной части заготовки напряжения уменьшаются за счет активных сил трения на пуансоне и напряжений от изгиба.

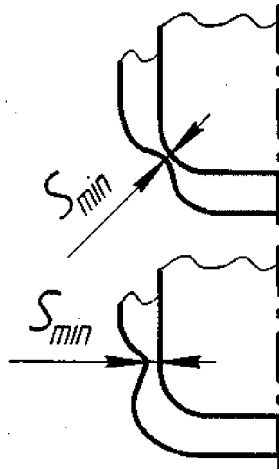


Рисунок 32 - Зависимость утонения от трения

В случае, если поверхность радиусной части заготовки сильно отполирована, попала на нее смазка, максимальные напряжения переходят из цилиндрической части в радиусную.

По мере вытяжки это опасное сечение получает наибольшую величину утонения на стадиях, не достигших величины максимального усилия, и затем, переходит на цилиндрическую поверхность. В дальнейшем происходит обрыв дна при меньших значениях величин усилия в случае, если обработка поверхности радиусной части пуансона отлична от полировки. Надо стремиться к тому, чтобы смазка в радиусной части не попадала на пуансон. Считают, что схема напряженного состояния в цилиндрической части - линейная. Найдем утонение в цилиндрической части.

Используем уравнение кривой упрочнения степенного вида:

$$\sigma_i = A \cdot e_i^n, \quad (6.4)$$

где σ_i , e_i^n - интенсивности напряжений и деформаций;

A , n - константы механических свойств:

$$A = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_\rho) \cdot \psi_\rho^n}, \quad n = \delta_\rho, \quad \delta_\rho = \frac{\psi_\rho}{1 - \psi_\rho}.$$

Для линейной схемы напряженного состояния интенсивность напряжений равна:

$$\sigma_i = \sigma_\rho \text{ и } e_i = e_s.$$

Выражение (6.4) примет вид:

$$\sigma_{\rho MAX} = A \cdot e_s^n. \quad (6.5)$$

$$S_{MIN} = S_s \cdot \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{\rho MAX}}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \right],$$

$$S_{CP} = \frac{S_{MAX} + S_{MIN}}{2} \approx S_s.$$

Из условия постоянства объема $V_s = V_d$, не учитывая величину упругой деформации $F_s S_s = F_d \overline{S_d}$, где $\overline{S_d}$ - толщина детали по средней поверхности ($\overline{S_d} = \overline{S_s}$), получаем условие равенства площадей при вытяжке:

$$F_d = F_s. \quad (6.6)$$

Условие равенства площадей детали и заготовки положено в основу определения деформаций при вытяжке любого элемента фланца.

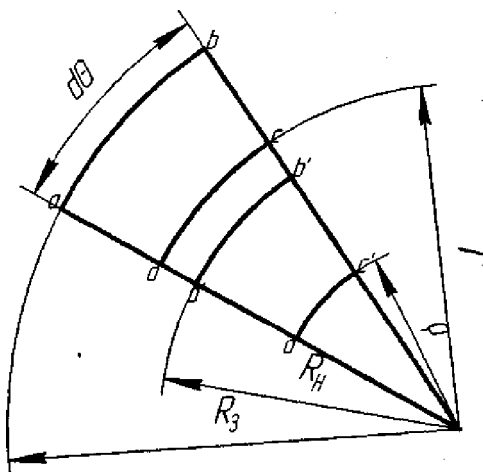


Рисунок 33 - Схема к определению деформаций во фланце при осесимметричной вытяжке

Выделим на фланце бесконечно малый плоский элемент $abcd$ двумя плоскостями, проходящими через ось детали, перпендикулярно к площади фланца и образующие между собой $\angle d\theta$. С другой стороны этот элемент образован двумя концентрическими окружностями, имеющими центр на оси симметрии и имеющие радиуса R_s и r . Рассмотрим стадию вытяжки, когда плоский элемент

abcd находится в положении a'b'c'd', ограниченном радиусами R_H и ρ .

Тангенциальные деформации элементов найдем из геометрии:

$$e_{\theta R_H} = \ln \left| \frac{l_{a'b'}}{l_{ab}} \right| = \ln \left| \frac{d\theta R_H}{d\theta R_s} \right| = \ln \left| \frac{R_H}{R_s} \right|, \quad (6.7)$$

$$e_{\theta \rho} = \ln \left| \frac{l_{d'c'}}{l_{dc}} \right| = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|.$$

Длина $l_{\rho d'c'}$, задается $l_{\rho d'c'} = \rho d\theta$.

Длина исходного состояния этого элемента $l_{dc} = r d\theta$.

Если известна зависимость $r = f(\rho)$, то мы получаем величину деформации e_θ от независимой координаты ρ . Связь между r и ρ находится из условия равенства площадей, рассматриваемых элементов до и после деформации.

$$F_{a'b'c'd'} = F_{abcd},$$

где $F_{a'b'c'd'} = (R_H^2 - \rho^2) d\theta$, $F_{abcd} = (R_s^2 - r^2) d\theta$,

тогда $R_H^2 - \rho^2 = R_s^2 - r^2$,

отсюда

$$r = \sqrt{R_s^2 - R_H^2 + \rho^2}. \quad (6.8)$$

Для того, чтобы определить две другие деформации e_ρ и e_θ используют уравнение связи напряжений и деформаций:

$$e_s = -\frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_\rho} e_\theta,$$

$$e_\theta = -\frac{e_i}{\sigma_i} \left(\sigma_\theta - \frac{1}{2} \sigma_\rho \right) \quad (\sigma_K \approx 0 \text{ плоская схема напряженного состояния}), \quad (6.9)$$

$$e_s = -\frac{e_i}{\sigma_i} \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2}.$$

Используя методику, предложенную Е.А. Поповым, будем считать, что соотношения напряжений в процессе формообразования величины для каждого элемента постоянные $\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = \text{const}$ и не зависит от упрочнения и изменения толщины.

Другими словами, рост напряжений σ_ρ , σ_θ за счет упрочнения происходит пропорционально одному и тому же коэффициенту:

$$\frac{\sigma_p \cdot K_{ynp}}{\sigma_\theta \cdot K_{ynp}} = \text{const.}$$

Если меняется толщина заготовки, то пропорционально меняются и величины напряжений:

$$\frac{\sigma_p \cdot K_s}{\sigma_\theta \cdot K_s} = \text{const.}$$

Это условие позволяет определить деформации по отношению напряжений $\frac{\sigma_p}{\sigma_\theta}$, используя напряжения (найденные без упрочнения и изменения толщины).

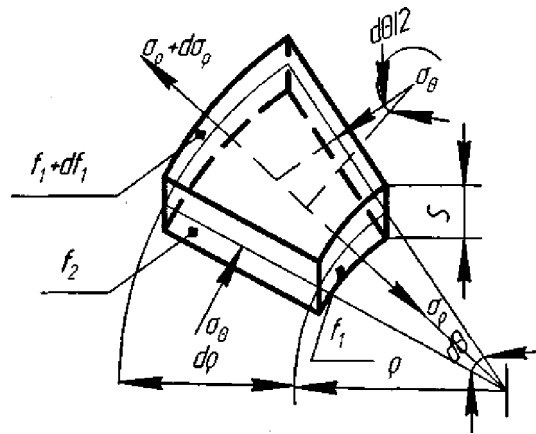


Рисунок 34 - Схема действия сил на фланце

Найдем напряжения, действующие на фланце без учета упрочнения и изменения толщины. Составим уравнение равновесия на бесконечно малый элемент фланца заготовки. Составим уравнение равновесия сил, действующих на координату $\sum P_{\theta\rho} = 0$. На две другие координаты смысла составления уравнений нет, так как они обращаются в тождество.

$$\sum_{\theta=0} P_\theta = \sum_{\theta=0} P_\theta, \quad \sum_{\rho=0} P_\rho = \sum_{\rho=0} P_\rho, \quad \sum_{\theta\rho} P_{\theta\rho} = 0,$$

$$(\sigma_\theta + d\sigma_\theta) \cdot (f_1 + df_1) + 2 \cdot \sigma_\theta \cdot f_2 \cdot \sin \frac{d\theta}{2} - \sigma_p \cdot f_1 = 0. \quad (6.10)$$

Раскрыв скобки уберем величины, которые на порядок меньше остальных, а

также учтем, что $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$, тогда получим:

$$\sigma_\rho \cdot f_1 + d\sigma_\rho \cdot f_1 + \sigma_\rho \cdot df_1 + d\sigma_\rho \cdot df_1 + \sigma_\theta \cdot f_2 \cdot d\theta - \sigma_\rho \cdot f_1 = 0,$$

$$d\sigma_\rho \cdot f_1 + \sigma_\rho \cdot df_1 - \sigma_\theta \cdot f_2 \cdot d\theta = 0.$$

Найдем значения площадей:

$$f_1 = \rho \cdot d\theta \cdot S,$$

$$f_2 = S \cdot d\rho.$$

После преобразования получим:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho + \sigma_\theta = 0. \quad (6.11)$$

Уравнение (6.11) содержит 2 неизвестных σ_ρ и σ_θ . Условие пластичности примем по максимальным касательным напряжениям:

$$\sigma_{MAX} - \sigma_{MIN} = \beta \cdot \sigma_s, \quad (6.12)$$

$\beta = 1 \div 1,15$ определяет схему напряженного состояния, в нашем случае $\beta \approx 1$

$$\sigma_\rho > 0, \sigma_\theta < 0, \sigma_K = 0,$$

$$\sigma_{MAX} = \sigma_\rho,$$

$$\sigma_{MIN} = -\sigma_\theta.$$

Условие пластичности (без учета упрочнения) запишется следующим образом:

$$\sigma_\rho - (-\sigma_\theta) = \sigma_{0,2}. \quad (6.13)$$

Подставив в (6.11) уравнение (6.13), получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$d\sigma_\rho = -\sigma_{0,2} \cdot \frac{d\rho}{\rho}.$$

Проинтегрировав уравнение, получим:

$$\sigma_\rho = -\sigma_{0,2} \cdot \ln \rho + C.$$

Граничные условия: $\sigma_\rho = 0$, $R_H = \rho$, тогда постоянная интегрирования равна:

$$C = \sigma_{0,2} \ln \left| \frac{R_H}{\rho} \right|.$$

В результате имеем:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{0,2} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{\rho} \right|. \quad (6.14)$$

При $\rho = r_d$ σ_{ρ} будет максимальным.

По найденным значениям построим эпюры напряжений и деформаций на фланце заготовки.

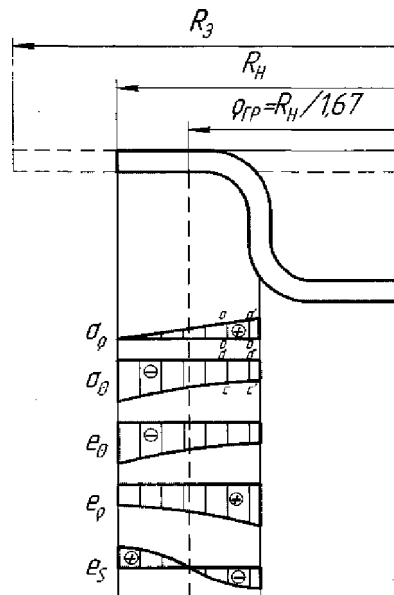


Рисунок 35 - Эпюры изменения напряжений и деформаций на фланце при вытяжке

6.1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

К ним относятся:

- Форма и размеры заготовки.
- Геометрические параметры штамповой оснастки (радиус закругления, зазоры).
- Энергетические параметры (усилие процесса, усилие прижима, работа).
- Предельные параметры.

6.1.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ

В принципе форма заготовки может быть любой. Её выбирают исходя из 2 принципов:

- Достичь наивысшего коэффициента металла.
- Получить наибольший коэффициент вытяжки $K_B = \frac{D_3}{d_3}$, где D_3, d_3 - диаметры

заготовки и детали

Наивысший коэффициент использования металла возможно получить, если стремиться к условию подобия формы исходного материала к форме заготовки. Коэффициент вытяжки наибольший в том случае, если форма заготовки и форма детали совпадает. Размеры заготовки определяются из условия постоянства площадей заготовки и детали по срединной поверхности.

Условие постоянства объемов:

$$V_D = V_3,$$
$$V_3 = F_3 S_3 = F_D \overline{S}_D,$$

где S_D - средняя толщина детали.

Исходя из равенства $\overline{S}_D \approx S_3$, условие постоянства объема превращается в условие постоянства площадей:

$$V_D = V_3,$$
$$F_3 = F_D = \sum_{i=1}^n F_{Di},$$

где F_{Di} - площадь элементарных фигур.

6.1.2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Зазор между матрицей и пуансоном выбирается из условия, чтобы максимальная толщина вытягиваемой заготовки не претерпевала принудительного утонения, то есть зазор должен быть равен максимальной толщине детали.

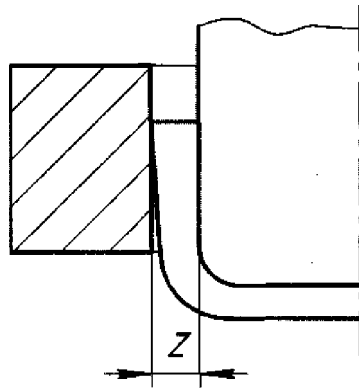
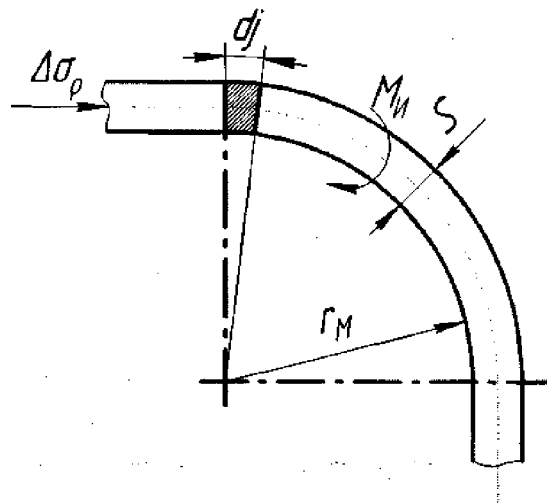


Рисунок 36 - Определение зазора при вытяжке



r_M – радиус матрицы (или пуансона), S – толщина материала, dj – угол, ограничивающий рассматриваемый бесконечно малый элемент, $\Delta\sigma_p$ – дополнительное напряжение, приложенное извне, необходимое для преодоления сопротивления рассматриваемого элемента, $M_{и}$ – внутренний момент изгиба элемента при изменении его кривизны от конечного значения до бесконечно большого и наоборот

Рисунок 37 - Схема к определению радиусов матрицы и пуансона

Необходимое дополнительное напряжение определяем из условия равенства работ от внешних и внутренних сил:

$$A_{BH} = A_B. \quad (6.15)$$

Работа внешних сил: $A_{BH} = \Delta\sigma_{pH} \cdot S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S) \cdot dj$,

где $b = 1$ - единица ширины;

$S \cdot b = F$ - площадь;

$(r_M + 0,5S)$ - плечо.

Работа внутренних сил $A_B = M_H \cdot dj$.

$$\text{Так как } A_{BH} = A_B, \text{ то } \Delta\sigma_{\rho H} = \frac{M_H}{S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S)} = \sigma_{02} \frac{S^2}{4 \cdot S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S)} = \frac{\sigma_{0,2}}{2 \frac{r_M}{S} + 1}.$$

Таким образом, с уменьшением $\frac{r_M}{S} \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta\sigma_{\rho H} \rightarrow \sigma_{02}$.

На рисунке показан характер изменения дополнительного напряжения.

Оптимальным значением считается: $\frac{r_M}{S} = (5 \div 8)$.

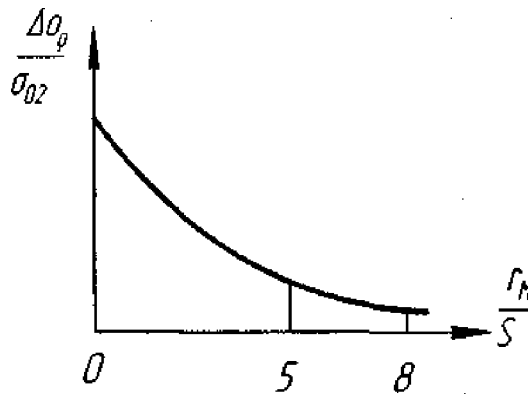


Рисунок 38 - Зависимость дополнительного напряжения изгиба от радиуса

6.1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ

Усилие процесса вытяжки определяется из условия равенства внешнего P_{BH} и внутреннего P_B усилий сопротивления: $P_{BH} = P_B$.

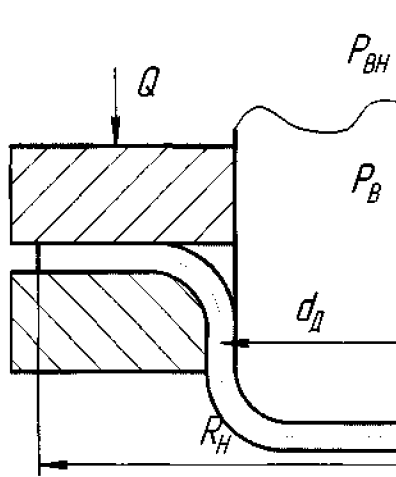


Рисунок 39 - Схема к определению усилия вытяжки

Сила и напряжение - векторные величины. Возьмем напряжения в той части заготовки, в которой направление напряжений совпадает с направлением усилия сопротивления и противоположно внешнему, то есть цилиндрический участок заготовки, а напряжение - меридиональное, действующее вдоль образующей. С учетом сказанного:

$$P_B = \sigma_\rho \cdot \pi \cdot d_D \cdot S,$$

$$\text{где } \pi \cdot d_D \cdot S = \frac{\pi \cdot (d_{BH}^2 - d_B^2)}{4} = \pi \frac{(d_{BH} + d_B)}{2} \cdot \frac{(d_{BH} - d_B)}{2}, S = S_3.$$

Найдем напряжение в цилиндрической части, используя принцип суперпозиций (наложение одного фактора на другой путем их суммирования). Напряжение в цилиндрической части будем определять как сумму напряжений от нескольких факторов:

$$\sigma_{\rho MAX} = \sigma_\rho' + \Delta\sigma_{np} + \Delta\sigma_{изг} + \Delta\sigma_{тр}, \quad (6.16)$$

где σ_ρ' - напряжение от деформации с учетом упрочнения;

$\Delta\sigma_{np}$ - дополнительное напряжение от трения заготовки под прижимом;

$\Delta\sigma_{изг}$ - дополнительное напряжение от изгиба по кромке матрицы;

$\Delta\sigma_{тр}$ - дополнительное напряжение от трения по кромке матрицы.

Чтобы учесть упрочнение, мы принимаем модель, в соответствии с которой элементы фланца заготовки упрочняются одинаково, причем так же, как кромка

заготовки. Чтобы учесть упрочнение введем степенную функцию, которая учитывает упрочнение:

$$\sigma_s = A \cdot e_i^n,$$

где A , n - константы механических свойств:

$$A = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_{III}) \cdot \psi_{III}^n}, \quad n = \frac{\psi_{III}}{1 - \psi_{III}}. \quad (6.17)$$

Интенсивность деформаций заменим максимальной величиной, для кромки ею является тангенциальная деформация:

$$e_i = e_{MAX} = e_\theta,$$

$$e_\theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_3 - 2 \cdot \pi \cdot R_H}{2 \cdot \pi \cdot R_3} = \frac{R_3 - R_H}{R_3} = X.$$

Тангенциальная деформация кромки равна относительной величине перемещения X .

Таким образом $\sigma'_\rho = A \cdot X^n \cdot \ln \left| \frac{R_H}{r_D} \right|$, (6.18)

при $\rho = r_D$ (r_D - радиус детали). Запишем:

$$\ln \left| \frac{R_H}{r_D} \cdot \frac{R_3}{R_3} \right| = \ln |K_B| + \ln |1 - X| = \ln |K_B| - X,$$

где $K_B = \frac{R_3}{r_D}$ - коэффициент вытяжки, $X = \frac{R_3 - R_H}{R_3}$ - перемещении кромки, соответствующее максимальному усилию. Последнее выражение получили в результате разложения в степенной ряд $\ln |1 - X| \approx -X$, так как $X < 1$. Тогда:

$$\sigma'_\rho = A \cdot X^n \cdot \ln (\ln |K_B| - X). \quad (6.19)$$

Это выражение позволяет определить, при каких величинах перемещения X кромки $\sigma'_\rho = 0$.

При $X = 0$ и $X = \ln |K_B|$ $\sigma'_\rho = 0$. То есть значение X , при котором напряжение достигает экстремума. Чтобы найти экстремум нужно продифференцировать выражение (4.19) по X .

$$\frac{d\sigma'_\rho}{dX} = 0 \Rightarrow n \cdot X^{n-1} \cdot (\ln K_B - X) + X^n \cdot (-1) = 0. \text{ Отсюда } X = \frac{n}{1+n} \cdot \ln K_B = \psi_{III} \cdot \ln K_B.$$

Найдем составляющую трения заготовки на поверхности прижима и матрицы. Будем считать, что прижим является абсолютно жестким, поэтому усилие прижима приходится на площадь поверхности торца.

$$\Delta\sigma_{np} = q \cdot f,$$

где f - коэффициент трения, q - давление прижима на заготовку равное:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_H \cdot S},$$

$$Q = q_1 \cdot F_{\phiЛ},$$

q_1 - находится по табличным данным.

$$F_{\phiЛ} = \pi [R_s^2 - (r_d + r_M)^2],$$

где r_M - радиус матрицы;

q_1 - условное давление, которое прикладывается по всей поверхности фланца;

$F_{\phiЛ}$ - площадь фланца, находящаяся под прижимом.

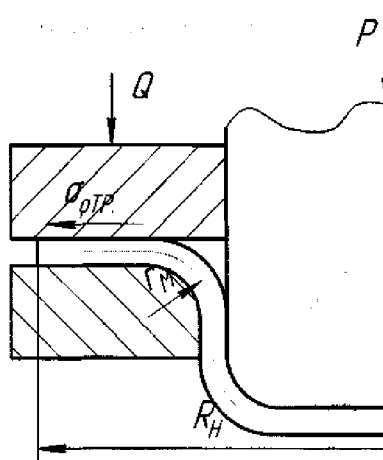


Рисунок 40 - Схема к определению напряжения от трения под прижимом

Давление q должно быть оптимальным, а именно таким, чтобы усилие вытяжки было при нем наименьшим при достаточном качестве изделия.

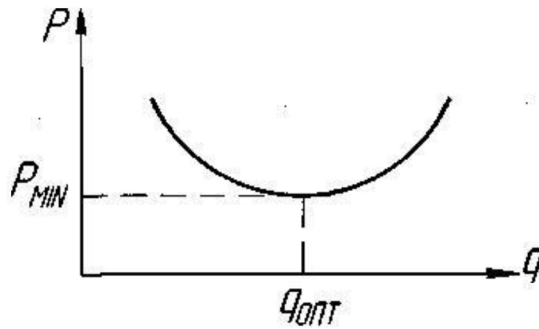


Рисунок 41 - Зависимость усилия от давления прижима

Большое давление q приводит к росту трения под прижимом и росту напряжений в опасном сечении. Малое значение q приводит к небольшому гофрообразованию фланца, которое необходимо устранить, применяя дополнительное напряжение в опасном сечении. Таким образом:

$$\Delta\sigma_{np} = \frac{Q \cdot f}{2 \cdot \pi \cdot R_H \cdot S} \quad (6.20)$$

Кроме того, что на ребре матрицы происходит изгиб, имеет место трение. Трение учтем по закону Эйлера. Таким образом, получаем окончательное напряжение в опасном сечении в цилиндрической части:

$$\sigma_{pMAX} = \left[\underbrace{A \cdot (\psi_{III} \cdot \ln K_B)^n}_{\sigma_s^*} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{r_d} \right| + \frac{\sigma_s^*}{2 \cdot \frac{r_M}{S} + 1} + \sigma_{TP} = \frac{Q \cdot f}{2 \cdot \pi \cdot R_H \cdot S} \right] \cdot e^{f_{TP} \cdot j} \quad (6.21)$$

Данное уравнение используется в том случае, если при вытяжке используется ненормализованные технологические параметры, то есть отличные от справочных. Например:

1. Вытяжка заготовки с узким фланцем и маленьким радиусом закругления.
2. При вытяжке тонкостенных заготовок с большим фланцем.

Для кривошипных прессов важным показателем является работа процесса. Геометрически работа процесса определяется площадью фигуры, находящейся под графиком усилия процесса.

$$A_{\text{проц}} = k \cdot P_{\text{MAX}} \cdot h,$$

где h – высота детали, $k = 0,7 \div 0,9$.

Цилиндрическая деталь $k = 0,7$

Деталь с фланцем $k = 0,9$

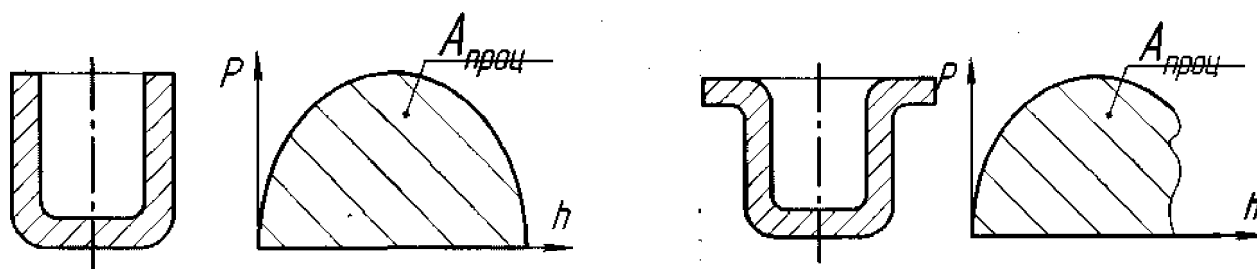


Рисунок 42 - Геометрические представления работы процесса вытяжки

6.1.2.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПЕРЕХОДОВ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

Часто коэффициент вытяжки, необходимый для получения детали, больше предельного коэффициента. Поэтому вытяжки ведут за несколько переходов.

$$K_B > K_B^{\text{ПРЕД}}.$$

Предельный коэффициент вытяжки $K_B^{\text{ПРЕД}}$ определяется из условия $\sigma_{\rho\text{MAX}} = \sigma_B$.

$$\sigma_{\rho\text{MAX}} = \left[A \cdot (\psi_{\text{ш}} \cdot \ln K_B)^n \cdot \ln \left| \frac{R_H}{r_D} \right| + \frac{\sigma_S^*}{2 \cdot \frac{r_M}{S} + 1} + \sigma_{\text{TP}} = \frac{Q \cdot f}{2 \cdot \pi \cdot R_H \cdot S} \right] \cdot e^{f_{\text{TP}} \cdot j} = \sigma_B. \quad (6.22)$$

Отсюда находим предельный коэффициент K_B . Предельный коэффициент вытяжки – это самый большой коэффициент, при котором заготовка вытягивается без дефектов.

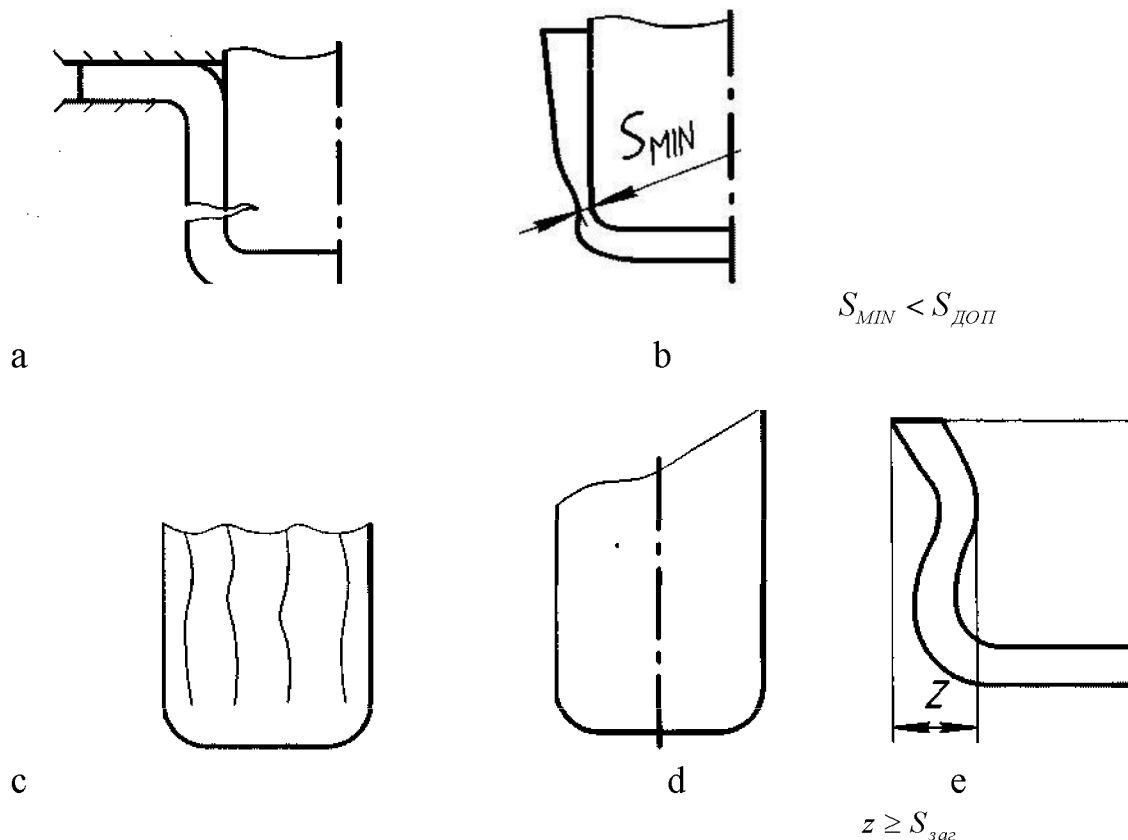


Рисунок 43 - Дефекты при вытяжке

Число переходов при вытяжке определяют следующим образом. Представим коэффициент вытяжки в виде:

$$K_B = \frac{R_3}{r_{\text{д}}} \cdot \frac{R_1}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_2} \cdot \dots \cdot \frac{R_{n-1}}{R_{n-1}},$$

перепишем выражение в следующем виде:

$$K_B = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \dots \cdot \frac{R_{n-2}}{R_{n-1}} \cdot \frac{R_{n-1}}{r_{\text{д}}}.$$

В результате получим:

$$K_B = K_{B1} \cdot K_{B2} \cdot K_{B3} \cdot K_{Bn}.$$

Практика показывает, что коэффициенты вытяжки на разных операциях неодинаковы. Причем на первых операциях K_B наибольший, на последующих он значительно меньше, примерно в $1,5 \div 1,7$ раза. Однако, начиная со второй операции

$K_{B2} \approx K_{Bn}$, а $K_{B1} \gg K_{B2}$. Последнее выражение представим в виде: $K_B = K_{B1} \cdot K_{B2}^{n-1}$,

отсюда: $n = 1 + \frac{\ln K_B - \ln K_{B1}}{\ln K_{B2}} K_B$.

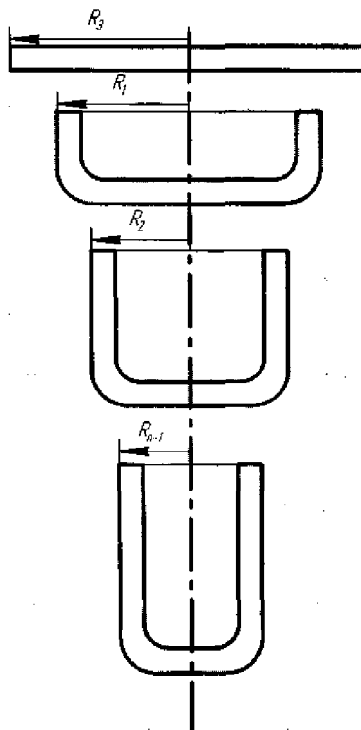
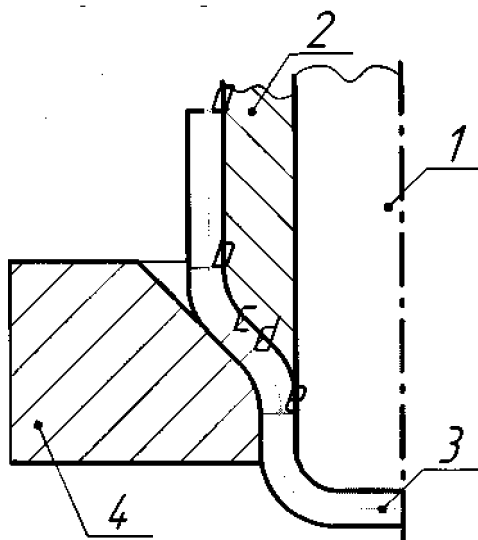


Рисунок 44 - Последовательность операций вытяжки

То, что на последующих операциях коэффициент вытяжки значительно меньше, чем на первой операции, объясняется следующими причинами:

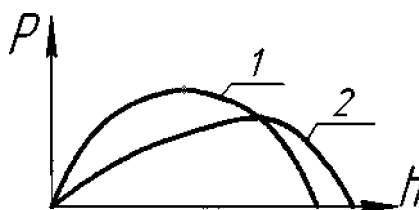
1. Заготовка в виде цилиндра уже упрочнена. Фланец упрочняется и утолщается, и его значительно труднее тянуть.
2. Имеет место дополнительное напряжение от изгиба и трения не только по радиусу матрицы, но и по радиусу прижима (участок be).



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

Рисунок 45 - Схема последующей операции вытяжки

Диаграмма усилия при вытяжке на последующих операциях выглядит следующим образом:



1 – диаграмма первого перехода, 2 – диаграмма второго перехода

Рисунок 46 - Диаграмма вытяжки

Диаграмма 1 короче, однако, усилие процесса выше за счет площади сечения. На последующих - усилие меньше, так как площадь сечения заготовки уменьшается.

6.2 ОБЖИМ

Обжим (рисунок 7, 8, 9) характеризуется следующей схемой напряженного состояния (рисунок 47).

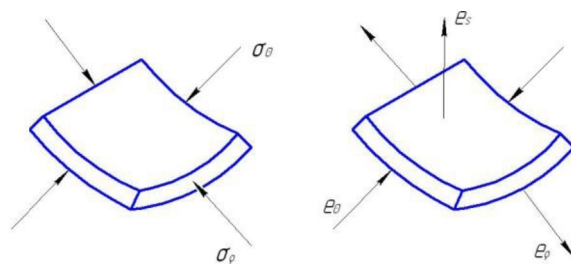


Рисунок 47 - Характерная схема напряжённо-деформированного состояния при обжиге

Диаграмма при обжиге имеет вид (рисунок 48). Для деталей, имеющих выход на цилиндрический участок, усилие процесса остаётся постоянным.

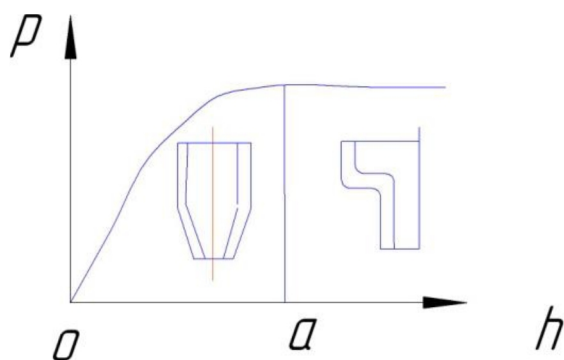
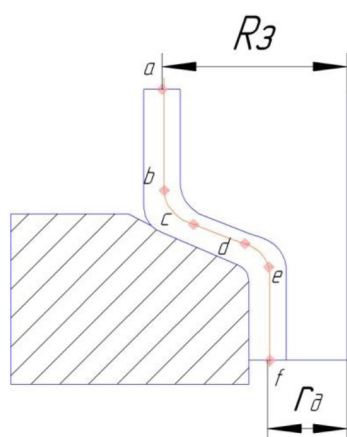
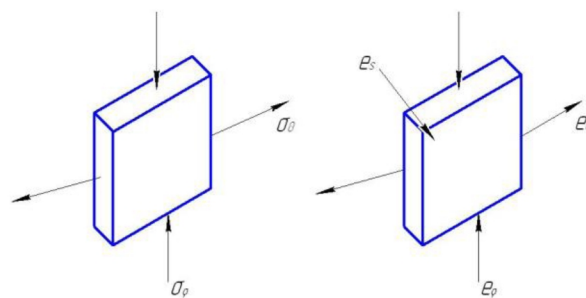


Рисунок 48 - Диаграмма процесса обжига

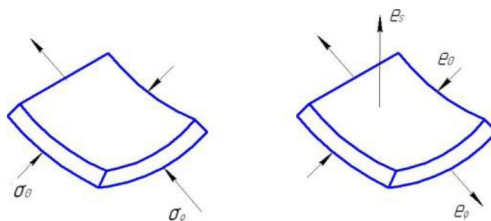
Кроме основного участка разные части заготовки имеют свои схемы напряжённо-деформированного состояния (рисунок 49).



Участок ab - цилиндрический упругий участок передающего усилия.

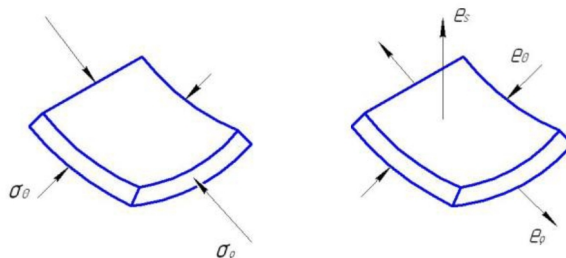


Участок bc – участок радиуса свободного изгиба.



Участок cd – основной участок обжима.

Участок de – участок радиусного закругления матрицы.



Участок ef – упругий участок выхода заготовки.

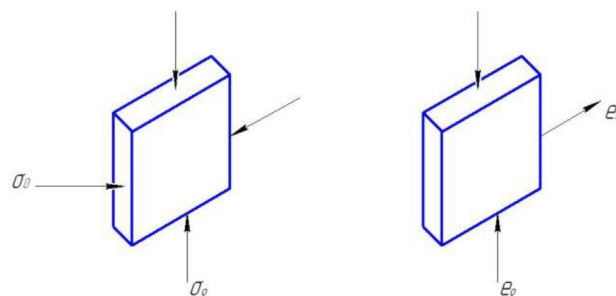


Рисунок 49 - Схема напряжённо-деформированного состояния заготовки по участкам при обжиге

6.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБЖИМЕ

Наиболее просто при обжиге трубной заготовки определяется деформация в тангенциальном направлении.

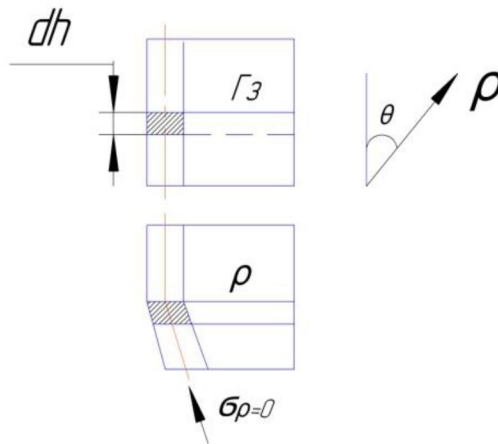


Рисунок 50 - Схема к определению тангенциальной деформации при обжиге

Из рисунка видно, что

$$e_{\theta} = \ln \left| \frac{l}{l_0} \right|,$$

где $\begin{cases} l_0 = 2\pi \cdot r_3 \\ l = 2\pi\rho \end{cases}, e_{\theta} = \ln \left| \frac{2\pi\rho}{2\pi \cdot r_3} \right|.$

Для того чтобы найти другие деформации воспользуемся уравнением связи напряжений и деформаций.

$$e_s = \frac{\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} + 1}{\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} - 2} e_{\theta}, \quad (6.23)$$

отсюда

$$S = S_3 \left(\frac{\rho}{r_{kp}} \right). \quad (6.24)$$

Для определения деформаций l_3 необходимо узнать значение соотношения напряжений, причем это соотношение, как говорилось ранее, слабо меняется от

упрочнения и от изменения толщины.

Решение уравнения равновесия с условием пластичности $\sigma_\theta = -\sigma_s$ даёт результат (при граничных условиях $\rho = r_{kp}$; $\sigma_\rho = 0$)

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left(1 - \frac{r_{kp}}{\rho} \right) (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha), \quad (6.25)$$

где f - коэффициент трения;

α - угол конусности матрицы.

Эпюры напряжений и деформаций с учётом трения и без учета имеют вид (рисунок 51):

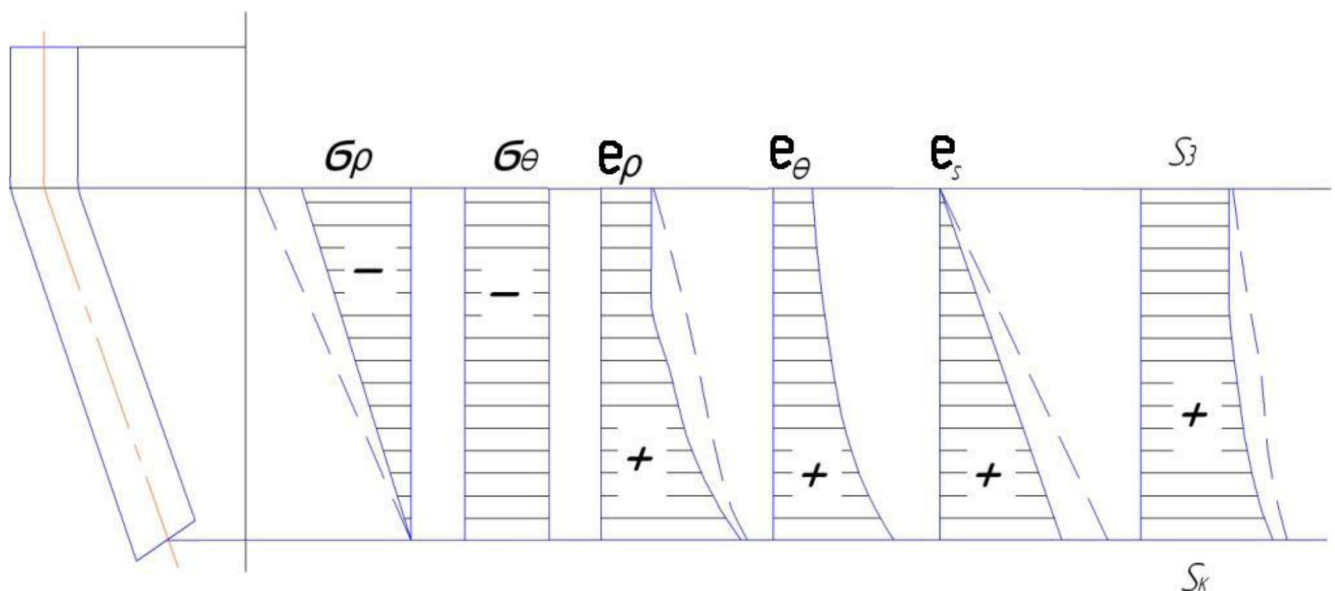
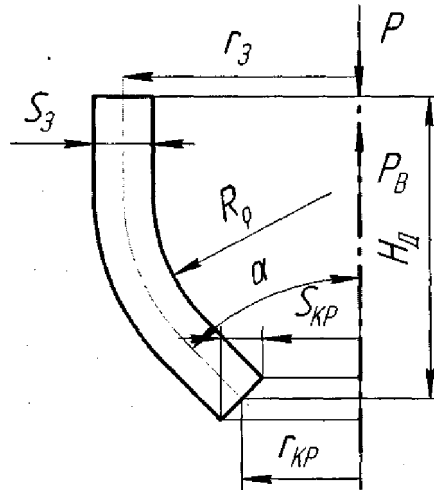


Рисунок 51 - Эпюры напряжений и деформаций при обжиге трубной заготовки с учетом и без учета трения

6.2.2 РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБЖИМЕ

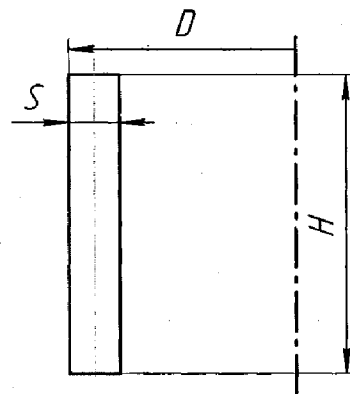
- Усилие процесса.
- Количество переходов.
- Предельный коэффициент обжима.
- Форма и размер заготовки.

6.2.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ



P – внешне приложенное усилие, P_B – внутренне усилие сопротивления, r_z – радиус заготовки, r_{kp} – радиус кромки, S_z – толщина заготовки, S_{kp} – толщина кромки, H_d – высота детали, α – угол конусности

Рисунок 52 - Размеры детали



H – высота, D – диаметр, S – толщина заготовки

Рисунок 53 - Размеры заготовки

Рассматривая схему НДС определили, что цилиндрическая часть заготовки деформировалась упруго, поэтому толщина заготовки и диаметр сечения соответствует толщине и диаметру сечения детали.

Неизвестным для заготовки остаётся высота H . Её значение определяем из условия равенства объёма заготовки и объёма детали:

$$V_z = V_d,$$

$$F_3 \cdot S_3 = F_0 \cdot \bar{S}_0,$$

где F_3 , F_0 - площади по срединной поверхности заготовки и детали соответственно;
 S_3 , $\bar{S}_0$ - средняя толщина заготовки и детали.

$$\bar{S}_0 \approx \frac{S_3 + S_{kp}}{2} \approx \frac{1}{r_3 - r_{kp}} \int_{r_{kp}}^{r_3} S_0 d\rho.$$

Здесь S_0 является функцией ρ . При обжиге толщина постоянно увеличивается.

Толщину кромки находят из следующего условия, используя уравнение связи:

$$e_s = -\frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_\rho} e_\theta. \quad (6.26)$$

Для кромки тангенциальная деформация:

$$e_\theta = \ln \left| \frac{2\pi \cdot r_{kp}}{2\pi \cdot r_3} \right| = \ln \left| \frac{r_{kp}}{r_3} \right|.$$

Для кромки меридиональное напряжение $\sigma_{\rho_{kp}} = 0$, тогда уравнение (6.26) примет вид:

$$\ln \left| \frac{S_{kp}}{S_3} \right| = -\frac{1}{2} \ln \left| \frac{r_{kp}}{r_3} \right|,$$

$$\frac{S_{kp}}{S_3} = \left(\frac{r_{kp}}{r_3} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (6.27)$$

или

$$S_{kp} = S_3 \cdot \sqrt{\frac{r_3}{r_{kp}}}.$$

Площадь детали определяется как сумма элементарных площадей:

$$F_D = \sum_{i=1}^n F_{Di}.$$

Зная площадь и среднюю толщину детали, можно найти объем детали:

$$V_D = \sum_{i=1}^n V_{Di} = \sum_{i=1}^n F_{Di} \cdot S_{Di}.$$

Если исходной заготовкой является цилиндрическая труба, то

$$\pi \cdot D \cdot H \cdot S_3 = F_d \cdot \overline{S_d}.$$

При обжиме происходит удлинение образующей, при определенном угле конусности α и заданных размерах детали может выполняться равенство высот заготовки и детали $H = H_d$.

6.2.2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИМА

Внешне приложенное усилие должно быть равно внутреннему сопротивлению заготовки $P = P_e$. Внутренне сопротивление $P_e = \sigma F$.

Напряжение и внутренне сопротивление - векторные величины. Так как внешнее усилие противоположно по направлению внутреннему, то для расчета внутреннего усилия сопротивления необходимо использовать то напряжение, которое совпадает по направлению с внутренним усилием сопротивления. При обжиме действуют напряжения σ_p и σ_θ . Из двух напряжений, действующих в заготовке, следует использовать напряжение вдоль образующей заготовки - меридиональное, причем его берут по максимальному значению и соответствующей координате, где прикладывается усилие. Самое большое напряжение действует в цилиндрической части ($\rho = r_s$). Уравнение (6.25) примет вид:

$$\sigma_{pMAX} = \sigma_s^* \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \left(1 - \frac{r_{kp}}{r_s} \right), \quad (6.28)$$

где f - коэффициент трения;

σ_s^* - предел текучести с учетом упрочнения.

Будем считать, что упрочнение заготовки дает дополнительное напряжение, равное дополнительному напряжению, которое получает заготовка в случае, если бы она упрочнялась бы одинаково по всему очагу деформации со степенью деформации, равной элементу, находящемуся в средней части очага. Примем степенной закон упрочнения:

$$\sigma_s^* = A \cdot e_i^n, \quad (4.29)$$

где A , n - константы механических свойств (6.17).

Вместо интенсивности деформаций принимаем $e_i \approx e_{MAX} = e_\theta$, тогда:

$$e_i = e_{MAX} = e_\theta = \ln \left| \frac{r_{kp}}{r_{cp}} \right| = \ln \left| \frac{r_{kp} + r_3}{2 \cdot r_{kp}} \right|.$$

6.2.2.3 РАСЧЕТ ЧИСЛО ПЕРЕХОДОВ ПРИ ОБЖИМЕ И ПРЕДЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЖИМА

Если коэффициент обжима больше предельного $K_{OB} > K_{OB-пред.}$, то процесс обжима ведут в несколько переходов. Коэффициент обжима определяется следующим образом:

$$K_{OB} = \frac{r_3}{r_{kp}}.$$

Предельный коэффициент обжима - это максимальный коэффициент, при котором заготовка деформируется без дефектов.

Можно выделить следующие виды дефектов при обжиге:

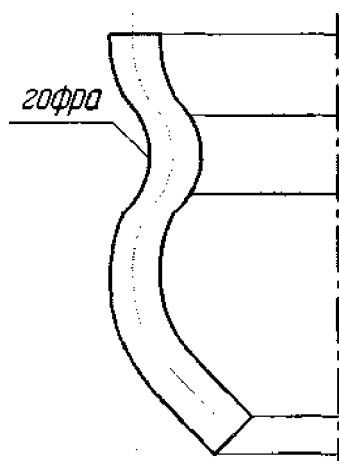


Рисунок 54 - Потеря устойчивости заготовки в цилиндрической части

Этот вид потери устойчивости возникает, когда $\sigma_p = \sigma_{0,2}$.

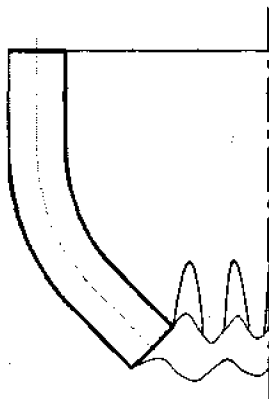


Рисунок 55 - Продольные складки от действия сжимающих напряжений

Этот вид потери устойчивости определяется условием минимума работ от внешних и внутренних сил на возможных перемещениях:

$$\delta(A_{BH} + A_H) \rightarrow \min ,$$

где δ - вариация;

A_{BH} - работа внутренних сил;

A_H - работа от внешних сил.

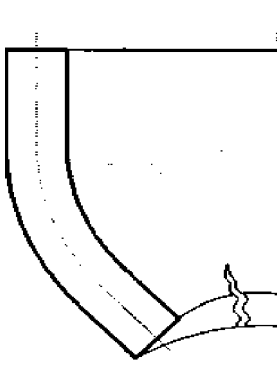


Рисунок 56 - Трещинообразование кромок

Условие образования трещин определяется критерием Колмагорова:

$$\psi = \frac{\int d\varepsilon_i}{\varepsilon_P^{CC}} = 1 \Rightarrow \text{появляется трещина.}$$

Интенсивность деформаций $\varepsilon_i = \varepsilon_{o_кр}$. Из всех критериев выбирается тот, который является наименьшим.

Если необходимо провести обжим повторно, то его следует проводить после отжига заготовки. Чем более упрочненный материал, тем возможность гофрообразования больше. Общий коэффициент обжима:

$$K_{OB} = K_{OB1} \cdot K_{OB2} \cdot K_{OBn}.$$

Если принять $K_{OB1} \approx K_{OBn}$, тогда

$$K_{OB} = K_{OB1}^n, \text{отсюда}$$

$$n = \frac{\ln K_{OB}}{\ln K_{OB1}}, \quad (6.30)$$

где n округляем до целого числа и уменьшаем коэффициенты так, чтобы:

$$K_{OB1} \downarrow \cdot K_{OBn} \downarrow = K_{OB}.$$

6.2.2.4 ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБЖИМА

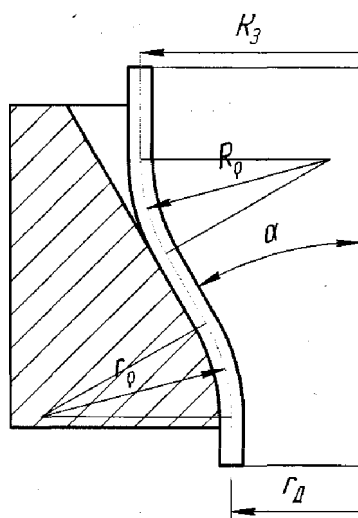
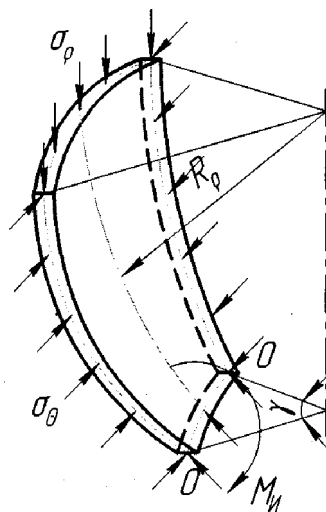


Рисунок 57 - Схема обжима заготовки с радиусами свободного изгиба

В первую очередь это относится к наличию радиуса свободного изгиба, этот участок, деформируясь пластически, не касается инструмента. Это относится как к радиусу свободного изгиба между цилиндрической упругой частью и конической, так и к участку заготовки, который выходит из зоны пластической деформации на цилиндрический участок. Наличие кривизны на участке радиуса свободного изгиба

объясняется действием моментов от основных напряжений - меридиональных и тангенциальных.



σ_p , σ_θ – основные напряжения; M_H – изгибающий момент, действующий от неравномерности напряжений по толщине заготовки, отнесенный к срединной поверхности

Рисунок 58 - Схема действия сил на радиусе свободного изгиба

Условием, из которого определяют радиус свободного изгиба, является равенство моментов:

$$M_H = M_\sigma,$$

где M_σ - момент от действия напряжений по срединной поверхности на торцевые площадки;

M_H - внутренний момент сопротивления:

$$M_H = \sigma_{0,2} \cdot \frac{S^2}{4} \approx \sigma_B \cdot \frac{S^2}{4}.$$

В виду того, что торцевые участки относительно небольшие, считают, что σ_p и σ_θ постоянны. Тогда радиусы свободного изгиба определяется:

$$R_p = \frac{\sqrt{R_3 \cdot S}}{\sin \alpha}, \quad r_p = \frac{\sqrt{r_d \cdot S}}{\sin \alpha}.$$

Радиус свободного изгиба следует определять в том случае, если имеются сомнения по поводу того, получится ли деталь с заданными радиусами сопряжения. При конструктивно-технологическом анализе для малых радиусов рассчитанные значения радиусов свободной поверхности дают ответ - нужна ли дополнительная операция калибровки.

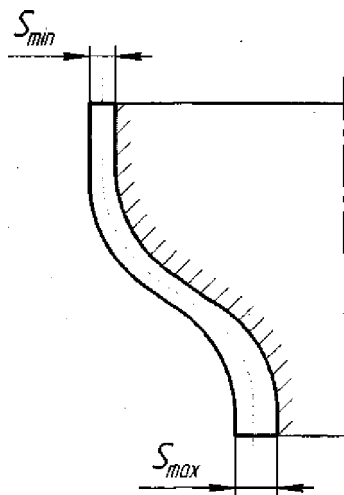


Рисунок 59 - Деталь с разной толщиной вдоль образующей

Способы калибровки деталей (рисунок 61), имеющие неравномерную толщину заготовки, следы от переходов (рисунок 60), чрезвычайно сложны и зависят от того, что принимается за базовую поверхность - наружная или внутренняя. В данном случае базовой поверхностью является наружная. Для получения заданного контура внутренней поверхности необходимо очень точно выполнить размеры пуансона, соответствующие профилю сечения детали.

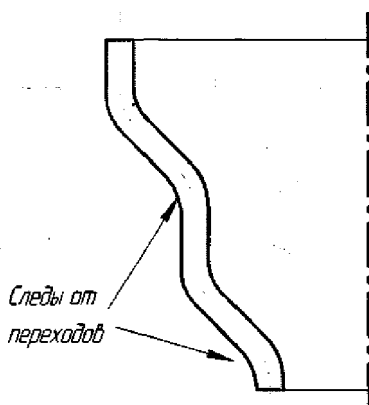
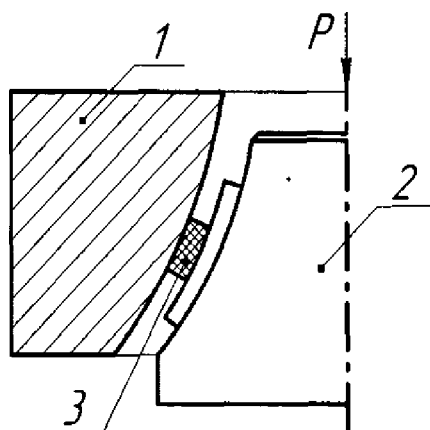


Рисунок 60 - Деталь со следами от переходов

Особенно сложен момент, когда используется многопереходной процесс обжима, в виду того, что остаются следы от переходов.



1 – матрица, 2 – оправка, 3 – эластичный наполнитель

Рисунок 61 - Схема калибровки по внутренней по внутренней поверхности

6.2.2.5 ОСОБЕННОСТИ ОБЖИМА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТАКАНА (РИСУНОК 62)

При обжиге стакана деформация в меридиональном направлении может иметь как положительный, так и отрицательный знак.

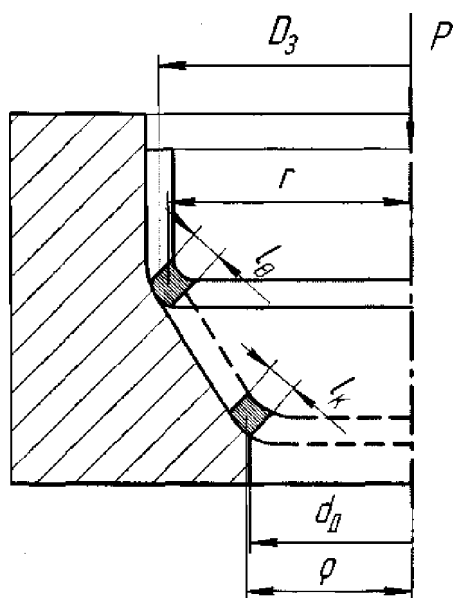


Рисунок 62 - Схема обжима цилиндрического стакана

Если считать коэффициентом обжима $K = \frac{D_3}{d_d}$, то при обжиге цилиндрического стакана $K \rightarrow \infty$. Те элементы, которые находятся ближе ко дну детали имеют $e_\rho > 0$, а те, которые ближе к торцу $e_\rho < 0$. Средняя деформация $e_\rho \approx 0$. Это с достаточной точностью говорит о том, что длины образующей заготовки и детали практически одинаковы. Поэтому это условие дает возможность, исходя из геометрических размеров, определить тангенциальную деформацию $e_\theta = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|$, зная форму и размеры заготовки и детали, по которым находится связь $r = f(\rho)$.

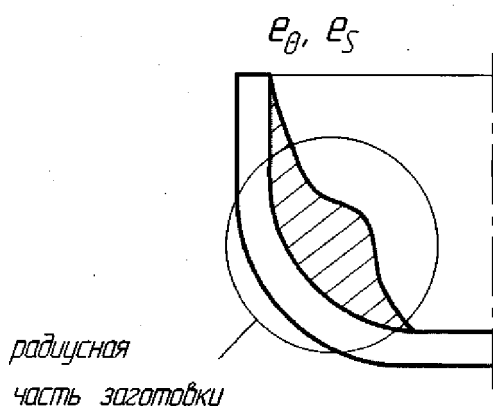


Рисунок 63 - Эпюры деформации при обжиге цилиндрического стакана

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки [Текст]/Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 478 с.
2. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка [Текст]/Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1987. – 234 с.
3. А.С. 852407 СССР, МКИ В21Д 22/02 Журнал. Штамп для вытяжки полых деталей // И.П. Попов, В.П. Чистяков (СССР).-Опубл. 07.08.81, Бюл.№ 29.
4. А.С. 1266607 СССР, МКИ В21Д 22/20. Устройство для глубокой вытяжки. // И.П. Попов, В.П.Чистяков, Ф.В. Гречников, В.Д. Маслов и др. (СССР). Опубл. 30.10.86, Бюл.№ 40.
5. А.С. 550200 СССР, МКИ В21Д 22/26. Способ изготовления штампованных днищ с отбортованными наружу люками // В.П. Чистяков, И.П. Попов, Л.С.Токмак (СССР). - Опубл. 15.03.77, Бюл.№ 10.
6. А.С. 1391773 СССР, МКИ В21Д 22/28. Способ штамповки полых осесимметричных изделий. // В.П.Чистяков, А.Г.Овчинников, И.П.Попов и др. (СССР).- Опубл. 25.11.78., Бюл.№ 43.
7. Мельников, Э.Л. Холодная штамповка днищ [Текст]/Э.Л. Мельников, – М.: Машиностроение, 1976. – 183 с.
8. Попов, И.П. Использование метода возмущения при определении технологических параметров штамповки авиационных деталей [Текст]/И.П. Попов, В.Д. Маслов. – Известия вузов. Авиационная техника, 1985. – № 4. –С –93-96.