МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

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

Ф. В. Гречников, И. П. Попов, К. А. Николенко

Технологии и оборудование инновационных процессов

Электронное учебное пособие
по лекционному курсу

САМАРА
2010

Авторы: **Гречников Фёдор Васильевич,**
Попов Игорь Петрович,
Николенко Константин Анатольевич

Приведены сведения о прогрессивных технологических процессах листовой штамповки, штамповки выдавливанием в разъемные матрицы, производства деталей из металлических порошков. Кратко рассмотрено современное состояние нанотехнологий. Показано, что все показанные выше технологические процессы целесообразно осуществлять с использованием специализированных гидропрессов. Описаны разработанные специализированные гидропрессы и приведены примеры изготовленных на них деталей.

Предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Инновационные технологии получения и обработки материалов с заданными свойствами» по направлению 150400.68 «Металлургия».

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

Содержание

Введение **3**

1 Инновационные технологические процессы пластического деформирования деталей из листовых заготовок **5**

1.1 Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании 5

1.2 Установление заданной толщины заготовки 7

1.3 Методика определения толщины деталив формообразующих операциях 15

1.4 Использование способов листовой штамповки 21

1.5 Использование технологических параметров процессов 36

1.5.1 Использование параметра исходной толщины заготовки 42

1.5.2 Использование двух параметров технологического процесса 45

2 Специализированные прессы для обработки материалов давлением и их технологическое применение **51**

2.1 Целесообразность создания специализированных прессов для вытяжки деталей пулеобрзной формы из листовых заготовок 51

2.2 Пресс для двухстороннего выдавливания в разъемные матрицы поковок деталей с боковыми отростками 60

2.3 Малогабаритные многофункциональные гидравлические прессы 67

2.3.1 Расширение области применения холодной объемной штамповки выдавливанием с активными силами трения 68

2.3.2 Производство высококачественных деталей из металлических порошков 88

2.3.3 Производство нанопорошковых заготовок 107

Заключение **111**

Список использованных источников **112**

Введение

Большое количество деталей авиационной техники изготавливают по технологии, в которой заложены инструментальные процессы штамповки. К ним в первую очередь относятся инновационные 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 направленно 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, отличных от традиционных, и их можно отнести к специальным способам штамповки в рамках одного или нескольких процессов.

В работе рассматриваются некоторые специальные способы формообразования основных процессов: вытяжки, обжима, осадки, формовки, отбортовки, раздачи.

Приведены сведения о прогрессивных технологических процессах листовой штамповки, штамповки выдавливанием в разъемные матрицы, производства деталей из металлических порошков. Кратко рассмотрено современное состояние нанотехнологий. Показано, что все показанные выше технологические процессы целесообразно осуществлять с использованием специализированных гидропрессов. Описаны разработанные специализированные гидропрессы и приведены примеры изготовленных на них деталей.

1 Инновационные технологические процессы пластического деформирования деталей из листовых заготовок

1.1 Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании

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

$$\iint_F \left(S_q - S_T\right)^2 dF \to \min, \tag{1}$$

где S_q – заданная толщина детали,

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

F – площадь детали по срединной поверхности.

Выражение (1) 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) дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысит эксплуатационные характеристики детали. На рисунке 1А показана осессимметричная 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

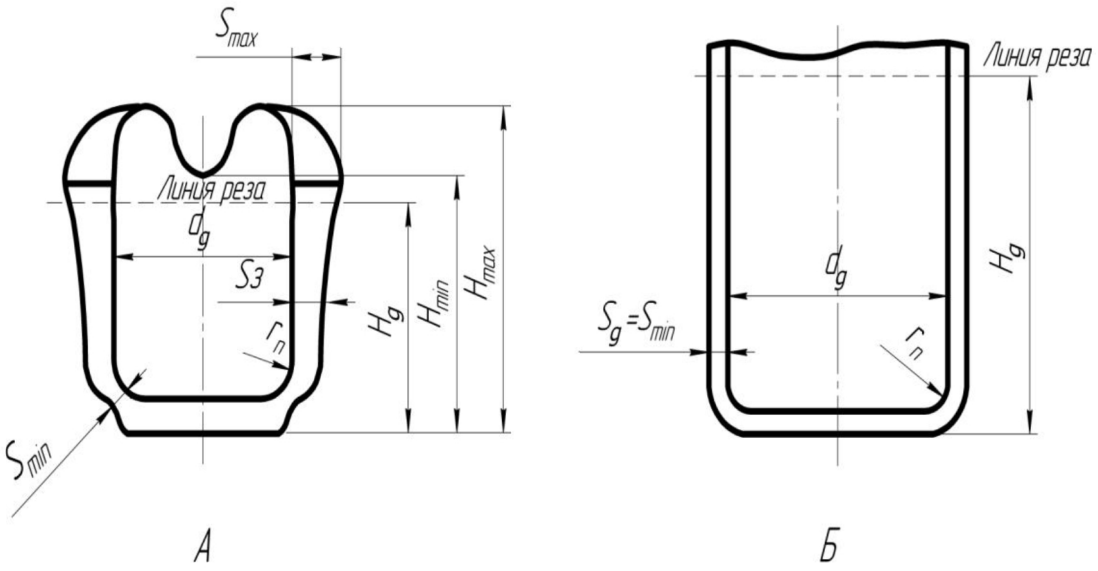
предположить, что при определенных условиях можно получить деталь с теми же размерами (d_q, r_n) с толщиной одинаковой по всей поверхности, причем значение толщины будет соответствовать минимально допустимому значению $S_q = S_{min}$, то при равенстве в обоих случаях (рис.1А, рис.1Б) диаметров и толщин исходных заготовок в случае (рис.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.

1.2 Установление заданной толщины заготовки

Заданная толщина детали может быть установлена исходя из технологических или эксплуатационных (конструкторских) требований. К технологическим требованиям относятся: увеличение степени деформирования, коэффициента использования металла, снижение фестонистости и т.п. Все эти условия можно связать с толщиной детали. Так получение ровного торца детали при вытяжке, т.е. устранение фестонистости связано с необходимостью получения осессимметричного 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 (рис.2) (табл. 1).

Таблица 1 - Значения координат точек, принадлежащих внутренней и наружной поверхностям изделия «Рубашка»

h_i, мм	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\rho_{вн.i}$, мм	321,6	319,5	317,5	315,4	300,2	280,4	268	257,7	243,3	226,8	210
$\rho_{нар.i}$, мм	334	330	327,8	325,7	317,5	305	301	288,6	274,2	255,6	241



А – в традиционных условиях вытяжки, Б – с направленным изменением толщины заготовки

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

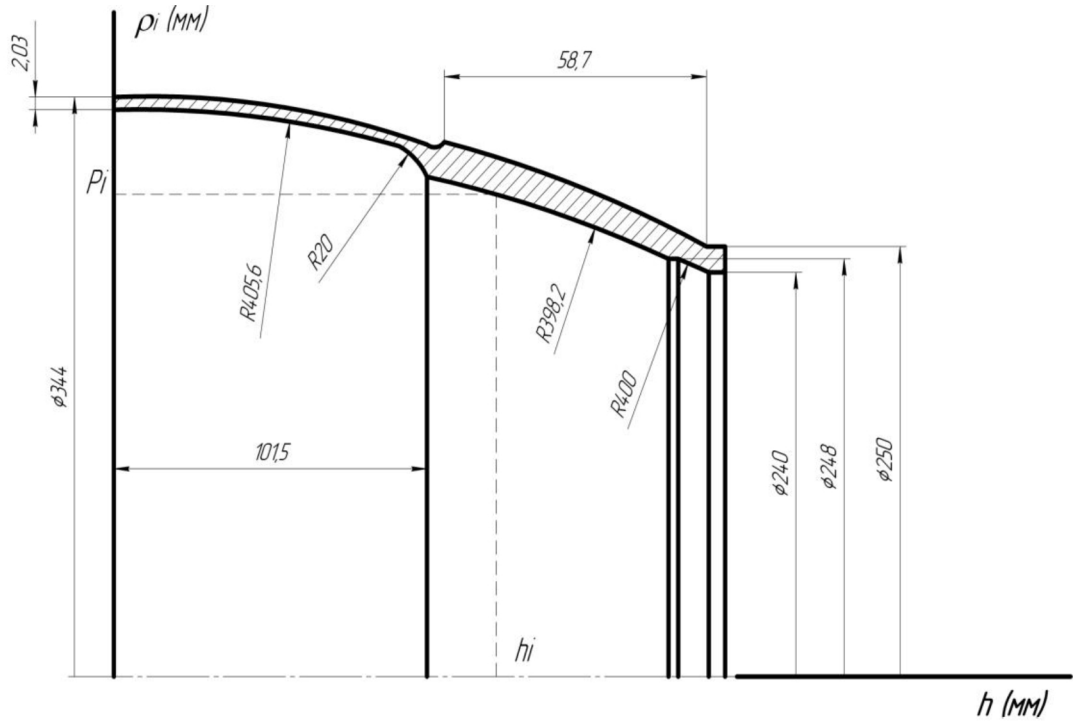


Рисунок 2 - Профиль сечения изделия «Стенка»

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:

1. Образующая срединной поверхности должна быть достаточно гладкой. Это объясняется тем, что резкое изменение кривизны ее затрудняет получение полуфабриката, размеры которого соответствовали бы штамповой оснастки;
2. Угол наклона образующей срединной поверхности штампованной детали должен предусматривать извлечение полуфабриката без искажения его размеров после штамповки.

Функции изменения толщины детали и срединной поверхности целесообразно определять следующим образом: изделие разбивается на участки как по характеру срединной поверхности, так и толщины. Основным принципом разбиения на участки является монотонность изменения толщины и срединной поверхности вдоль образующей заготовки. На границе стыковки участков необходимо выполнять условие равенства абсолютных значений толщин и координат срединной поверхности. Если в качестве уравнения аппроксимации выбирать алгебраический многочлен с двумя независимыми коэффициентами, то степень этого многочлена должна быть не выше второй.

$$y_{i,j} = y_{1,j} + a_{1j} l_{i,j} + a_{2j} l_{i,j}^2 , \qquad (2)$$

где $y_{1,J}$ – значение функции на границе двух участков j и j-1,

$x_{i,j}$ – независимая переменная, изменяющаяся в пределах рассматриваемого участка,

$y_{i,I}$ – переменная на рассматриваемом участке толщина или координата поверхности,

i – номер дискретного значения на рассматриваемом участке,

j – номер рассматриваемого участка.

Используя метод наименьших квадратов, найдем коэффициенты уравнения(2) при $j = const.$

$$a_{1,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Sq_{i,j} l_{i,j} - \sum_{i=1}^{n} y_{1,j} l_{i,j} - a_2 \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^2}{\sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^2}, \tag{3}$$

$$a_{2,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^2 \sum_{i=1}^{n} Sq_{i,j} l_{i,j}^2 - \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^2 \sum_{i=1}^{n} y_{i,j} l_{i,j}^2 - \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^3 \sum_{i=1}^{n} Sq_{i,j} l_{i,j} + \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^3 \sum_{i=1}^{n} y_{i,j} l_{i,j}}{\sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^2 \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^4 - \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^3 \sum_{i=1}^{n} l_{i,j}^2}. \tag{4}$$

Здесь n - число элементов на рассматриваемом участке.

Для небольших по протяженности участков можно использовать многочлен первой степени.

Пример 1. Определить функцию изменения срединной поверхности для детали “Рубашка” по данным таблицы 1. Промежуточные расчеты представить в таблице 2, в ней $j = 1,\ Sq_{i,1} = (b_{i,1} + \rho_{ni,1})2,\ l_{i,1} = h_{i,1},\ y_{i,1} = \rho_{i,1}.$

Таблица 2 - Координаты срединной поверхности детали ”Рубашка”

i	1	2	3	4	5	6
h_{i1} (мм)	0	40	80	120	160	200
ρ_{i1} (мм)	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5
Sq_{i1} (мм)	327,8	322,6	308,8	284,5	258,7	225
ρ_{i1} (мм)	327,5	322,8	309,6	288,1	258,3	220

Расчет коэффициентов целесообразно проводить с использованием программного продукта EXCEL. Получены значения коэффициентов и уравнения срединной поверхности (рис. 3).

$$\rho = 327{,}5 - 0{,}0135h - 0.00262h^2.$$

Функция изменения заданной толщины детали находится следующим образом. Сначала определяем первое приближение, заданной толщины на рассматриваемом участке, используя уравнение (2-4).

Затем находят наибольшее отклонение толщины первого приближения от толщины изделия относительно срединной поверхности. Если учесть припуск на механическую обработку, то получим заданную толщину детали наилучшим образом в пределах выбранной модели приближенной сверху к толщине изделия [3].

$$Sq = Sq_0 + 2\Delta S_{\max} + 2\Delta S_M, \qquad (5)$$

Sq_0 - заданная толщина первого приближения,

$\Delta S_{\max}$ - наибольшее отклонение толщины первого приближения от толщины изделия относительно срединной поверхности,

ΔS_M - припуск на механическую обработку.

Пример 2. Найти функцию заданной толщины изделия “Рубашка”;

$j = 1, \qquad Sq_{i,1} = Sq_{i,j}, \; l_{i,j} = h_{i,j}.$

На рисунке 3 представлена срединная поверхность. Относительно срединной поверхности находим толщину из условия, что верхнее и нижнее значения полутолщин должны быть одинаковы и определены по максимальной полутолщине при заданном значении аргумента.

Полутолщины замерялись перпендикулярно образующей срединной поверхности (табл. 3).

Для вычисления введен масштабный фактор по оси “h” (М 1:50) и уменьшено число промежуточных координат.

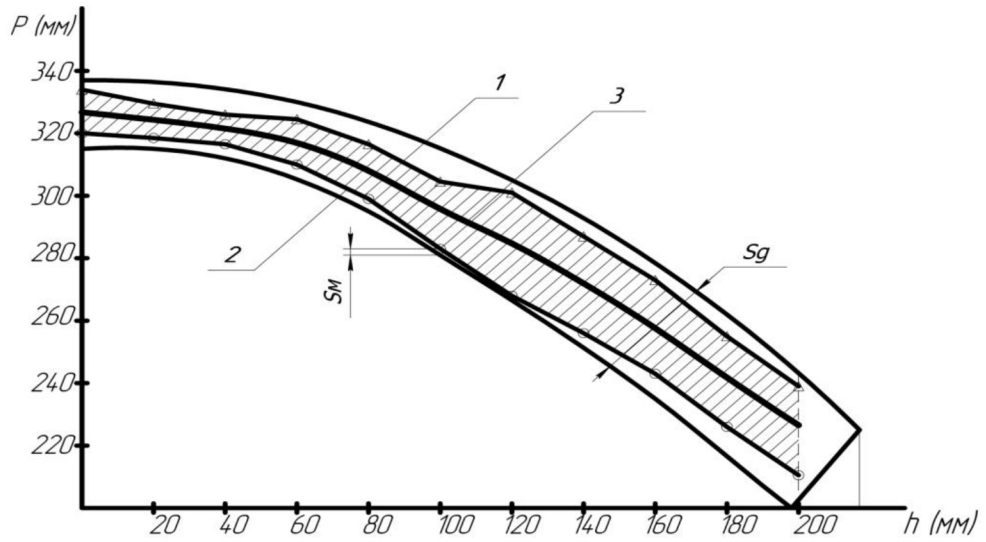
Таблица 3 - Значения заданной толщины первого порядка

i	1	2	3	4	5
$h_{i1}(мм)$	0	1	2	3	4
$Sq_{i1}(мм)$	13	13,5	26	24	30
$S_{011}(мм)$	13	13	13	13	13
$S_{0\,i1}(мм)$	13	17,2	21,4	25,6	29,8

По формулам (2-4) находим величины коэффициентов и записываем уравнение заданной толщины детали первого приближения с учетом масштабного фактора $\bar{h} = h/50$:

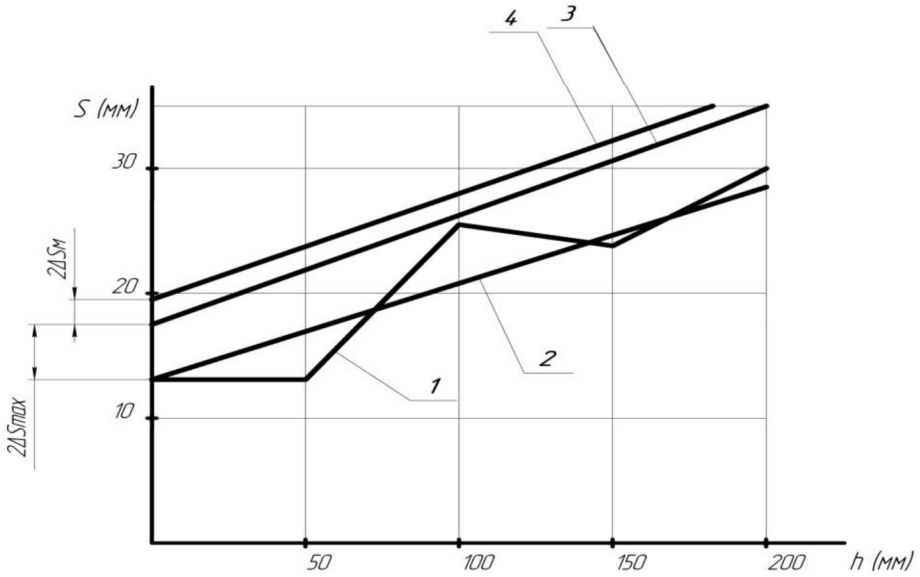
$$Sq_0 = 13 + 4{,}2\bar{h} + 0{,}0048\bar{h}^2.$$

На графике (рис. 4) видно, что полученные значения толщины изделия 1 на координате $h = 100мм$ имеет наибольшее отклонение от заданной толщины первого приближения. Это отклонение составляет около 10 мм. Так как заданная толщина первого приближения, относительно срединной поверхности симметрична, то отклонение на каждую сторону составляет половину, т.е. 5 мм. Если с обеих сторон добавить еще припуск на механическую обработку, то получим заданную толщину штампованной детали. Видно, что установленная толщина меняется по закону близкому к линейному с утолщением к торцу малого диаметра детали.



1-наружная поверхность, 2- внутренняя поверхность, 3- срединная поверхность, S_q- заданная толщина относительно срединной поверхности

Рисунок 3 - Установление срединной поверхности и заданной толщины детали для изделия “Рубашка”.



1 – толщина детали по срединной поверхности, 2 – первое приближение заданной толщины, 3 – заданная толщина с учетом максимального отклонения от толщины первого приближения по срединной поверхности, 4 – заданная толщина

Рисунок 4 - Установление заданной толщины детали.

При установлении заданной толщины детали относительно срединной поверхности необходимы геометрические построения в масштабе. Замер всегда связан с погрешностью, поэтому полученное последнее уравнение необходимо проверить на адекватность по известной методике с помощью критерия Фишера [4].

1.3 Методика определения толщины детали в формообразующих операциях

Определить толщину детали в формообразующих операциях возможно при решении так называемой системы уравнений, куда входят уравнения равновесия сил, уравнения связи напряжений и деформаций, зависимость интенсивности деформаций и интенсивности напряжений, уравнения Коши.

В полярной системе координат приближенные уравнения равновесия для оболочки примут вид:

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho}+\sigma_\rho(1+\frac{dS}{d\rho}\cdot\frac{\rho}{S})-\sigma_\theta-\frac{f\,\sigma_H}{\sin\alpha}\cdot\frac{\rho}{S}=0, \tag{6}$$

$$\frac{\sigma_H}{S}=\frac{\sigma_\rho}{R_\rho}+\frac{\sigma_\theta}{R_\theta}. \tag{7}$$

Для круглой оболочки в цилиндрической системе:

$$\frac{d\sigma_h}{dh}+\sigma_h\frac{dS}{dh\cdot S}-\frac{f\,\sigma_\theta}{R_\theta}=0. \tag{8}$$

Уравнение связи напряжений и приращений деформации, которые для трансверсально-изотропного металла имеют вид:

$$\sigma_\rho=-\frac{1}{1-\mu}\frac{\sigma_e}{de_e}(\Delta e_\theta+\frac{1}{1-\mu}\Delta e_S), \tag{9}$$

$$\sigma_\theta=\frac{1}{1-\mu}\frac{\sigma_e}{de_e}(\Delta e_\theta-\frac{\mu}{1-\mu}\Delta e_S). \tag{10}$$

Накопленная интенсивность приращений деформаций определяется:

$$e_e = \sum_{J=1}^{N1} \Delta e_{e,J}. \tag{11}$$

Необходимым условием полной системы уравнений является наличие:

- уравнения интенсивности приращения деформации

$$\Delta e_e = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} \sqrt{\Delta e_S^2 + \Delta e_\theta^2 + 2\mu \Delta e_\theta \Delta e_S}, \tag{12}$$

- уравнения аппроксимации интенсивности деформаций и интенсивности напряжений

$$\sigma_e = K e_e^n, \tag{13}$$

- условие постоянства объема

$$\Delta e_\rho + \Delta e_\theta + \Delta e_S = 0, \tag{14}$$

где

$$\Delta e_\rho = \ln| \frac{dl}{dl_H} |, \tag{15}$$

$$\Delta e_S = \ln| \frac{S}{S_H} |, \tag{16}$$

$$\Delta e_\theta = \ln| \frac{\rho}{r} |, \tag{17}$$

Для цилиндрической системы координат в приведенных уравнениях индекс с заменяется на h с учетом геометрической связи между ними.

Приведенные уравнения (их 11) образуют систему, которая содержит 13 неизвестных (y_c, $y_и$, $y_Н$, $Де_S$, $Де_и$, $Де_c$, y_e, $Де_e$, e_e, S, с, б, l) например, от независимой переменной r.

Чтобы система была статически определима, необходимы еще два уравнения. Их берут из геометрических соотношений. Например, для очага деформации по срединной поверхности листовой заготовки в виде сферы имеем

$$\rho = R\rho \cdot \sin\alpha,$$

$$dl = R\rho \cdot d\alpha.$$

В такой форме система определена, так как имеет 13 уравнений с 13 неизвестными от независимой переменной.

Систему можно привести к дифференциальному уравнению второго порядка нелинейного вида. Решение в квадратурах для него получить не удается, поэтому применяют численные методы.

Суть этих методов состоит в том, что во-первых система разбивается на уравнения статики и кинематики. Уравнения статики (6-13) отвечают за равновесия системы в целом в данный момент времени. Здесь независимой переменной является только координата с. Уравнения кинематики (14ч17) отвечают за изменение геометрии очага деформации в течение времени от 0 до t. Во-вторых, использовать так называемую деформационную теории, в которой бесконечно малые приращения (дифференциалы) заменяются на конечные деформации в приведённых уравнениях (9ч17).

В результате получаем статическую систему уравнений

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho\left(1 + \frac{dS}{d\rho}\cdot\frac{\rho}{S}\right) - \sigma_\theta - \frac{f_{mp}\sigma_н\rho}{\sin\alpha\cdot S} = 0, \qquad (18)$$

$$\frac{\sigma_н}{S} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}, \tag{19}$$

$$\sigma_e = \sigma_\rho^2 + \sigma_\theta^2 - 2\mu\left(\sigma_\rho \sigma_\theta\right), \tag{20}$$

$$\sigma_e = K \sum_{J=1}^{N1} \Delta e_J, \tag{21}$$

здесь в – коэффициент Лодэ.

и кинематическую систему уравнений

$$\Delta e_\rho + \Delta e_\theta + \Delta e_S = 0, \tag{22}$$

$$\Delta e_\rho = \ln\left|\frac{dl}{dl_0}\right|, \tag{23}$$

$$\Delta e_S = \ln\left|\frac{S}{S_0}\right|, \tag{24}$$

$$\Delta e_\theta = \ln\left|\frac{\rho}{r}\right|. \tag{25}$$

Соединяющим звеном этих двух систем уравнений являются уравнения связи (9, 10).

Полученные группы уравнений являются условиями, которые позволяют определить толщину детали, используя методику, предложенную Е.А.Поповым [1]. По этой методике решается статическая система уравнений без учёта упрочнения и изменения толщины и считается, что найденные соотношения напряжений $y_c/y_и$ не зависят от изменения толщины и упрочнения ($y_e = y_{0,2}$=const). Другими словами изменение толщины и упрочнения приводит к пропорциональному изменению напряжений $y_c \cdot m$ / $y_и \cdot m$ (где m - коэффициент пропорциональнос-ти), а соотношение напряжений не меняется. Система уравне-ний (18-21) примет вид:

$$\rho\frac{d\rho_\rho}{d\rho}+\sigma_\rho+\sigma_\theta-\frac{f\sigma_н}{\sin\alpha}\cdot\frac{\rho}{S}=0, \tag{26}$$

$$\frac{\sigma_н}{S}=\frac{\sigma_\rho}{R_\rho}+\frac{\sigma_\theta}{R_\theta}, \tag{27}$$

$$\sigma_e=\sigma_\rho^2+\sigma_\theta^2-2\mu\left(\sigma_\rho\sigma_\theta\right). \tag{28}$$

Система имеет три уравнения с тремя неизвестными y_c, $y_и$, y_e. Определяются напряжения и соотношение напряжений. Поделив их почленно, получим:

$$e_S=(-\mu)\frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}+1}{\mu\frac{\sigma_e}{\sigma_\theta}-1}e_\theta. \tag{29}$$

С учётом выражений (24,25) имеем:

$$S_{\partial.1}=S_0\left(\frac{\rho}{r}\right)^{(1-\mu)\cdot\frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}+1}{\mu\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}-1}}. \tag{30}$$

Чтобы воспользоваться последним уравнением, необходимо знать связь между с и r, воспользовавшись связью геометрических параметров заготовки в очаге деформации и в исходном состоянии.

Найденные значения толщины детали аппроксимируются и заново решается система уравнений (18ч21). Аппроксимация следует представлять наиболее простой и достаточно точной зависимостью. Опыт расчёта показывает, что изменение толщины происходит в рамках, так называемого малого параметра. Как правило, достаточно решение первого приближения, полученного по формуле (30).

Этот расчёт выполнен для нестационарного очага деформации. Нестационарный очаг деформации сопровождается изменением размеров, а так как значения напряжений в данном элементе определяются по существу расстоянием от свободного контура заготовки, то в первом приближении

можно принять, что в процессе деформирования напряжения, действующие на рассматриваемый элемент, не изменяются (изменение координаты свободного контура в процессе деформирования происходит одновременно с изменением координаты рассматриваемого элемента и однозначно ему).

При таких допущениях среднее значение показателя степени в выражении (30) может быть найдено по величинам соотношений напряжений, действующих на рассматриваемый элемент в начальной или конечной стадии деформирования. Значения соотношения напряжений целесообразно определять при максимальной величине очага деформации; если в процессе деформирования размеры очага деформации убывают (вытяжка плоской заготовки, отбортовка), то напряжения следует определять в начальной стадии деформирования, если увеличиваются – в конечной стадии деформирования.

При анализе операций со стационарным очагом деформации может быть принята аналогичная последо-вательность решения с той лишь целью, что при отыскании значений толщины в очаге деформации должны быть использованы другие допущения. Действительно, переме-щение элемента заготовки в стационарном очаге деформации сопровождается значительным изменением соотношения между напряжениями, действующими на рассматриваемый элемент, поскольку эти напряжения являются функцией координат, а координаты элемента изменяются при его перемещении в очаге деформации. В этом случае при отыскании среднего значения соотношения между напряжениями, входящего в формулу (31), можно принять, что среднее значение является средним арифметическим соотношением между напряжениями, действующими на рассматриваемый элемент в его начальном и конечном положениях. При этом, как и раньше, соотношение между напряжениями может определяться в качестве первого приближения на основе соотношений напряжений, найденных без учёта изменения толщины заготовки в процессе деформирования и упрочнения.

Надо иметь в виду то обстоятельство, что изменение толщины заготовки рассматривается относительно независимой переменной. Это не исключает возможность рассматривать утолщение или утонения заготовки так, чтобы не изменился характер её изменения. Например, плоская заготовка и деталь с постоянной толщиной больше или меньше заготовки. В этом случае в уравнении (18) dS=0.

1.4 Использование способов листовой штамповки

Минимизация функционала (1), как и любая вариационная задача связана в первую очередь с выбором процесса формообразования, характеризуемым схемой напряжённо-де-формированного состояния. В листовой штамповке про-цессами осесимметричного деформирования являются: вы-тяжка, 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.

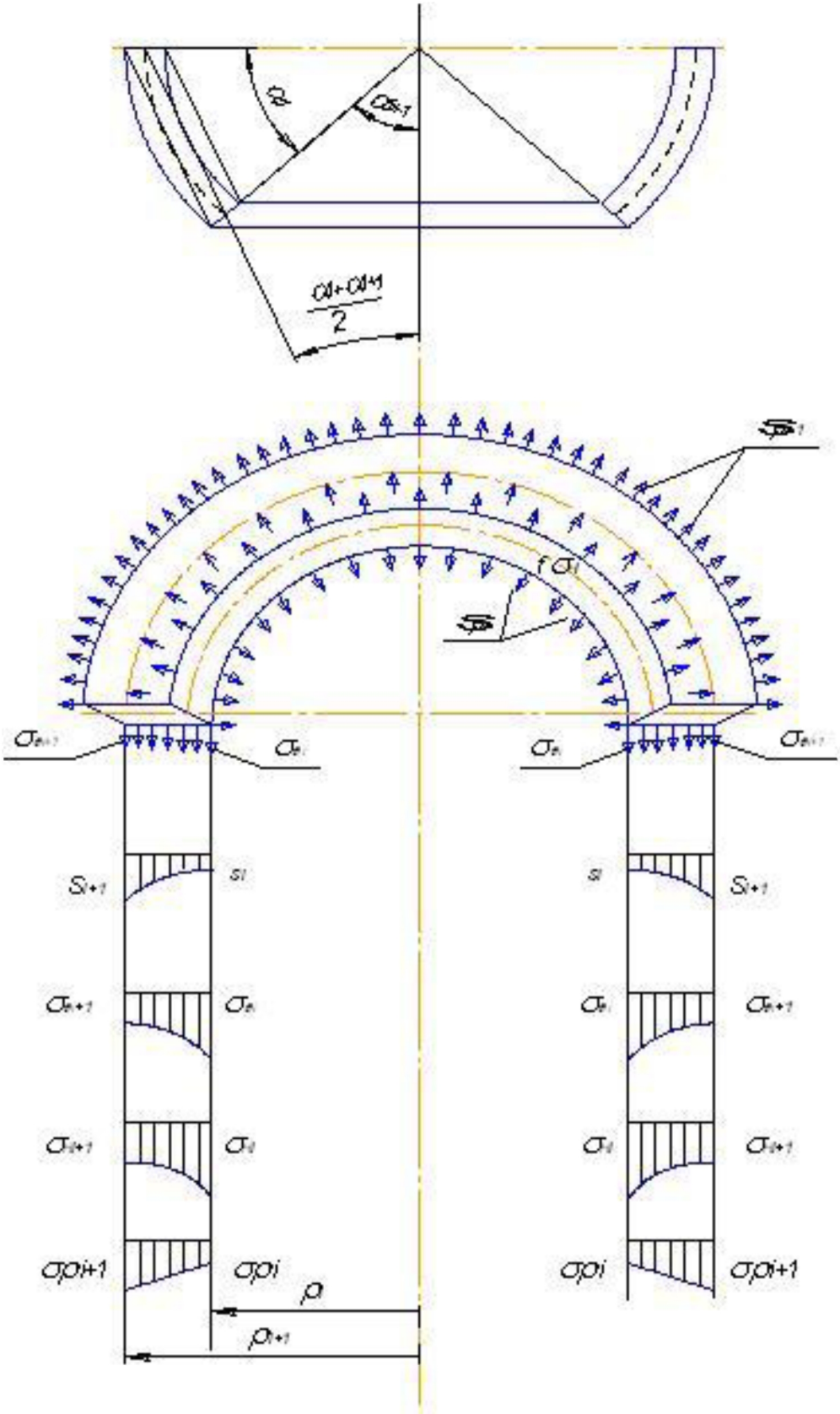


Рисунок 5 – Схема действия сил.

Рассмотрим некоторые способы вытяжки (рис. 8–11).

Широко известный способ вытяжки с плоским прижимом и матрицей (рис. 8) позволяет получать разные величины утонения и протяженность утоненного участка заготовки с помощью постоянных в процессе технологических параметров:

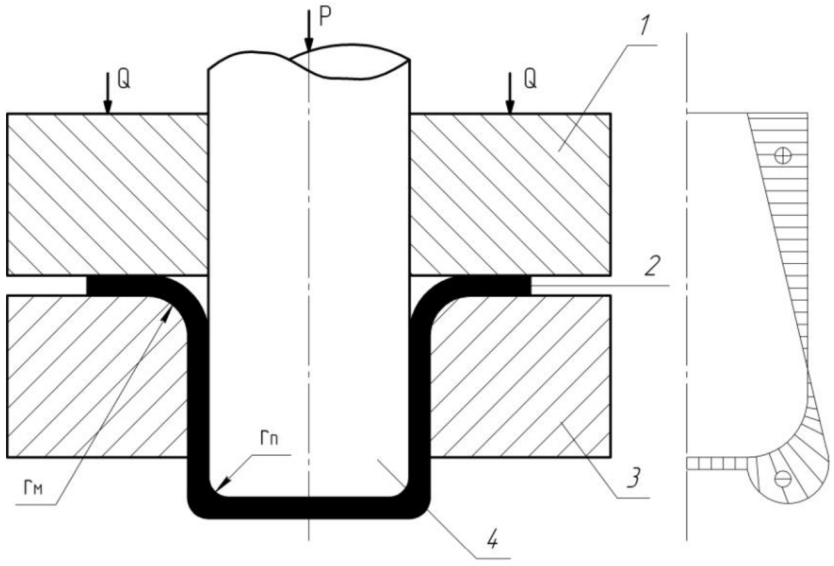
- усилия прижима,
- радиусов закругления матрицы и пуансона,
- коэффициента трения,
- показателя анизотропии материала,
- коэффициента вытяжки.

На рисунке 8 представлена схема для способа вытяжки в штампе с усечённым конусным прижимом [6]. 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 ($S/D_з \leq 0{,}01$) применение способа вытяжки в штампе с упругим прижимом (рис. 10) [7] 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 контачит с фланцем заготовки по всей поверхности. Это даёт возможность избежать потерь устойчивости фланца при меньших усилиях прижима и снизить величину утонения. На рис. 10 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 при-

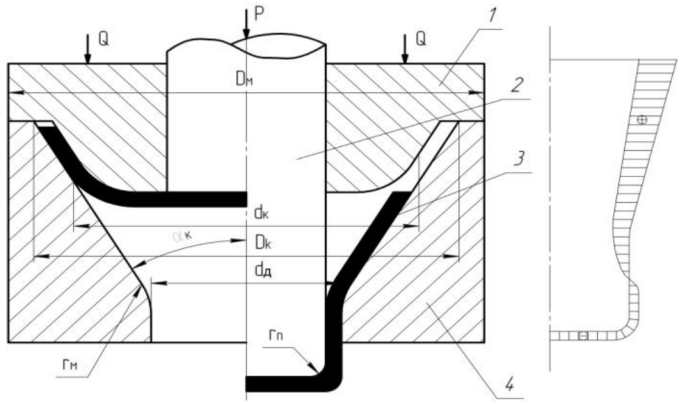
ходятся на заключительные стадии в момент, когда в очаг деформации входит кромка заготовки. Поэтому разгрузка опасного сечения в этот момент очень своевременна и позволяет либо снизить величину утонения, либо увеличить степень формообразования. Кроме того, упругое кольцо обладает свойством проглаживания. 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 (рис. 12).



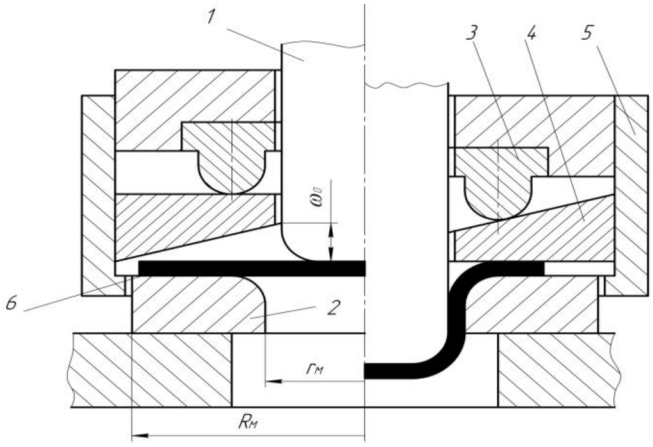
1 – прижим, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – пуансон,
r_m - радиус закругления матрицы, r_n - радиус закругления пуансона

Рисунок 6 - Схема штампа с плоским прижимом и эпюра деформации детали по толщине



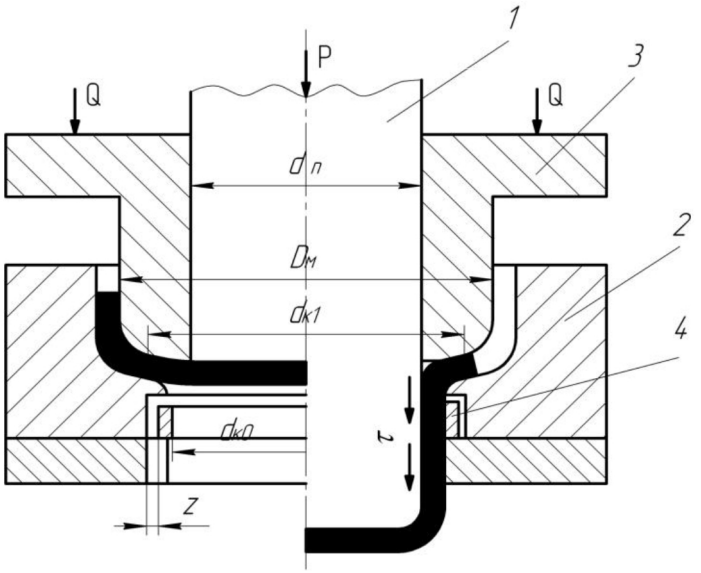
1 – конусный прижим, 2 – пуансон, 3 – заготовка, 4 – матрица, $\alpha_к$ - угол конусности матрицы, $D_к$ – наибольший диаметр конусной части прижима, $d_к$ – наименьший диаметр конусной части прижима, $D_н$ – диаметр заготовки, $d_д$ – диаметр детали

Рисунок 7 - 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,$r_м$ - радиус закругления матрицы, $R_н$ - радиус закругления пуансона, W_o – упругий прогиб прижима

Рисунок 8 - Схема штампа с упругим прижимом



1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – прижим, 4 – упругое кольцо,$D_н$ – диаметр заготовки, $d_{к1}$ – наименьший диаметр конусной части прижима, $d_п$ – диаметр пуансона, $d_д$ – диаметр детали, z – зазор между кольцом и матрицей

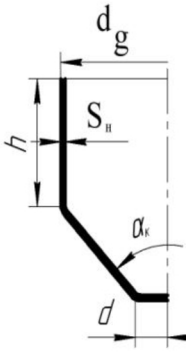
Рисунок 9 - Схема штампа последующей вытяжки с активными силами трения

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 (рис. 12)[8], либо в виде стакана с конусной юбочной частью (рис.13)[9]. 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 (табл.5) [10]. 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 - Предельные значения относительного уменьшения диаметра d/dд при обжиме цилиндрического стакана, с наружным подпором стенки ($\alpha_К$=60, $S_н/d_q$= 0,02 - 0,012)

Матер.		AD1M	M1	Л63	08КП	12Х18 Н9Т	12Х21 Н5Т
$\frac{h}{d_g}$	0,75 0,5	0,45	0,45	0,35	0,65	0,6	0,7
	0,15	0,4	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 (рис. 12).

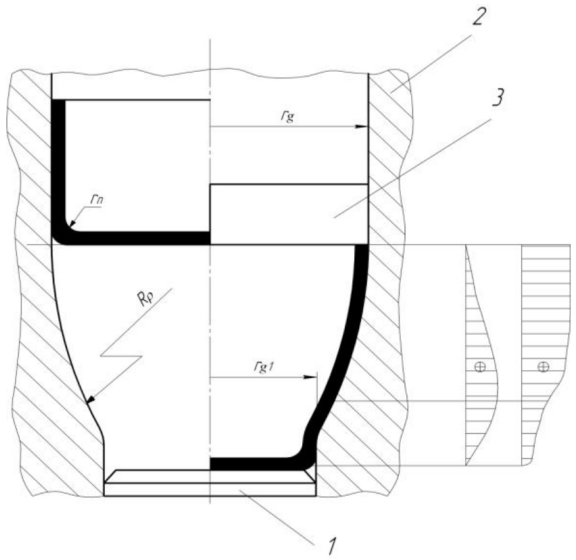
Для небольших степеней деформаций при малом уменьшении диаметра эпюра деформаций имеет характер распределения близкий к кривой Гаусса (нормальному закону распределения). При этом донная и торцевая части заготовки толщину не меняют. Экстремум функции приходится на область, в которой происходит стыковка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

В случае значительного уменьшения диаметра при обжиме возможно утолщение цилиндрической части заголовки. Исследования, проведенные в работе [11] 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 (рис. 13).

В последние годы на основе схем штамповки (рис. 12, рис. 13) разработан ряд способов формоизменения, которые обладают широкими

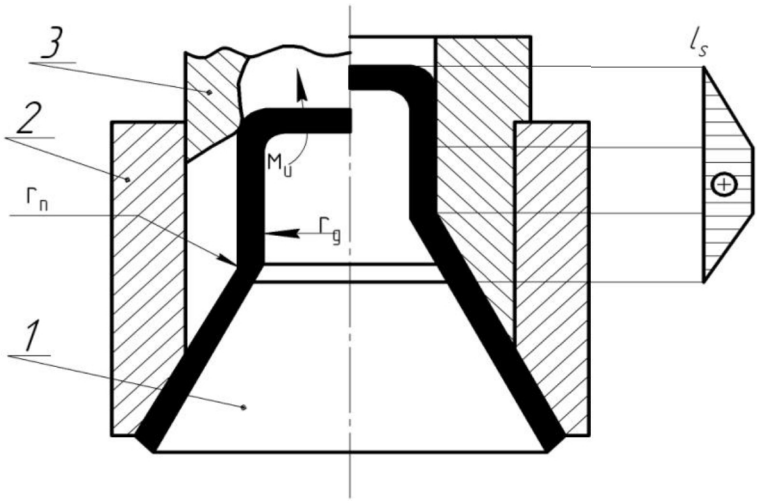
возможностями получения деталей не только по форме заготовки, но и по величине и характеру изменения толщины. Способы характеризуются тем, что независимо от вариантов совмещения процессов все они основаны на процессе обжима заготовки с дном (рис. 14, 15).

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.



1 – выталкиватель, 2 – матрица, 3 – пуансон

Рисунок 10 - Схема обжима цилиндрического стакана и эпюры распределения деформации детали по толщине



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

Рисунок 11 - Схема обжима цилиндрического стакана с конусной юбочной частью и эпюра распределения деформации детали по толщине

Представленные схемы штамповки (рис. 14, 15, 16) обладают широкими возможностями получения деталей с различным характером изменения толщины заготовки. Если при обжиме 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, прикла-дываемые к цилиндрической части (рис. 15а, 16ж). Ко второй группе относятся заготовки, у которых зона пластической деформации охватывает весь объем заготовки, включая и юбочную часть (рис. 16).

Спектр изменения толщины стенки значительно расши-ряется на основании принципа суперпозиции деформаций по толщине для технологических процессов, которые включают кроме рассмотренных схем

штамповки, предварительные или последовательные операции: вытяжки, протяжки, совмещен-ной вытяжки, отбортовки, обжима и осадки.

Выбор модели наиболее удобно проводить по классификационному признаку.

В основу классификации положен характер изменения функции описывающий толщину детали. Классификация сос-тавлена на основе уравнения второго порядка (рис. 17). Она охватывает варианты изменения толщин деталей, полученных в традиционных операциях штамповки, с учетом основных (базисных) признаков:

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

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

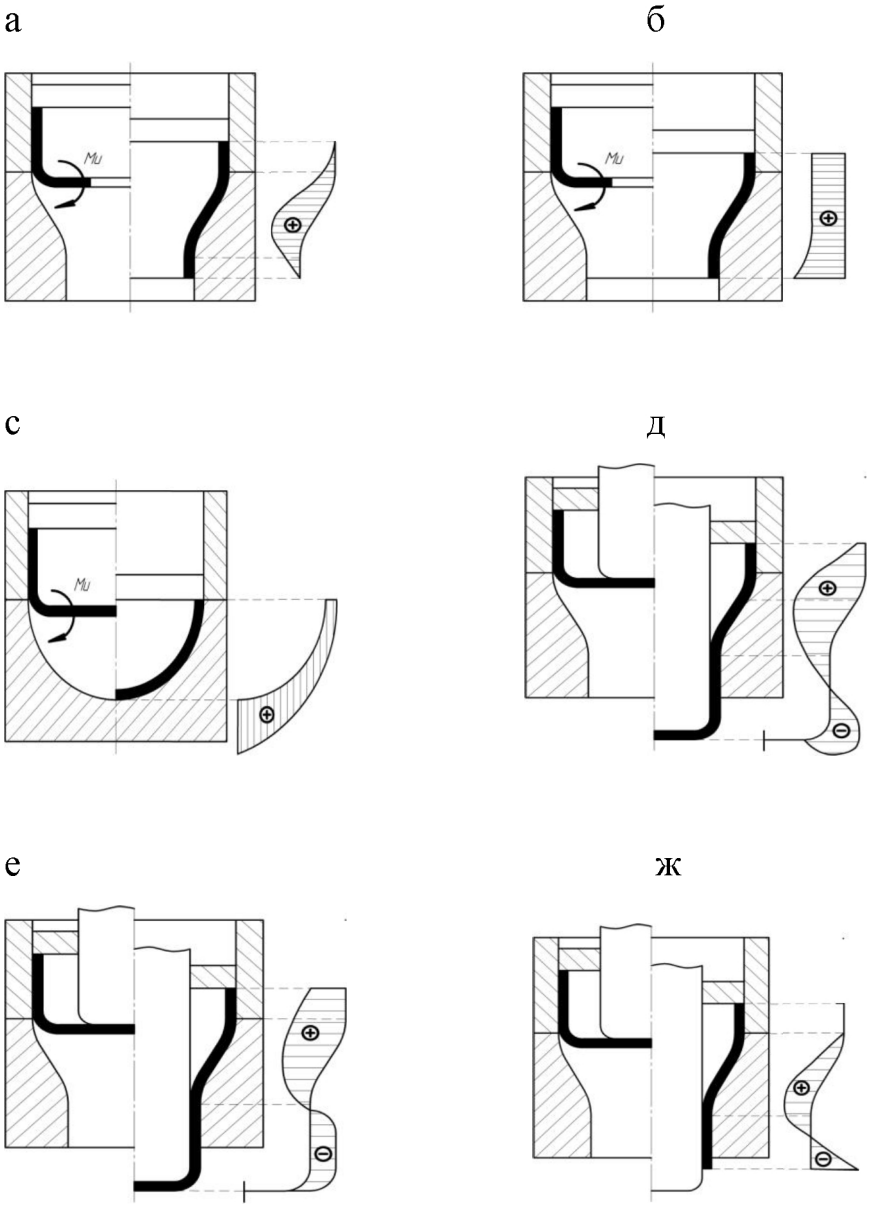
d, e, з - детали с толщиной стенки вогнутого характера.

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 (рис. 17а,ж,з) согласуются с характером изменения толщины деталей, полученных в результате вытяжки.

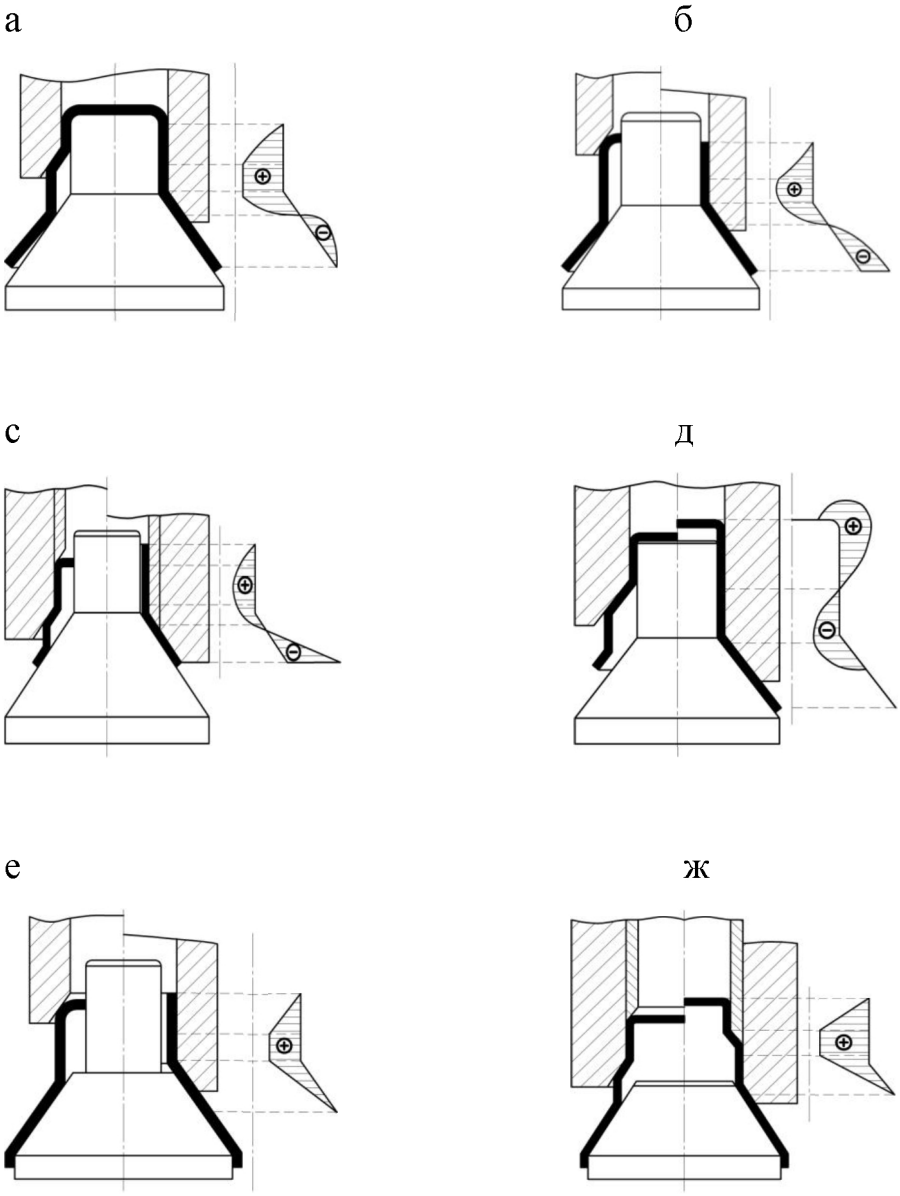
Если эпюры с индексом ж, з можно отнести к вытяжке деталей с обычными параметрами, то эпюры с постоянной толщиной требуют применение дополнительных технологических решений, например, вытяжку с активными силами трения (рис. 11).

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.



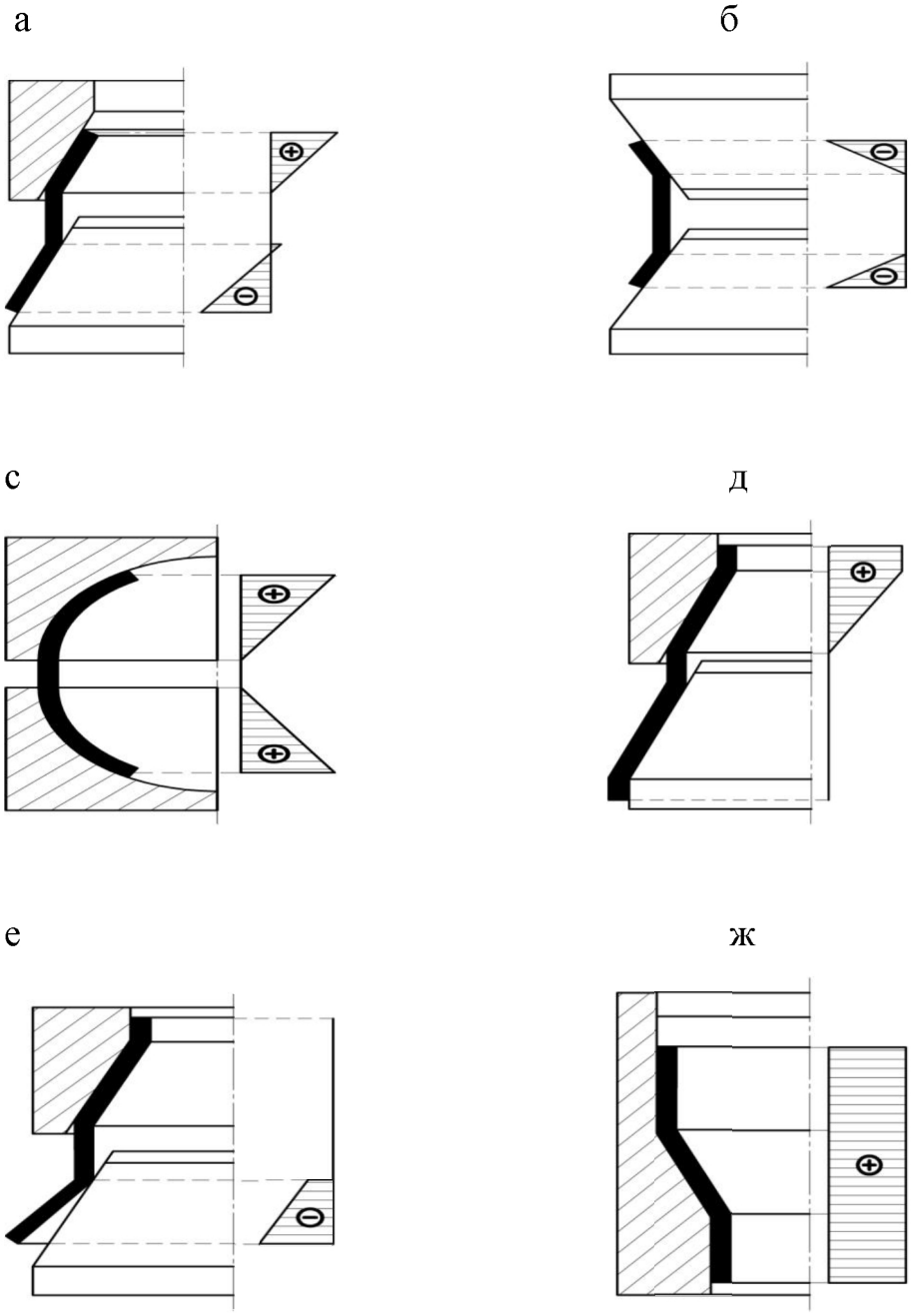
а – обжим-отбортовка, б – обжим-отбортовка-осадка, с- обжим-осадка, д – обжим-формовка, е – обжим-вытяжка, ж –обжим-вытяжка-отбортовка

Рисунок 12 - Основные, совмещенные с обжимом схемы штамповки из полой 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 13 - Основные схемы штамповки, совмещенные с операцией обжима из полой цилиндрической заготовки с дном с расширяющейся юбочной частью и эпюры деформации детали по толщине



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

Рисунок 14 - Совмещенные схемы обжима и раздачи трубной заготовки и эпюры деформации детали по толщине

Эпюры (рис 17 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 (рис. 17 б,е). При параллельном совмещении операций обжима и осадки, обжима-отбортовки-осадки можно получить эпюры, которые представлены позициями (рис. 17 c,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 (рис. 18, 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.

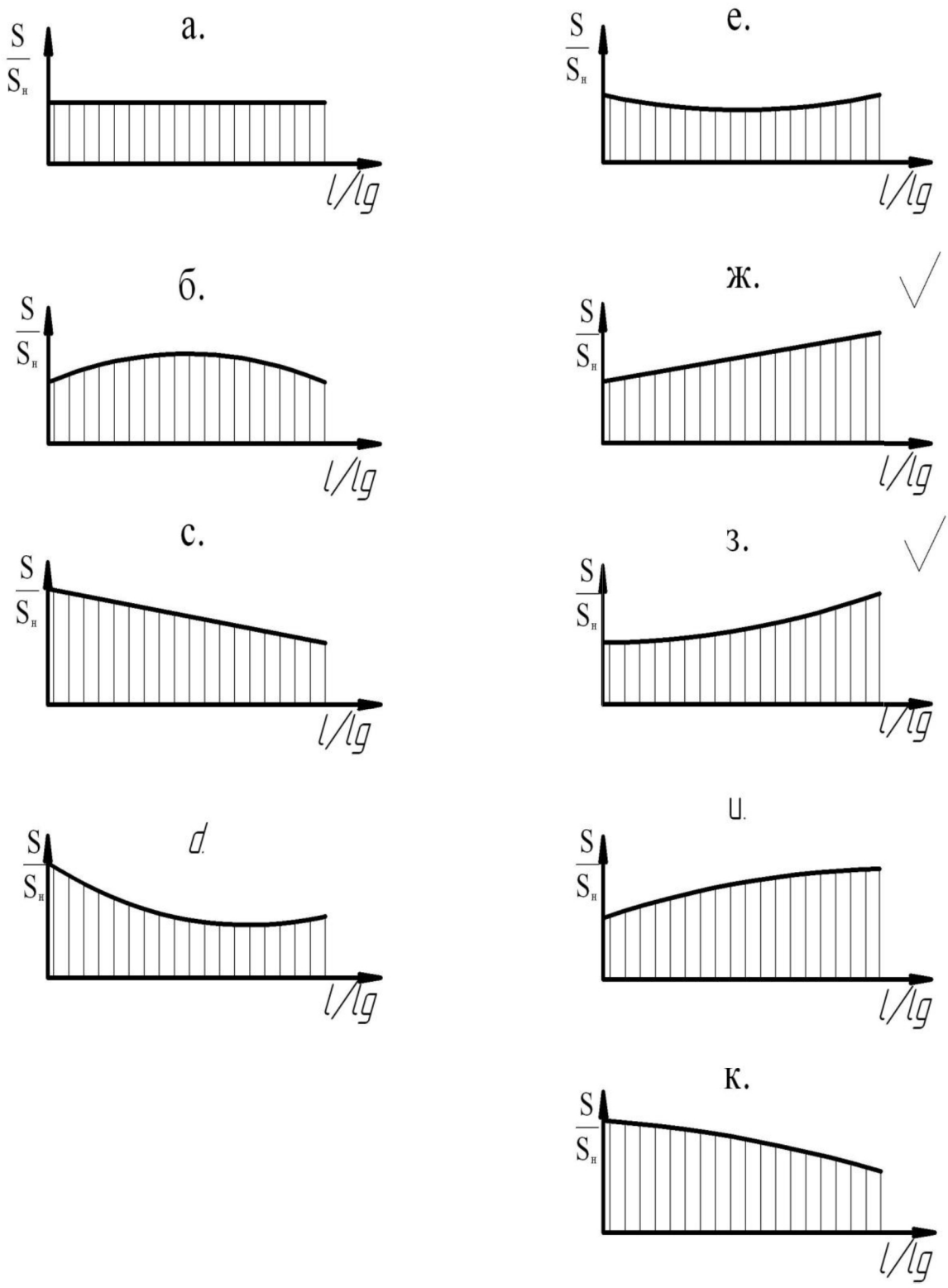


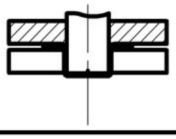
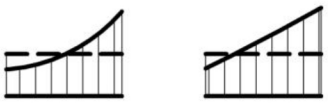
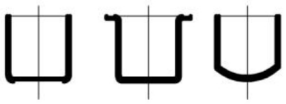
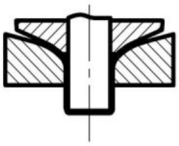
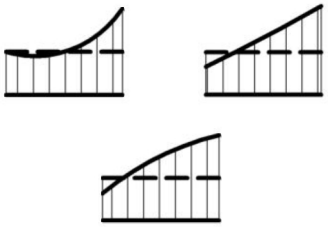
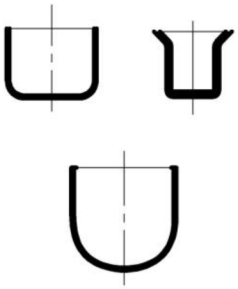
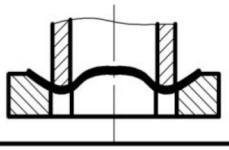
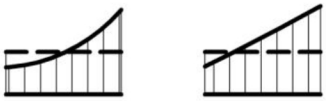
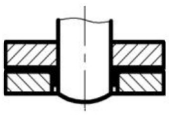
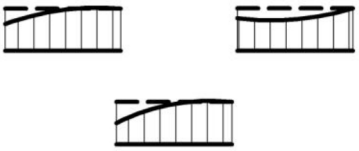
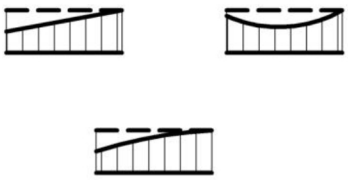
Рисунок 15 - Классификация деталей по характеру изменения толщины стенки

Для выбора операций операций листовой штамповки удобно пользоваться таблицей 6. 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.

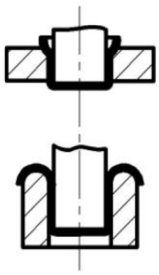
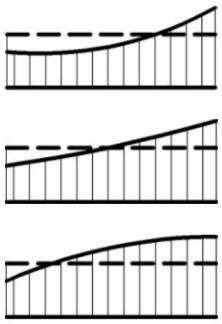
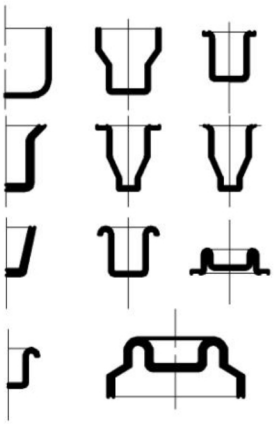
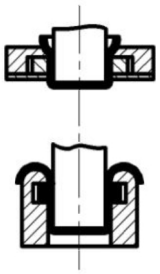
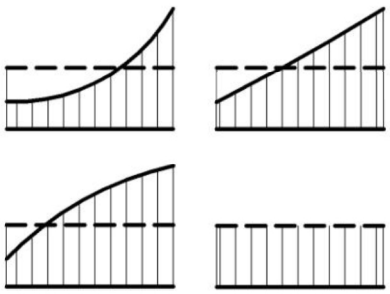
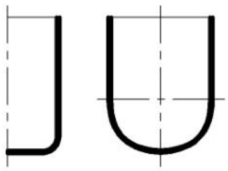
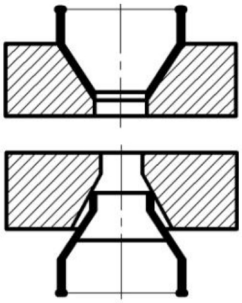
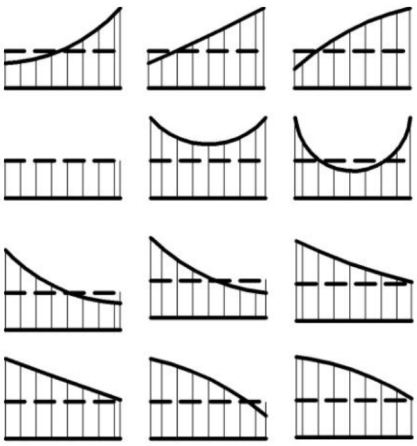
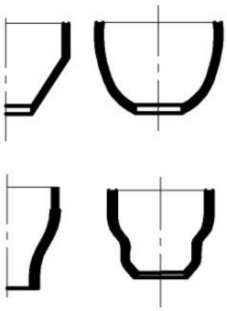
1.5 Использование технологических параметров процессов

Минимизацию выражения (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:

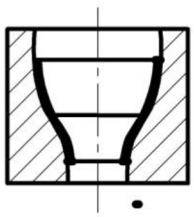
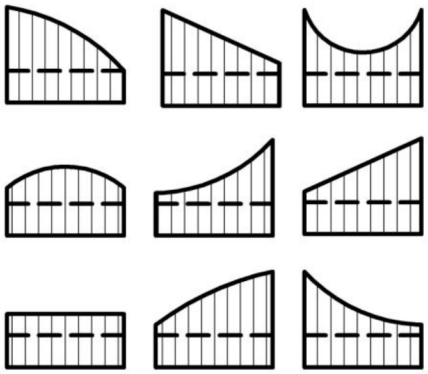
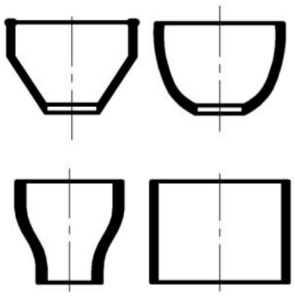
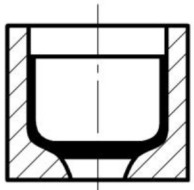
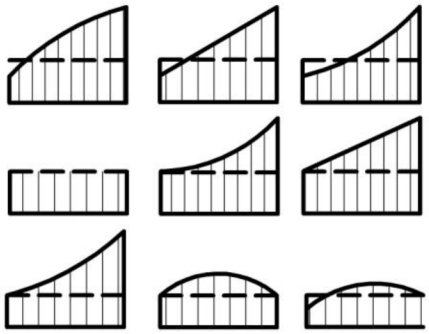
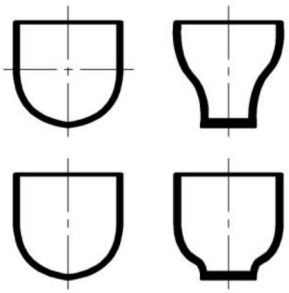
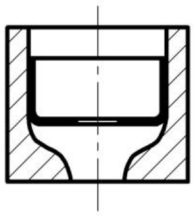
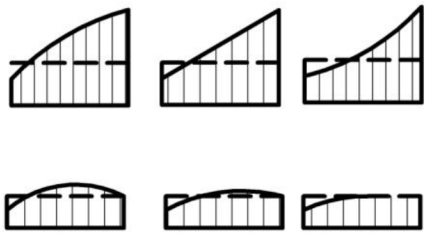
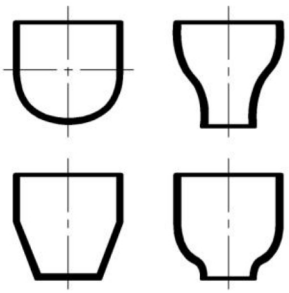
Таблица - Соответствие основных способов штамповки с эпюрами толщин и формой деталей

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 		

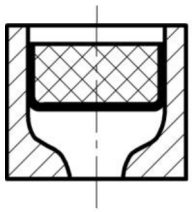
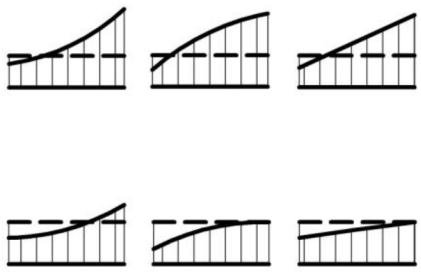
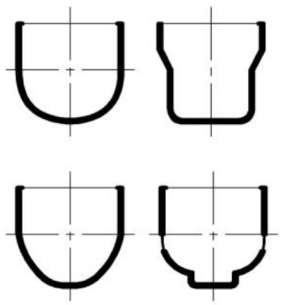
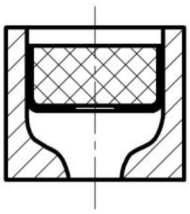
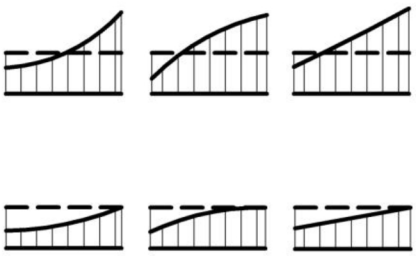
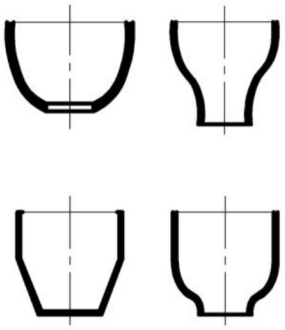
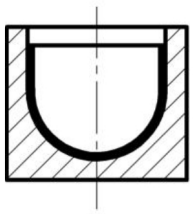
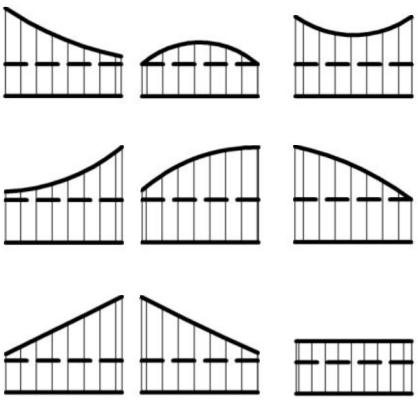
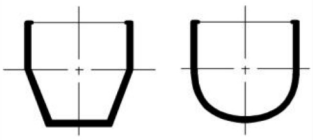
Продолжение табл. 6

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 		

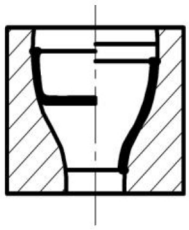
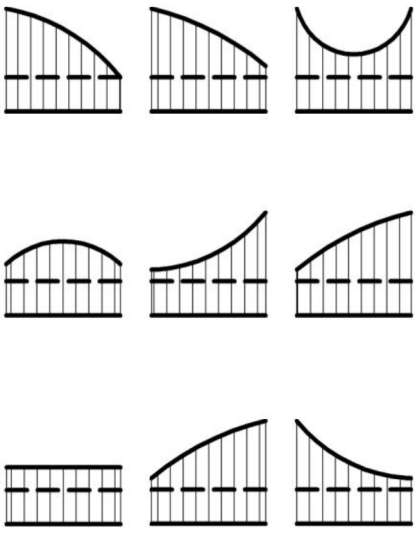
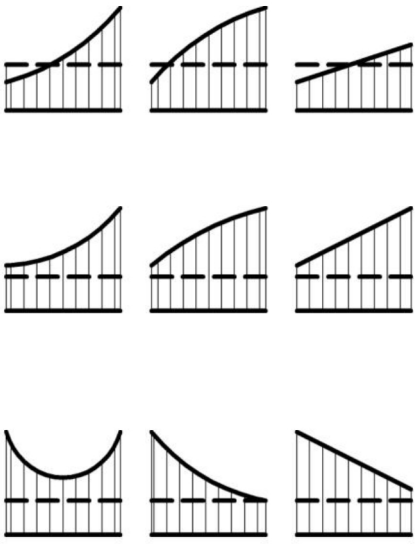
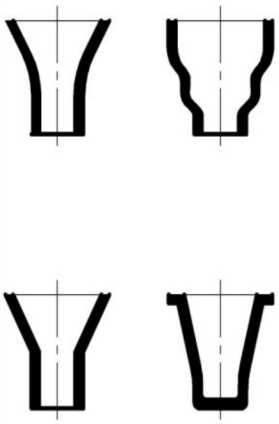
Продолжение табл. 6

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 		

Продолжение табл. 6

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. 		

Продолжение табл. 6

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 юбочной частью и совмещенные с обжимом операции (рис.15)		

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

где P_J -варьируемый параметр,

K -число варьируемых параметров,

l -длина образующей детали.

1.5.1 Использование параметра исходной толщины заготовки

Технологически возможную толщину полученной после одной операции можно представить в виде двух сомножителей

$$S_T = S_H \exp(\Delta e_s), \qquad (91)$$

Если считать, что $P_1 = S_H = const,$ система уравнений (90) представится в виде:

$$\int_0^l [S_q - S_H \exp(\Delta e_s)] \exp(\Delta e_s) dl = 0. \qquad (92)$$

Из последнего соотношения выразим варьируемый параметр

$$S_H = \frac{\int_0^l S_g \exp(\Delta e_s) dl}{\int_0^l \exp(2\Delta e_s) dl}. \qquad (93)$$

Заменим определенные интегралы на конечные суммы по участкам и находящихся в них элементам i при $\Delta l_{i,j} = const$:

$$S_H = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n} S_{qi,j}\exp(\Delta e_{si,j})}{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\exp(\Delta e_{si,j})}. \qquad (94)$$

Промежуточную технологически возможную толщину для многооперационной технологии можно искать не в виде постоянной величины, а в виде функции, например, многочлена

$$S_H = \sum_{t=1}^{C} g_t l^{t-1}, \quad t = 1,2,3...C$$

где C - число многочленов,

g_t - коэффициенты многочлена.

Систему уравнений (90) запишем в виде конечных сумм по элементам при $\Delta l_{i,j} = const.$

$$\sum_{i=1}^{N}\left[S_{qi,j} - \sum_{t=1}^{c} g_{t,j} l_{i,j}^{t-1}\right]\exp(e_{si,j})\, l_{i,j}^{k-1} = 0. \quad \text{к=1,2…c} \qquad (96)$$

Здесь $S_{qi,j}$ представляет собой заданную толщину для j-го участка, в качестве которой выступают элементы с технологически возможной толщиной, рассчитанной на последующей операции.

Таким образом, если технологический процесс представлен несколькими операциями, то полученная толщина с использованием системы (96) будет являться заданной толщиной для предшествующей операции. Например, если технологический процесс представлен операциями вытяжки

из плоской заготовки и последующего обжима, то найденная технологически возможная толщина при обжиме относительно заданной толщины детали (изделия) может быть принята за заданную толщину относительно технологически возможной толщины, при вытяжке.

Ранее было принято, что функцию толщины желательно представить многочленом не выше второй степени (c=3). Тогда система (96) при условии стыковки на границах участков или выполнения граничных условий по толщине будет состоять из двух уравнений при данном значении j. Варьируемыми параметрами являются $g_{2,j}$ и $g_{3,j}$ (см. гл. 2). При $\Delta l_{i,j} = const$ имеем

$$g_{3,j} = \frac{\Phi_{2,j} - \Phi_{1,j}}{\Phi_{3,j}}, \quad g_{2,j} = \Phi_{4,j} - g_{3,j}\Phi_{5,j}, \tag{97}$$

где

$$\Phi_{1,j} = \Phi_{4,j} \sum_{i=1}^{N} l_{i,j}^3 \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right),$$

$$\Phi_{2,j} = \sum_{i=1}^{N} S_{qi,j} l_{i,j}^2 \exp\left(e_{Si,j}\right) - g_{1,g} \sum_{i=1}^{N} l_{i,j}^2 \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right),$$

$$\Phi_{3,j} = \Phi_{5,j} + \sum_{i=1}^{N} l_{i,j}^4 \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right),$$

$$\Phi_{4,j} = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_{qi,j} \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right) - g_{1,g} \sum_{i=1}^{N} l_{i,j} \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right)}{\sum_{i=1}^{N} l_{i,j}^2 \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right)},$$

$$\Phi_{5,j} = \frac{\sum_{i=1}^{N} l_{i,j}^3 \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right)}{\sum_{i=1}^{N} l_{i,j}^2 \exp\left(\Delta e_{Si,j}\right)}.$$

Если участки невелики можно принять функцию промежуточной толщины многооперационной технологии в виде многочлена первой степени. В этом случае выражение (97) упрощается и $\Phi_{1,j} = \Phi_{2,J} = \Phi_{3,j} = \Phi_{5,j} = 0$.

На первой операции, когда исходная толщина является постоянной величиной, расчет ее значения ведут по формуле (94), в которой суммирование производят по всем участкам и элементам.

1.5.2 Использование двух параметров технологического процесса

Кроме исходной толщины второй параметр варьирования может быть взят из граничных условий, геометрии штамповой оснастки, механических свойств материала. Несмотря на многочисленность, их влияние на толщину согласно принятому допущению, происходит в рамках, так называемого, малого параметра [11]. Это позволяет линеаризовать выражение (91), разложив его в ряд Тейлора относительно выбранного для варьирования второго параметра.

Рассмотрим обобщенный случай варьирования двух параметров, одним из которых является толщина исходной заготовки. Выражение (91), по которому определяется толщина детали, разложим в ряд Тейлора.

$$S_T = S_H \exp(e_S)\left[1 + \frac{\partial}{\partial P_J}(e_S)(P_J - P_{J,0})\right], \quad J = 2,3...m \tag{98}$$

при $P_J = P_{J0}$,

где P_{J0} - известное приближенное значение, относительно которого раскладывается толщина.

Примем обозначения: $\Delta P_J = P_J - P_{J,0}$; $A = \exp(e_S)$,

при $P_J = P_{J,0}$, $B = \frac{\partial}{\partial P_J}(e_S)$, при $P = P_{J,0}$.

Условие минимума функционала в форме конечных сумм по всем участкам для рассматриваемого процесса при $\Delta l_{i,j} = const.$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left[\varsigma_{qi,j} - S_H A_{i,j}\left(+ B_{i,j}\Delta P_J\right)A_{i,j}\left(+ B_{i,j}\Delta P_J\right)\right] = 0,$$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left[\varsigma_{qi,j} - S_H A_{i,j}\left(+ B_{i,j}\Delta P_J\right)A_{i,j}B_{i,j}S_H = 0\right] . \qquad (99)$$

Отсюда находим

$$S_H = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(\varsigma_q AB\right)_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}A_{i,j}\left(+ B_{i,j}\Delta P_J\right)}, \qquad (100)$$

$$P_J = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(AB\right)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(\varsigma_q A\right)_{i,j} - \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(\varsigma_q AB\right)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}A_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(A^2B\right)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(\varsigma_q AB\right)_{i,j} - \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(AB\right)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(\varsigma_q A\right)_{i,j}} + P_{J,0}. \qquad (101)$$

Если участки невелики, то промежуточную технологически возможную толщину при многооперационной технологии можно искать в виде линейной функции:

$$S_{H,j} = g_{1,j} + g_{2,j} l_{i,j}$$

Первое слагаемое находим из граничных условий, коэффициент второго слагаемого является варьируемым параметром. Система уравнений (90) легко решается, если принять приближенно, что

$$\sum_{i=1}^{n}\left(g_{1,j} + g_{2,j} l_{i,j}\right) \cong n\left(g_{1,j} + g_{2,j}\bar{l}_j\right),$$

где $$\bar{l}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_{i,j}}{n},$$

В этом случае варьируемые параметры при $j = const$

$$g_{2,j} = \frac{\left[\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(\varsigma_q AB)_{i,j} - \sum_{j=1}^{N} q_{1,j}\right] n}{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n} A_{i,j}(+B_{i,j}\Delta P_j \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n} l_{0,j}}, \qquad (102)$$

$$P_J = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(AB)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(\varsigma_q A)_{i,j} - \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(\varsigma_q AB)_{i,j}\sum_{i=1}^{n} A_{i,j}^2}{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(A^2 B)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(\varsigma_q AB)_{i,j} - \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(AB)_{i,j}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}(\varsigma_q A)_{i,j}} + P_{J,0}. \qquad (103)$$

Рассмотрим в качестве примера случай, когда из двух параметров варьирования выступает исходная толщина заготовки и анизотропия. Этот параметр можно регулировать при получении листов прокаткой [12].

Фактор анизотропии относится к механическим свойствам материала и является параметром, возможности варьирования которого определены природной основой материала, и производственными условиями получения листа. Благодаря последнему анизотропию можно направленно регулировать для получения необходимых технологических требований.

Чтобы найти решения для случая, когда параметром варьирования принят коэффициент нормальной анизотропии, уточним выражение (98). За нулевое значение коэффициента, относительно которого раскладывается в ряд по варьируемому параметру толщина детали, примем величину, соответствующую изотропному металлу (м=м$_o$).

$$\Delta\rho_2 = \mu - \mu_0;\ \varphi_{\mu i,j} = \exp_{\mu=\mu_0}(\Delta e_{si,j});\ \psi_{\mu i,j} = \frac{\partial}{\partial\mu}(\Delta e_{si,j})_{\mu=\mu_0}. \qquad (104)$$

Найдем производные деформации толщин по варьи-руемому параметру для рассматриваемого участка.

Для случая (86), когда в уравнение связи используется соотношение приращений деформации в тангенциальном направлении и по толщине, имеем

$$\psi_{\mu i,j}=\left\{-\frac{L_{i,j}}{1-\mu_0}-\frac{(-\mu_0)\left[\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}(1-\mu_0)+1+\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)^2_{i,j}\right]}{\left[\mu\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}-1\right]^2}\right\}\Delta e_\theta. \tag{105}$$

Для соотношения приращений деформаций в меридиональном направлении и по толщине (88) производная приращения деформации по толщине будет равна

$$\psi_{\mu i,j}=\left\{-\frac{L_{i,j}}{\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}-\mu_0-1}+\frac{(\mu_0-1)\left[(\mu_0-1)\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}-\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}-1\right]}{\left[\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}-\mu_0\right]^2}\right\}\Delta e_{\rho i,j}. \tag{106}$$

В полученных выражениях (105), (106) найдем произ-водную соотношения напряжений

$$\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)_{i,j}=\frac{\sigma_{\theta i,j}\frac{\partial}{\partial\mu}(\sigma_{\rho i,j})-\sigma_{\rho i,j}\frac{\partial}{\partial\mu}(\sigma_{\theta i,j})}{\sigma^2_{\theta i,j}}. \tag{107}$$

Величины меридионального и тангенциального напряжений определяются по формулам (79,82). Найдем их производные по варьируемому параметру

$$\frac{\partial\sigma_{\theta i,j}}{\partial\mu}=\sigma_{\rho i,j}+\mu_0\cdot\frac{\partial\sigma_{\rho i,j}}{\partial\mu}\pm\frac{\mu_0\cdot\partial\sigma_{\rho i,j}{}^2+(\mu^2-1)\sigma_{\rho i,j}\frac{\partial\sigma_{\rho i,j}}{\partial\mu}}{\sqrt{\sigma_S^2-(-\mu_0{}^2)\cdot\partial\sigma_{\rho i,j}{}^2}},\tag{108}$$

$$\frac{\partial\sigma_{\rho i,j}}{\partial\mu}=\sum_{i=1}^{n-1}\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{d\sigma_{\rho i-1,j}}{d\rho}\right)(\rho_{i,j}-\rho_{i-1,j}),\tag{109}$$

$$\frac{\partial\sigma_{\rho i,j}}{\partial\mu}=\sum_{i=1}^{n-1}\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{d\sigma_{\rho i-1,j}}{dh}\right)(h_{i,j}-h_{i-1,j}),\tag{110}$$

Коэффициенты уравнений (112-113) находим при условии, что

$$\frac{\partial\sigma_{\rho i-1,j}}{\partial\mu}=0,$$

$$\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{d\sigma_{\rho i-1,j}}{d\rho}\right)=\frac{d\sigma_{\theta i-1,j}}{d\mu}\cdot\frac{1}{\rho_{i-1,j}}+\frac{f}{\sin\alpha_{i-1,j}}\cdot\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{\sigma_{н i-1,j}}{S_{i-1,j}}\right),\tag{111}$$

$$\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{\sigma_{н i-1,j}}{S_{i-1,j}}\right)=\frac{d\sigma_{\theta i-1,j}}{d\mu}\cdot\frac{1}{R_{\theta i-1,j}},\tag{112}$$

$$\frac{d\sigma_{\theta i-1,j}}{d\mu}=\sigma_{\rho i-1,j}\pm\frac{\mu_0\cdot\partial\sigma_{\rho i-1,j}{}^2}{\sqrt{\sigma_S^2-(-\mu_0{}^2)\sigma_{\rho i-1,j}^2}}.\tag{113}$$

Коэффициент уравнения (110) для цилиндрической формы заготовки находим, используя соотношение (83,84):

$$\frac{\partial}{\partial\mu}\left(\frac{d\sigma_{\rho\,i-1,j}}{dh}\right)=\frac{f}{R_{\theta\,i-1,j}}\left[\sigma_{\rho i-1,j}\pm\frac{\mu_0\cdot\sigma_{\rho\,i-1,j}^{\;2}}{\sqrt{\sigma_S^2-\left(-\mu_0^{\;2}\right)\sigma_{\rho\,i-1,j}^{\;2}}}\right]. \qquad (113)$$

Порядок расчета варьируемого параметра состоит в следующем. Деталь разбивается на элементарные поверхности-участки с кольцевыми элементами, причем так, чтобы их длина была кратной по возможности длинам образующих элементарных поверхностей. Для выбранного одного из участков детали устанавливаются граничные условия: напряжения, деформации, перемещения, относительные толщины. Расчет граничных величин производится с учетом нулевого значения коэффициента нормальной анизотропии $\mu_0 = 0{,}5$. В соответствии с принятой процедурой рассчитываются неизвестные величины в местах стыковки рассматриваемых элементов и участков. По формулам (104-113) определяются производные деформации по варьируемому параметру м и значения функций f,ψ. Эта процедура повторяется для следующего элемента и участка и т.д. Общее число повторений равно сумме произведений количества участков на количество элементов, применяемых при формообразовании детали. Далее по полученным результатам производится расчет оптимальных параметров с использованием выражений (100, 101). Такая методика расчета удобна с использованием программного продукта EXCEL.

2 Специализированные прессы для обработки материалов давлением и их технологическое применение

2.1 Целесообразность создания специализированных прессов для вытяжки деталей пулеобрзной формы из листовых заготовок

Рассматривается вытяжка деталей, имеющих значительный конический придонный участок, переходящий в цилиндрический участок (рис. 1: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – выталкиватель).

Деталь с таким большим отношением высоты к диаметру невозможно получить непосредственно из плоской заготовки, поэтому вытяжку проводят за несколько переходов. На первом переходе из плоской заготовки вытягивают стакан; на последующих переходах проводят вытяжку из цилиндрических полуфабрикатов, полученных на предыдущих переходах; на заключительном переходе из полуфабриката, имеющего конический придонный участок небольшой длины, вытягивают деталь с протяженным коническим участком.

Особенность деформирования заготовки на последнем переходе заключается в том, что на начальном этапе участок заготовки находящийся вне контакта с пуансоном и матрицей, имеет значительную протяженность. В начале деформирования на этом переходе пуансон воздействует на центральную зону донной части заготовки. По ере продвижения пуансона дно заготовки прогибается, одновременно увеличивается ширина зоны контакта с матрицей, причем внутренняя поверхность заготовки постепенно приближается к поверхности пуансона.

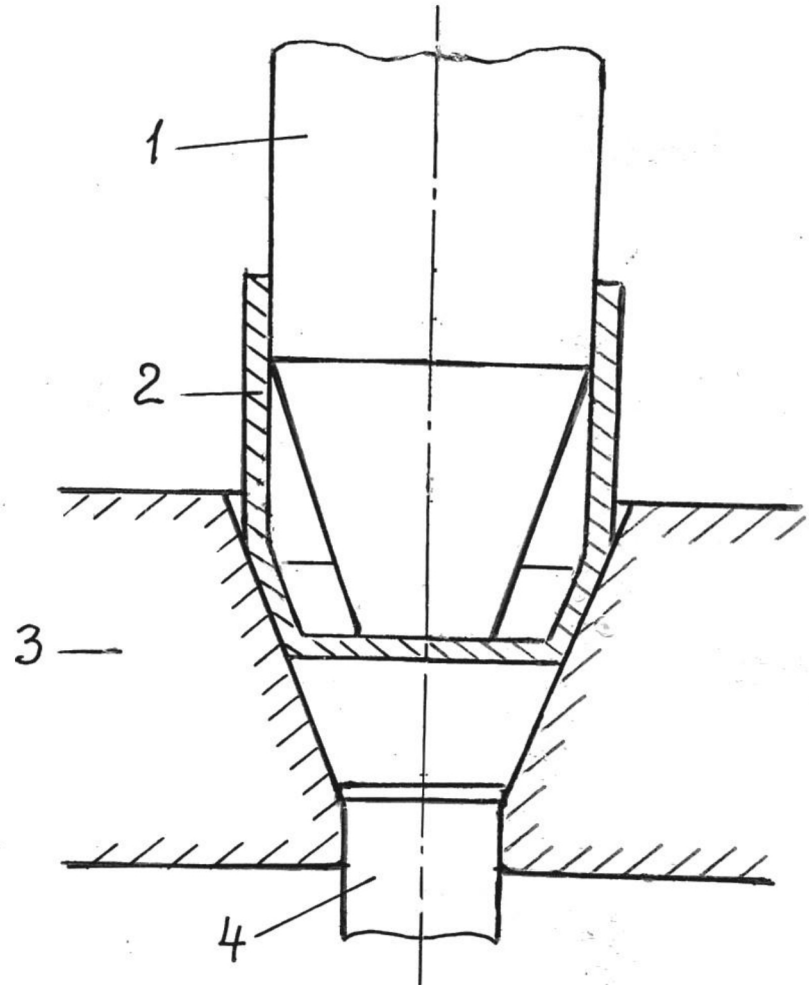


Рисунок 16 - Схема вытяжки детали пулеобразной формы

Образующая заготовки в зазоре между пуансоном и матрицей непрямолинейна, поэтому втяжку таких деталей осуществляют в так называемую глухую матрицу, чтобы на последнем этапе деформирования достичь прямолинейности образующей путем правки заготовки между коническими поверхностями пуансона и матрицы.

В определенных условиях часть заготовки, находящаяся в зазоре между пуансоном и матрицей, может терять устойчивость под действием сжимающих тангенциальных напряжений. Это выражается в образовании продольных складок. Однако образование таких складок меньше, чем во фланце плоской заготовки на первом переходе вытяжки. Это объясняется тем, что часть заготовки, находящейся в зазоре между пуансоном и

матрицей, на промежуточных стадиях деформирования заключена между донной и цилиндрической частями, в которых потери устойчивости не происходит. В тех случаях, когда при вытяжке наблюдается значительная потеря устойчивости, при которой подчеканка на заключительной стадии деформирования не позволяет выправить образующиеся складки, конический участок детали изготовляют за несколько переходов [1].

Чтобы исключить описанные трудности, авторами разработан способ вытяжки через вальцы (рис. 2) и конструкция устройства для его осуществления.

При вытяжке по разработанному способу на первом этапе вальцы совершают движение в направлении, показанном на рис. 2. *а* стрелками ω и $M_{кр}$. В то же время пуансон может совершать незначительное движение назад, оказывая сопротивление, величина которого (P_c) достаточна для того, чтобы происходило формоизменение заготовки. На втором этапе пуансон движется вниз, проталкивая заготовку через вальцы, которые поворачиваются по стрелке ω на рис. 2, *б* в направлении, противоположном направлению поворота на первом этапе, при этом вальцы оказывают сопротивление их повороту, величина которого (M_c) достаточна для формоизменения заготовки.

Необходимость в двухэтапном деформировании вызвана следующим. Если нет первого этапа и заготовку, имеющую дно диаметром, незначительно меньшим диаметра ее цилиндрической части, устанавливают в вальцы, развернутые так, что диаметр образованно ими отверстия соответствует наименьшему диаметру детали, и проводят вытяжку проталкиванием заготовки через матрицу, то острые кромки фильеры вальцов врезаются в дно заготовки, что приводит к браку.

Для осуществления последующей вытяжки конических деталей в матрице с непрерывно расширяющейся полостью разработана конструкция опытно-промышленного штампа, показанная на рис. 3.

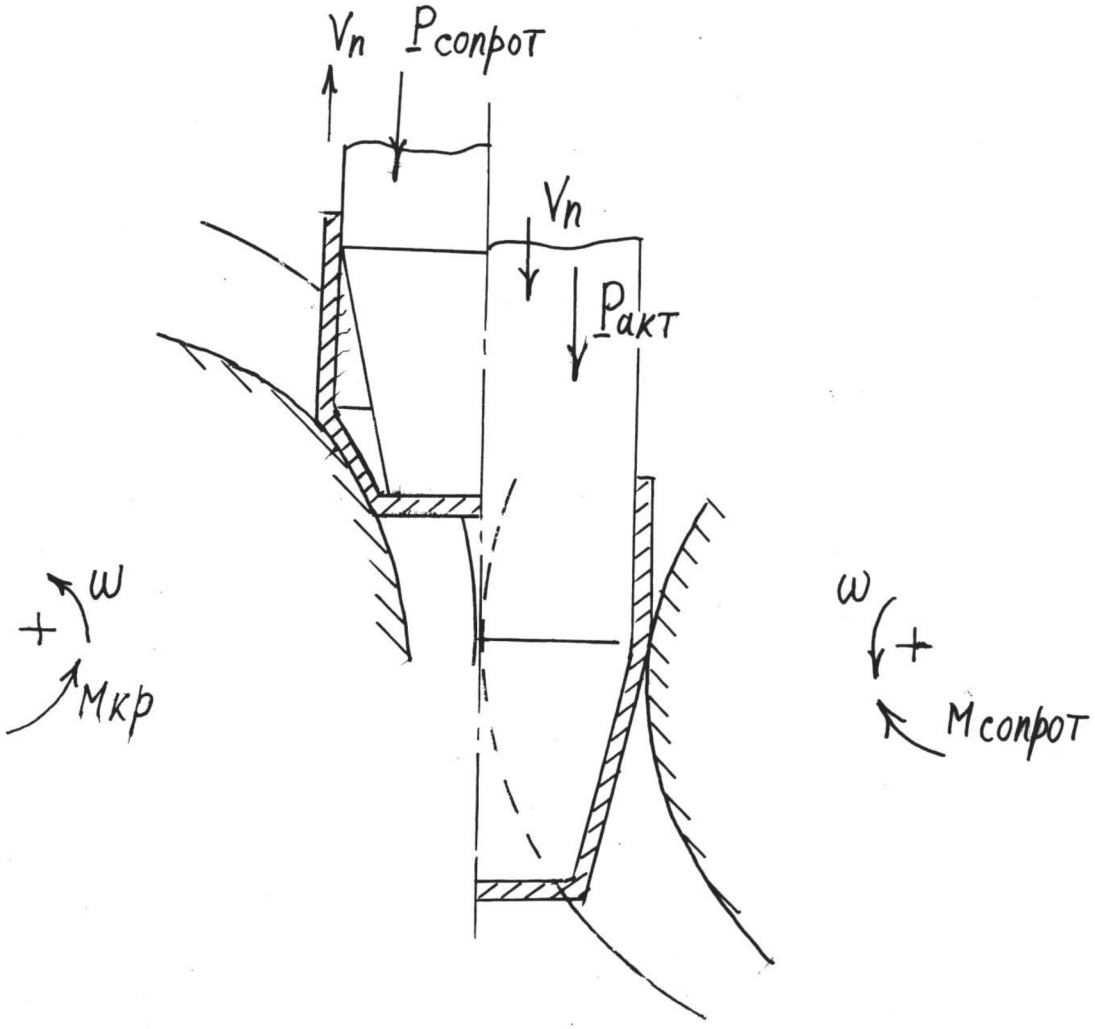


Рисунок 17 - Схема вытяжки рассматриваемой детали через вальцы

Особенностью штампа является выполнение матрицы в виде двух соответствующим образом спрофилированных вальцов. Профиль матрицы (вальцов) таков, что при прохождении через нее конического пуансона диаметр матрицы (полости, образованной вальцами) в каждый момент вытяжки равен диаметру пуансона в сечении его плоскостью, проходящей через оси вальцов, плюс двойная толщина стенки вытягиваемой детали.

В процессе вытяжки под действием пуансона, продвигающего и одновременно формующего в матрице (вальцах) заготовку, вальцы поворачиваются таким образом, чтобы каждому положению пуансона соответствовал определенный участок их рабочего профиля.

Для формования заготовки необходимо, чтобы описанная матрица изменяла свой профиль с достаточным давлением на заготовку. В показанном на рис. 3 штампе предусмотрено специальное устройство, создающее такое давление (сопротивление повороту вальцов).

Штамп имеет нижнюю плиту *1*, на которой установлена опора *3*, в пазах опоры *3* размещены вальцы *5*.

Вальцы имеют (рис. 4) рабочую полость, в которой осуществляется формовка заготовки, отверстие для оси и зубчатую часть, взаимодействующую с зубчатой рейкой, через которую создается сопротивление повороту вальцов и таким образом оказывается давление на заготовку при изменении диаметра матрицы.

Вальцы поворачиваются на осях, установленных в выточках опоры *3* и зафиксированных в них винтами для предотвращения выдавливания моментом, создаваемым силой, действующей в полости матрицы. Оси вальцов и установлены в отверстиях вальцов и в опоре с переходной посадкой H7/k6, чтобы не допускать свободного поворота вальцов, например при установке заготовки.

Заготовка *4* формуется в вальцах с помощью пуансона *6*, установленного в верхней плите *13* штампа. Для съема детали с пуансона предусмотрен съемник, размещенный и закрепленный стопорным винтом в траверсе *7*, перемещающейся по ввинченным в опору *3* шпилькам при воздействии на траверсу плиты штампа при ходе вниз и под действием пружин при ходе ползуна пресса вверх. Пружины поднимают траверсу со съемником на высоту, достаточную для того, чтобы снятая с пуансона деталь свободно размещалась между матрицей и съемником, и ее можно было бы беспрепятственно извлечь из штампа.

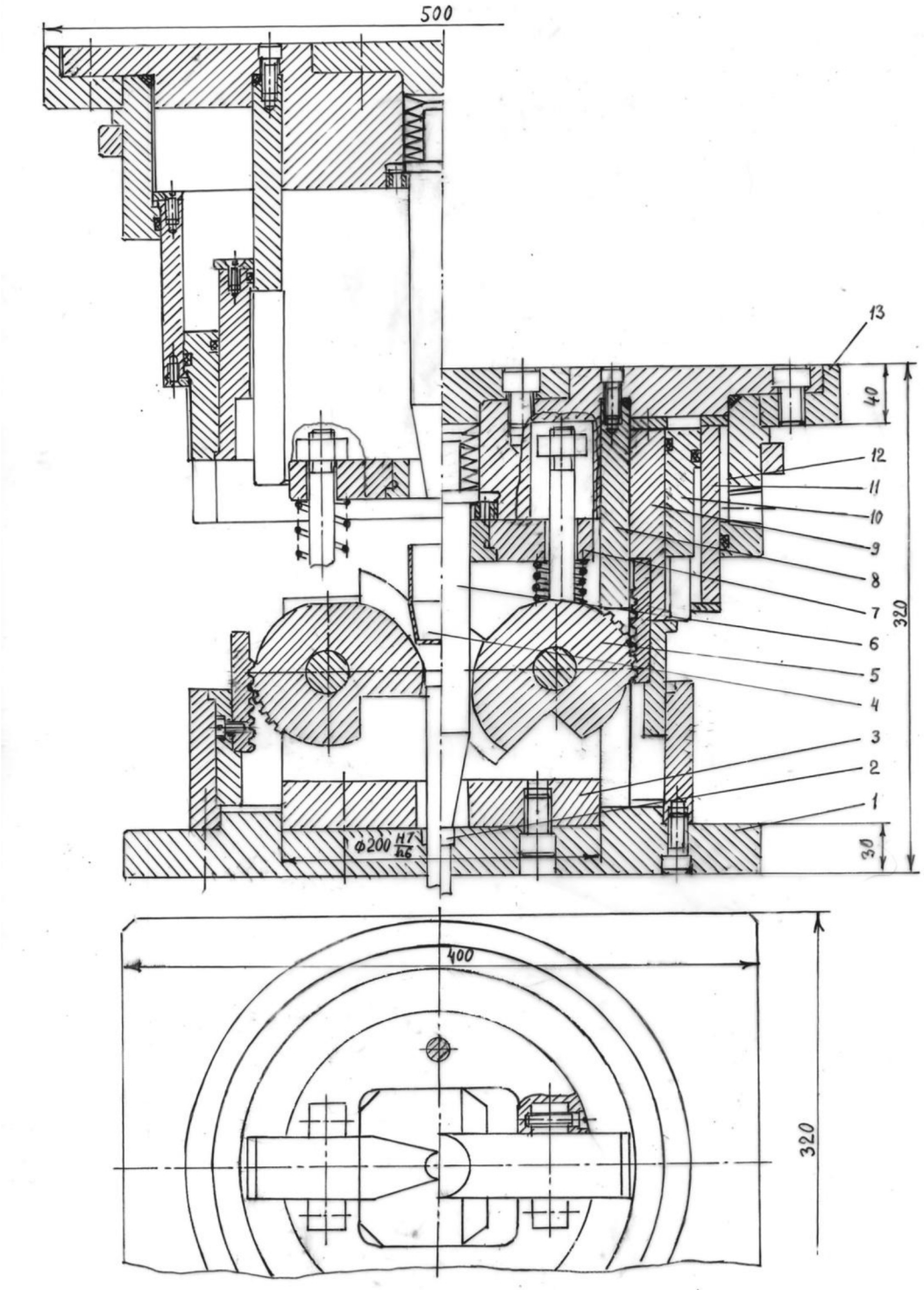
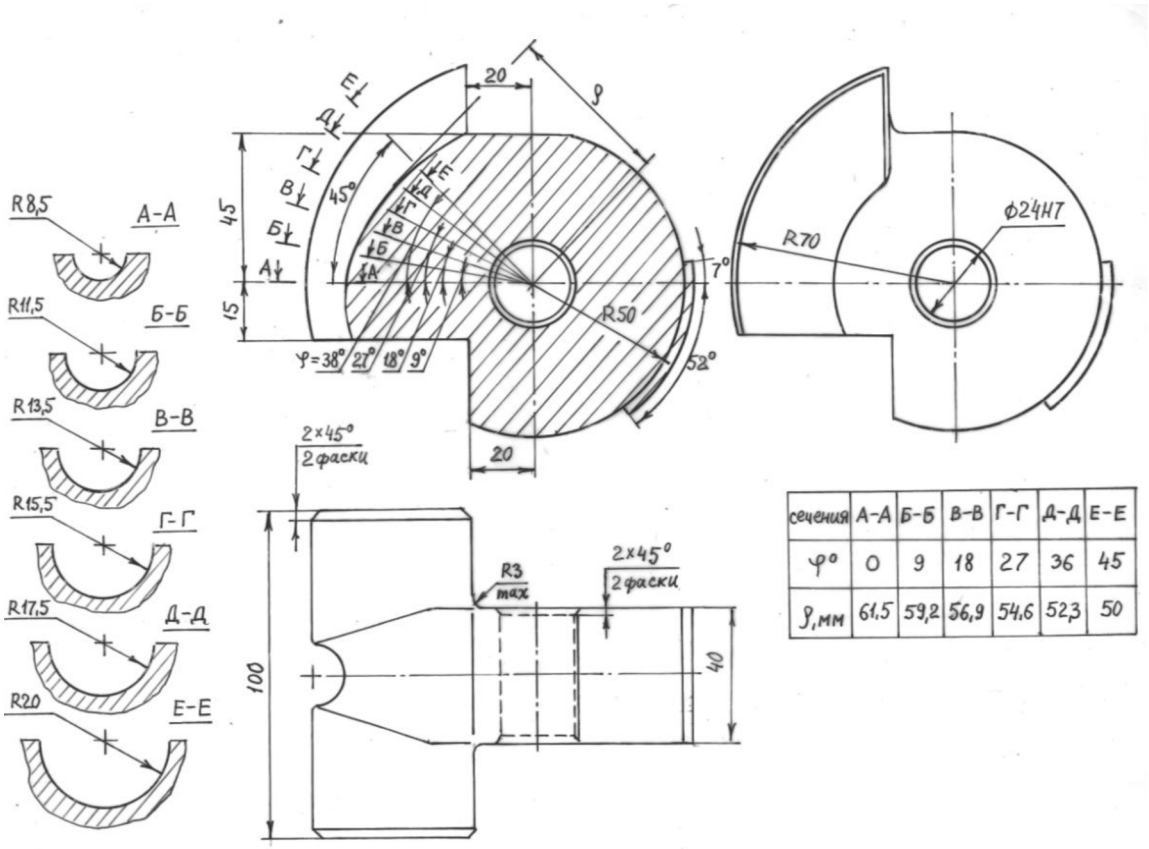


Рисунок 18 - Конструкция штампа для вытяжки в вальцах



сечения	А-А	Б-Б	В-В	Г-Г	Д-Д	Е-Е
φ°	0	9	18	27	36	45
9, мм	61,5	59,2	56,9	54,6	52,3	50

Рисунок 19 - Чертеж вальца, образующего половину полости матрицы штампа

В случае если деталь остается после штамповки не на пуансоне, а в матрице, ее можно вытолкнуть выталкивателем *2* штампа, на который воздействует выталкиватель пресса.

Поворот вальцов *5* во время рабочего хода пресса и сопротивление повороту при проталкивании заготовки через вальцы осуществляется гидро- или пневмоцилиндром *11* и передается через зацепление между зубчатыми рейками и зубчатыми сегментами вальцов. Под действием рейки, опирающейся на гильзу *9* телескопического плунжера пневмоцилиндра, вальцы поворачиваются навстречу движению пуансона, и обжимается концевая часть заготовки. После осуществления заданного поворота вальцов

навстречу движению пуансона открывается полость цилиндра *11*, и вальцы получают возможность поворачиваться уже под действием пуансона в направлении, противоположном направлению их первоначального поворота. Поворот вальцов на этой стадии происходит с сопротивлением, сила которого равна произведению площади торца плунжера на давление в цилиндре. Момент сопротивления повороту каждого вальца равен произведению половины этой общей силы на расстояние от средней плоскости зубчатого зацепления до оси вращения вальца.

В разработанной конструкции штампа плунжер гидроцилиндра выполнен телескопическим, состоящим из трех частей – гильз, две из которых (внутренняя *8* и наружная *10*) выполнены из бронзы, одна (средняя *9*) – из стали. Корпус цилиндра *11*– стальной.

Соосность верхней и нижней частей штампа обеспечивается путем посадки стальной опоры вальцов в бронзовой втулке *8* с гарантированным зазором H7/h6. При этом возникла сложность осуществления контакта зубчатых сегментов вальцов с зубчатыми рейками, поскольку втулка расположена между ними. Чтобы такой контакт был возможен, во втулке выполнены пазы, через которые проходят имеющие форму диска средние части вальцов, соединяющие их профильные части с зубчатыми.

Наличие указанных пазов не позволяет реализовать традиционное расположение гильз (внутренняя выступает из средней, средняя – из наружной) при полностью раскрытом состоянии телескопического цилиндра, так как в этом случае полость цилиндра через пазы во втулке соединялась бы с атмосферой, и цилиндр был бы неработоспособен.

В предлагаемом решении внутренняя гильза своим уплотнительным кольцом обеспечивает герметичность цилиндра, средняя гильза достигает крайнего нижнего положения всей телескопической системы (крайние положения гильз ограничены заплечиками).

Чтобы обеспечить удобство загрузки заготовки в штамп и извлечения штампованной детали, в средней гильзе выполнены окна. При этом

предусмотрены элементы, предохраняющие гильзы от поворота в окружном направлении вокруг общей оси.

Предлагаемый штамп предназначен для эксплуатации на универсальных прессах. При использовании кривошипных прессов цилиндры противодавления в штампе подсоединяют к пневмосети, а при использовании гидравлических прессов – к их гидроприводам через предохранительный клапан.

Однако для размещения описанного штампа требуются прессы с большими размерами штампового пространства и большим ходом ползуна. В то же время сила, необходимая для выполнения штамповочной операции невелика. Поэтому создается ситуация, когда, исходя из размеров необходимого штампового пространства для установки на пресс описанного штампа, приходится выбирать пресс с многократным превышением номинальной силы по сравнению с силой, необходимой для выполнения штамповочной операции. Соответственно, у такого пресса установочная мощность также значительно превышает мощность, требующуюся для выполнения штамповки. В результате пресс эксплуатируется с низким КПД.

Значительно более экономичным является отказ от использования пресса вообще. Вместо этого штамп укомплектовывают автономным гидроцилиндрам (или даже пневмоцилиндром), способным создать необходимую для штамповки заготовки силу.

В результате получают устройство, которое является и не прессом, и не штампом. Она предназначено (как обычный штамп) для штамповки конкретной детали и не нуждается в установке на универсальный пресс. Среди прочих преимуществ такого устройства отметим отсутствие необходимости установки его на фундамент и возможность эксплуатации на верхних этажах зданий.

2.2 Пресс для двухстороннего выдавливания в разъемные матрицы поковок деталей с боковыми отростками

При разработке специализированных штамповочных машин в основу их закладывают прогрессивные технологические процессы, характеризующиеся высоким качеством изделий, уменьшением отходов, культурой производства, более высокой производительностью и экономичностью. В результате разработки таких технологических процессов должны быть заданы исходные параметры для расчета и конструирования специализированных машин.

Предлагаемая конструкция машины возникла именно из требования выполнения более прогрессивного технологического процесса при штамповке изделий с боковыми отростками.

Деталью с боковыми отростками является крестовина карданного вала, которая производится на всех заводах автомобильной промышленности, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. На этих предприятиях крестовину штампуют в открытых штампах. При этом 30-40% металла уходит в заусенец.

Боковое выдавливание имеет ряд преимуществ по сравнению со штамповкой в открытых штампах. При выдавливании коэффициент выхода годного близок к 1,0, нет перерезания волокон при обрезке заусенца, волокна принимают форму бокового отростка. Это приводит к повышению качества изделия с точки зрения механических характеристик.

Авторами было проведено сравнение процессов выдавливания при одностороннем и двухстороннем приложении нагрузки в штампе с разъемными матрицами. Матрицы имели разъем в плоскости осей боковых отростков (горизонтальный разъем).

Схемы процессов одностороннего и двухстороннего выдавливания и формы очага пластической деформации при этих процессах приведены на рис. 5 и 6. Как видно из рисунков, при одностороннем выдавливании очаг

пластической деформации смещен относительно оси боковых отростков, течение металла стеснено. При двухстороннем выдавливании этого не наблюдается. Кроме того, длина недеформированной части заготовки, проталкиваемой пуансоном вдоль оси контейнера матрицы, при одностороннем выдавливании вдвое больше, чем при двухстороннем выдавливании.

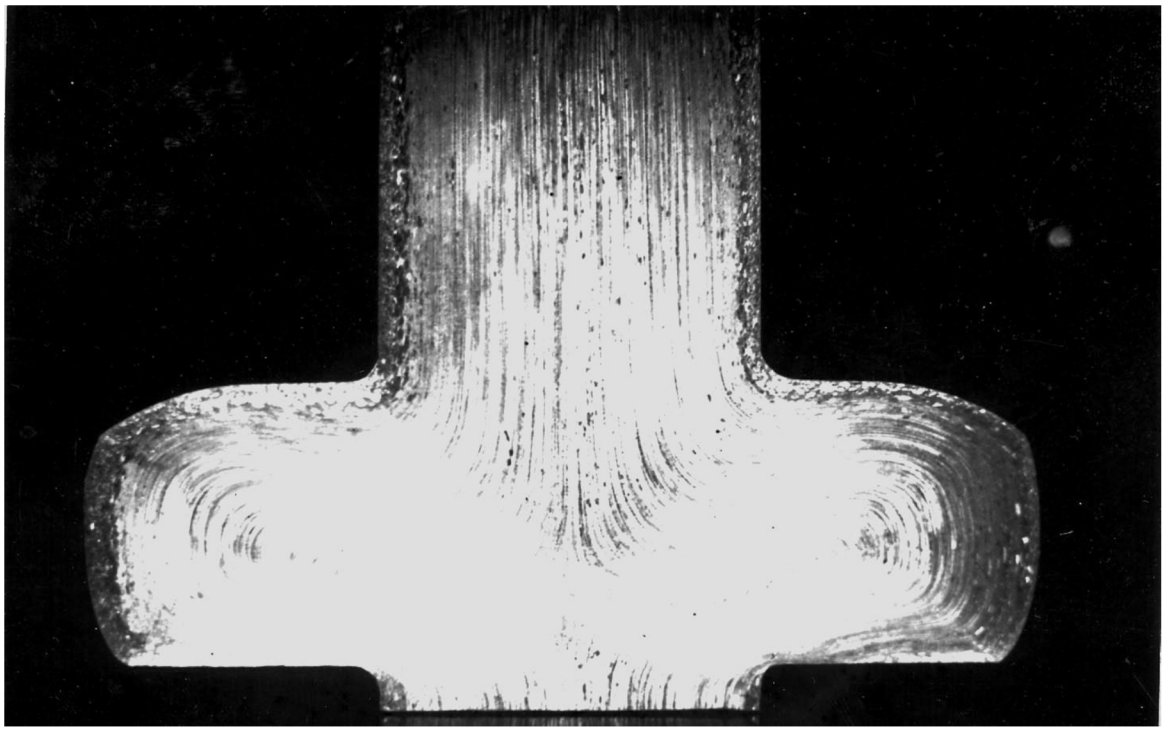


Рисунок 20 - Стесненная форма очага пластической деформации при одностороннем выдавливании

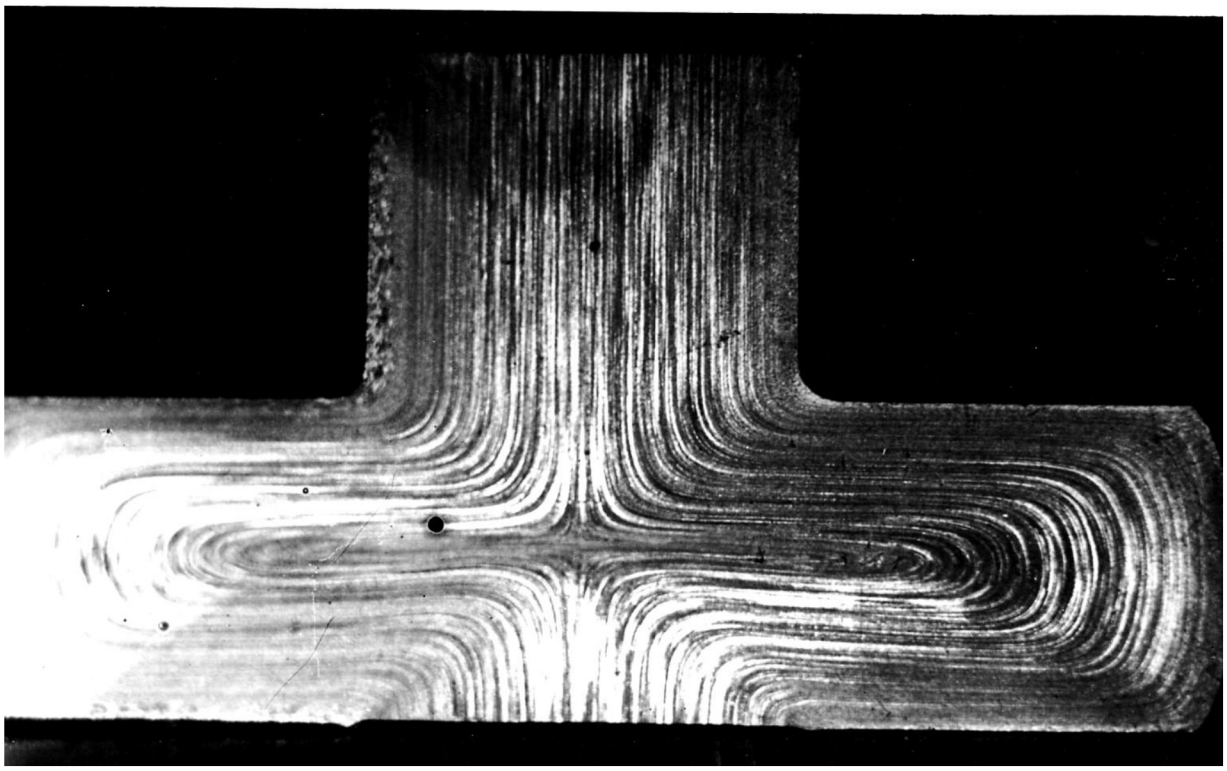


Рисунок 21 - Равномерное течение материала и симметричный очаг пластической деформации при двухстороннем выдавливании

Вследствие изложенного удельная деформирующая сила при двухстороннем выдавливании снижается на 20-50% (в зависимости от соотношения центральной части и боковых отростков) по сравнению с односторонним. Эффект снижения силы повышается при упрочнении материала в процессе выдавливания. Согласно диаграмме усталостной прочности, снижение силы, действующей на пуансон и матрицу, приводит к значительному удлинению срока их службы.

При одностороннем выдавливании на нижней границе очага пластической деформации имеют место значительные смещения частиц металла, что делает невозможной штамповку материалов, обладающих невысокой пластичностью. При двухстороннем выдавливании этот недостаток отсутствует.

При двухсторонней схеме деформирования напряженное состояние ближе к однородному, чем при односторонней. Это обуславливает более высокую пластичность заготовки.

При одностороннем выдавливании полуматрица, расположенная против пуансона, изнашивается быстрее, чем вторая полуматрица. При двухстороннем выдавливании износостойкость обеих полуматриц одинакова.

Таким образом, способ двухстороннего выдавливания является более совершенным. Однако выдавливание по этому способу требует применения машин с двухсторонним ходом ползунов.

Нами разработан проект такой машины. Штамповка на ней выполняется автоматически.

При проектировании автомата (рис. 7) были заданы технические условия из расчета процесса двухстороннего бокового выдавливания крестовины, штампуемой на заводе «Ростсельмаш». Размеры крестовины в плане 94 мм х 94 мм.

Из расчета технологического процесса были заданы следующие исходные данные для проектирования автомата:

Номинальная сила	1 МН
Энергия удара	17,5 кДж
Сила, сжимающая разъемные матрицы	0,4 МН
Суммарный ход ползунов	200 мм
Ход деформирования	60 мм
Число ходов в минуту	12

Автомат (рис. 7) состоит из бесшаботного гидровинтового молота 1, гидропривода 2, механизма подачи заготовок в штамп 3, конвейера 4, на который поступают готовые поковки, индукционного нагревателя 5.

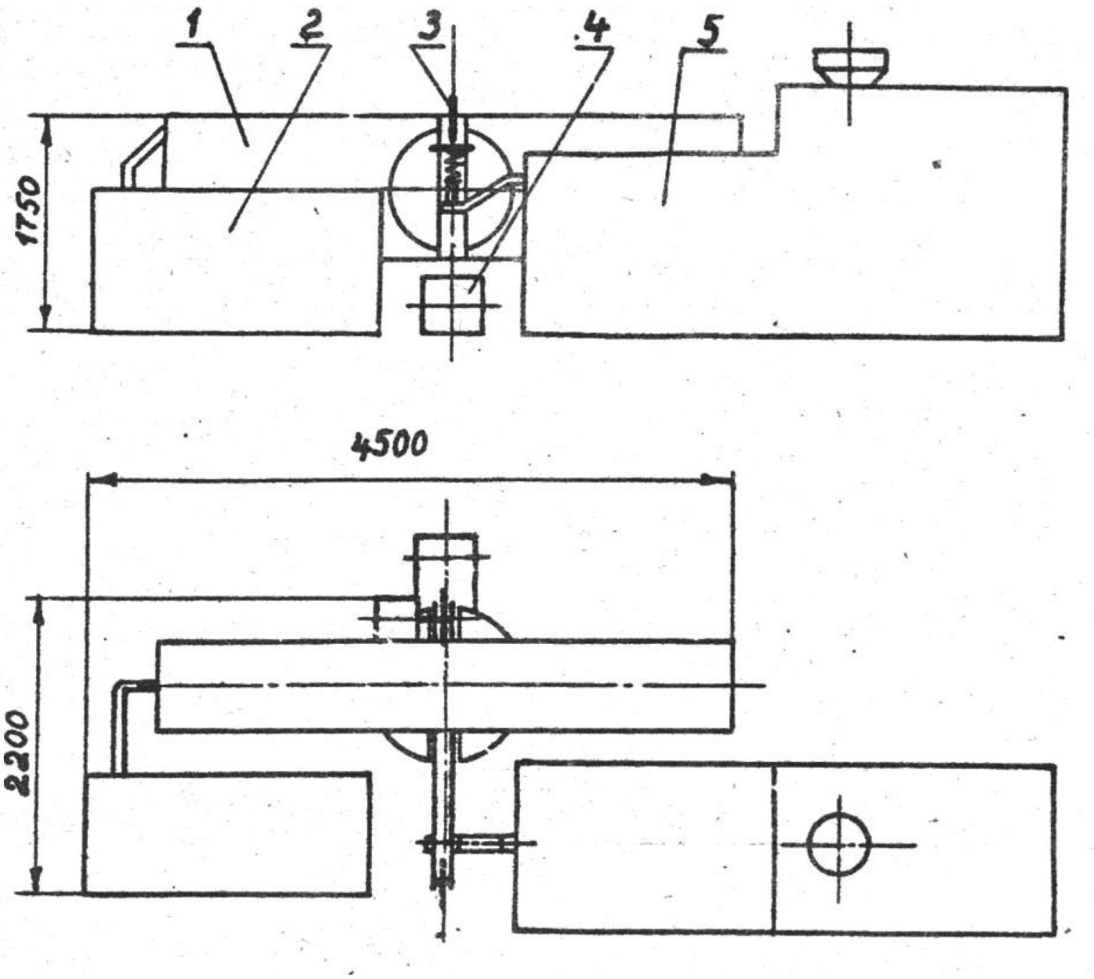


Рисунок 22 - Автомат для двухстороннего бокового выдавливания в разъемные полуматрицы

В основу автомата положен бесшаботный гидровинтовой молот с горизонтально движущимися ползунами (рис. 8). Специализация молота состоит в том, что каждый из ползунов выполнен двойным. Наружные части ползунов 4 связаны с полуматрицами 6, а внутренние 2 – с пуансонами 5 штампов. Наружная часть каждого ползуна приводится в движение от внутренней посредством установленных между ними пружин 3. После смыкания полуматриц штампа подается жидкость высокого давлениях гидроцилиндры 1, связанные с наружными частями ползунов и удерживающие полуматрицы в сомкнутом состоянии во время заполнения их

полости металлом. Внутренние части ползунов продолжают движение, и пуансоны производят выдавливание заготовки.

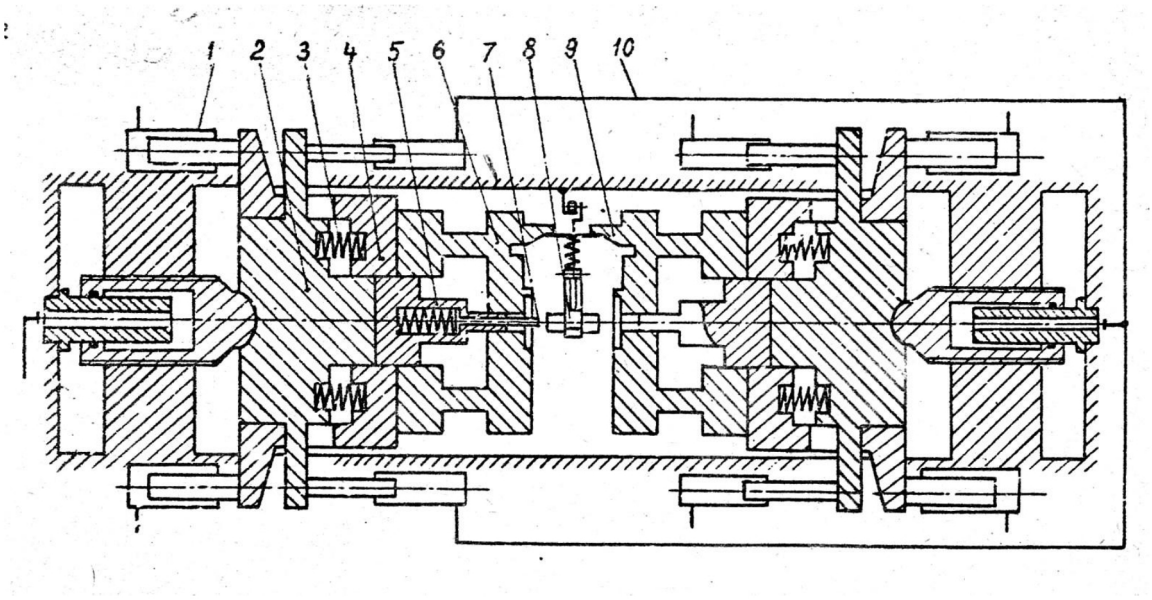


Рисунок 23 - Бесшаботный гидровинтовой пресс-молот

Для обеспечения постоянного места смыкания полуматриц предусмотрена гидравлическая связь 10 между ползунами машины. Для этого рабочая жидкость, вытесняемая при рабочем ходе машины из гидроцилиндров возвратного хода ведущего (левого по схеме) ползуна, поступает в гидроцилиндр рабочего хода ведомого (правого по схеме) ползуна. При возвратном ходе машины рабочая жидкость подается в гидроцилиндры возвратного хода правого ползуна, а из гидроцилиндра рабочего хода этого ползуна жидкость поступает в гидроцилиндры возвратного хода левого ползуна.

Для подачи заготовок в штамп использован механизм, выполненный в виде цепного транспортера с подвешенными на нем двадцатью клещами. Транспортер соединен с ползуном машины через редуктор. В конструкцию редуктора введена муфта обгона. Такая конструкция позволяет осуществлять продвижение транспортера на шаг при возвратном ходе ползунов и его

выстой при рабочем ходе в положении, когда клещи с заготовкой 8 находятся против контейнера матрицы.

Во время рабочего хода кулачки 9, установленные в штампе, раскрывают клещи. В одном из пуансонов размещен ловитель 7, подпружиненный в направлении оси пуансона. Этим ловителем заготовка из клещей проталкивается в контейнер противоположной полуматрицы.

Полуматрицы смыкаются, и производится деформирование заготовки. При возвратном ходе ползунов пресса следующие клещи с заготовкой входят в штамповое пространство, а готовая поковка выталкивается ловителем на ленточный транспортер, размещенный под штамповым пространством.

Раскрытие клещей для захвата заготовки от индуктора осуществляется неподвижно установленным против полости индуктора кулачками, под которыми проходят клещи.

Во время работы машины штамповое пространство закрывается ограждением сферической формы. Цель ограждения двоякая. Во-первых, оно изолирует движущиеся части машины, не допуская возможности соприкосновения человека с ними или попадания в штамповое пространство посторонних предметов. Во-вторых, оно снижает шум, возникающий при работе машины. Для снижения шума металлический кожух покрыт слоем звукопоглощающего материала – стекловолокна.

Был проведен экономический расчет штамповки крестовины на описанном автомате применительно к программе завода «Ростсельмаш». На заводе «Ростсельмаш» крестовину получают односторонним боковым выдавливанием на универсальном кривошипном прессе. Пресс оснащен сложными механизмами, и штамповка осуществляется автоматически. Размещение громоздкого штампа и механизма подачи заготовки и удаления поковки потребовали применения пресса с номинальной силой 4 МН вместо 1 МН, необходимого для штамповки. Несмотря на значительные затраты при замене процесса открытой штамповки на штамповку односторонним выдавливанием на таком автоматизированном универсальном прессе

«Ростсельмаш» получил экономию, которую в современных ценах следует считать равной 4 млн. 600 тыс. рублей в год. Разработанный автомат позволяет получить экономию по сравнению с автоматизированным прессом завода «Ростсельмаш» 2 млн. 400 тыс. руб. в год, а при замене открытой штамповки (при расчете на ту же программу) 7 млн. руб. в год.

2.3 Малогабаритные многофункциональные гидравлические прессы

В доперестроичный период машиностроительную продукцию выпускали предприятия, укомплектованные оборудованием, произведенным на специализированных прессостроительных заводах. Специализированные прессостроительные заводы были заинтересованы в выпуске крупного универсального оборудования. Об этом свидетельствуют номенклатурные каталоги выпускаемой продукции этих предприятий.

Предполагалось, что на прессе с большим запасом по силе и установочной мощности при необходимости можно изготовить мелкие штампованные изделия, если установить соответствующие штампы. Это характерно не только для отечественной промышленности, но и для зарубежной. Одному из авторов довелось участвовать в обсуждении заказа из США, в котором серебряный клапан для флейты предполагалось штамповать выдавливанием на гидропрессе силой 8 МН, хотя потребная для штамповки сила была в 50 раз меньше.

Целесообразность создания мелких прессов подтвердил опыт Оренбуржского завода гидропрессов, выпустившего в конце 80-х годов прошлого века партию прессов силой 50 кН. Эти прессы вызвали активный спрос потребителей, и обладатели этих прессов успешно эксплуатируют их и в настоящее время.

При использовании крупных универсальных прессов для штамповки мелких деталей предъявляются повышенные требования к жесткости

штампов. Направляющие ползуна крупного пресса невозможно отрегулировать с точностью, требуемой при производстве мелких поковок. Необходимую точность приходится обеспечивать за счет направляющих элементов штампов. Последние должны компенсировать перекосы и смещения ползуна крупного пресса, чтобы не допустить поломки деформирующего заготовку инструмента.

При создании малогабаритного пресса его во многих случаях целесообразно разрабатывать для изготовления определенной детали или группы деталей. При этом возможно вообще отказаться от штампа и даже ползуна пресса, как это будет показано ниже.

Габариты вновь создаваемого пресса и трудоемкость его изготовления становятся близки к трудоемкости изготовления и стоимости штампа для универсального пресса. Необходимость иметь универсальный пресс, размещать, обслуживать его при таком подходе отпадает.

Ниже на примере развития новой технологии – выдавливания с активным действием сил контактного трения – показан изложенный нами общий подход к конструированию системы пресс-штамп.

2.3.1 Расширение области применения холодной объемной штамповки выдавливанием с активными силами трения

Использование активных сил контактного трения позволяет расширить область применения перспективной технологии холодной объемной штамповки.

До настоящего времени последняя находит значительно более узкое применение, чем горячая объемная штамповка. Это объясняется следующим.

Остаточное формоизменение поликристаллического тела складывается из пластической деформации его зерен (изменения их формы и размеров) и их относительного смещения. В соответствии с этим различают внутрикристаллитную и межкристаллитную деформации поликриталла.

Увеличение деформации сверх значения, соответствующего пределу текучести, приводит в поликристалле к тому, что зерна получают вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла. Одновременно с изменением формы зерен в процессе деформации происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен в пространстве. Как следствие, при значительной деформации возникает преимущественная ориентировка кристаллографических осей зерен поликристалла, называемая текстурой деформации, а также увеличивается количество несовершенств кристаллической решетки. При деформации поликристалла, как и при деформации отдельных зерен, возрастание количества внутризеренных несовершенств кристаллической решетки приводит к увеличению сопротивления пластической деформации и упрочнению металла.

Процессы внутрикристаллитной деформации являются основными процессами, обуславливающими изменение формы поликристаллического тела. Значительная пластическая деформация может происходить в случае достаточно прочных границ зерен, когда межкристаллитные перемещения незначительны и играют второстепенную роль.

Однако межзеренные перемещения могут играть и значительную роль в формоизменении тела, если возникающие повреждения границ зерен "залечиваются" полностью или в значительной мере в процессе деформации. Это явление наблюдается при высоких температурах. Увеличение пластичности при нагреве до температур горячей деформации является следствием увеличения подвижности атомов. Поэтому с нагревом до ковочных температур доля межкристаллитной деформации в общей деформации металла увеличивается.

Общим положением для всех металлов и сплавов является то, что наибольшую пластичность они имеют при температурах рекристаллизации, т.е. в условиях горячего деформирования, которым одновременно соответствуют и малые значения показателей прочности, а следовательно, и

сопротивления деформированию. Рекристаллизация при пластической деформации заключается в появлении зародышей, возникновении и росте новых зерен взамен деформированных. Возможность рекристаллизации обусловлена тем, что увеличение температуры деформируемого металла поднимает энергетический потенциал атомов настолько, что последние получают возможность перегруппировок и интенсивного обмена местами.

В результате этого обработка давлением в условиях горячей деформации требует приложения к заготовке меньших деформирующих сил и позволяет получать большое формоизменение заготовки без разрушения.

В то же время, для заготовок малых размеров трудно выдержать заданный температурный режим деформирования (учитывая охлаждение при соприкосновении с холодным инструментом и потери тепла в окружающую среду, возрастающие с ростом отношения площади поверхности заготовки к ее объему). Поэтому горячую обработку давлением обычно применяют для крупных и средних заготовок (листов с толщиной не менее 10 мм и заготовок из сортового проката массой более 0,1 кг).

Изготовленные горячей штамповкой поковки содержат окалину на поверхности. Кроме того, из-за интенсивного окисления слой металла под окалиной имеет химический состав, отличающийся от состава основной массы поковки. Это приводит к необходимости предусматривать большие напуски на размеры поковки, удаляемые при последующей обработке резанием.

Заготовки малых размеров и тонколистовые заготовки обрабатывают в условиях холодной деформации.

В существовавшем до недавнего времени разграничении областей горячей и холодной объемной штамповки существовал, наряду с техническим, психологический фактор. Крупные машиностроительные предприятия обладали парком нагревательного оборудования, металлорежущих станков. Металл стоил дешево. Ветераны технологических бюро, в течение многих лет разрабатывавшие процессы горячей объемной

штамповки, не были заинтересованы в своей переквалификации, и приходящих на предприятия молодых специалистов подключали к горячей штамповке.

В настоящее время при организации новых предприятий отказ от приобретения парка нагревательных устройств и парка станков для обточки припусков на горячештампованных поковках, с учетом возрастания стоимости металла, делают холодную объемную штамповку значительно более привлекательной.

Как показывает опыт международных научно-технических конференций, область холодной штамповки в странах Запада также постоянно расширяется.

Чтобы уменьшить анизотропию свойств заготовок, изготавливаемых холодной штамповкой из металлопроката, перспективна штамповка деталей из металлических порошков, поскольку химическую однородность отдельных частиц порошка, их размеры и кристаллическое строение обеспечить значительно проще.

Другое преимущество порошковой металлургии для изготовления металлических деталей заключается в том, что оказывается возможным получать новые технические материалы, которые нельзя или невыгодно получать другими способами. К числу преимуществ порошковой металлургии, кроме перечисленного, относится возможность использования отходов (окалина, стружка) для получения порошков.

Холодное выдавливание позволяет изготовлять поковки, размеры и качество поверхности которых удовлетворяют требованиям, предъявляемым к машиностроительным деталям, или близки к ним. Благодаря этому последующая обработка резанием и отходы металла сведены к минимуму. Однако для выполнения холодного выдавливания необходимо создавать удельные силы, величина которых в ряде случаев составляет четыре и более значений напряжения текучести материала деформируемой заготовки. Это обстоятельство является одной из причин, затрудняющих применение

операции холодного выдавливания для среднеуглеродистых сталей, так как стойкость инструмента (в первую очередь пуансонов) является недостаточной, чтобы технологический процесс был конкурентноспособным по сравнению с другими.

Практикой установлено, что величина удельной силы, воспринимаемая пуансонами из сталей Р9М4, Р6М3, Р6М5, ЭП761, твердость которых HRC 61-63, не должна превышать 2500 МПа.

В настоящее время для снижения деформирующей силы наряду с применением различных смазок и способов обработки поверхности заготовок, позволяющих уменьшить силы контактного трения, проводят выдавливание с активными силами трения.

На рис. 9 приведена схема выдавливания с активными силами трения.

На схеме 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – выталкиватель. Если скорость перемещения матрицы v_1 больше скорости истечения металла $v_{ист}$, то направление сил трения на контакте с матрицей способствует течению металла и позволяет снизить удельную силу выдавливания на 15-25%. Снижение удельной силы на такую величину позволяет вдвое и более повысить стойкость выдавливающих пуансонов.

Выдавливание по приведенной на рис. 9 схеме можно осуществлять на универсальных прессах в штампах, имеющих дополнительную траверсу с отдельным гидроприводом для перемещения матрицы в процессе выдавливания. Однако такие штампы громоздки, для их установки приходится выбирать прессы с большими размерами штампового пространства и, соответственно, большими, чем необходимо, номинальной силой и установочной мощностью электропривода. Это снижает КПД работы прессов.

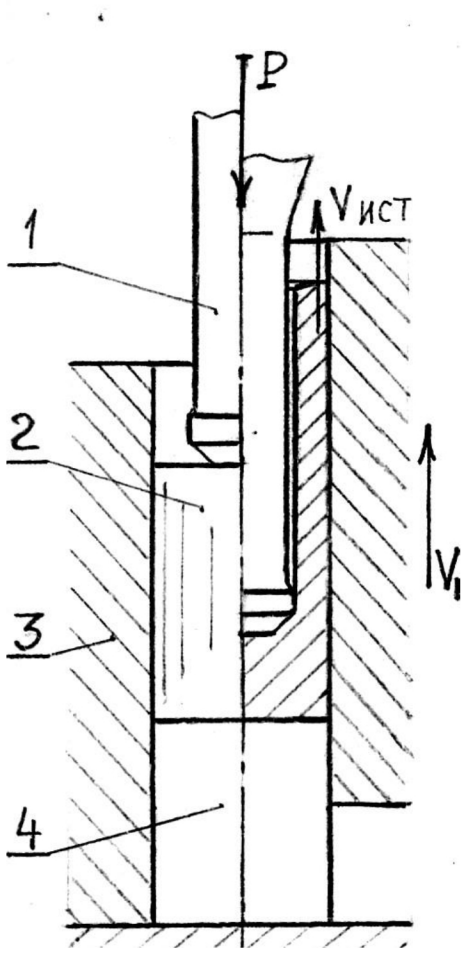


Рисунок 24 - Схема выдавливания с активными силами трения

Практика конструирования штампов для выдавливания с активными силами трения показала, что поскольку в любом случае требуется дополнительная траверса с отдельным гидроприводом, целесообразно отказаться от установки такого штампа на универсальный пресс, а предусмотреть в самом штампе гидроцилиндр, создающий деформирующую заготовку силу. Конструкция автономного штампа или специализированного пресса для выдавливания с активными силами контактного трения приведена на рис. 10.

В прессе, если матрицу, установленную в траверсе *2*, с помощью гидроцилиндров *3* перемещать в направлении течения материала со скоростью, превышающей скорость течения, силы трения на границе

заготовки с матрицей будут способствовать течению и разгрузят пуансоны. Функцию ползуна пресса выполняет плунжер *1* главного гидроцилиндра, непосредственно на котором без штамповой плиты размещен выдавливающий пуансон.

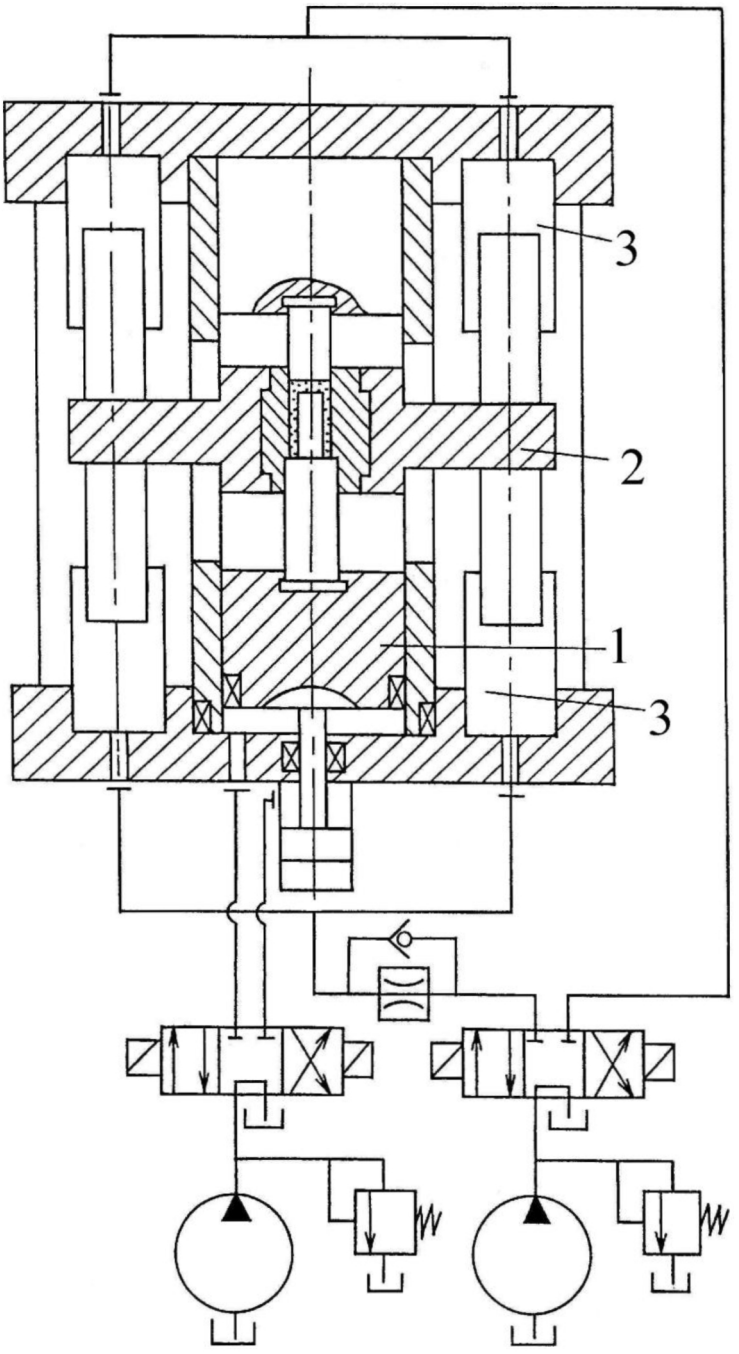


Рисунок 25 - Конструкция пресса для выдавливания с активными силами трения

Фотография пресса, имеющего номинальную силу 2 МН, приведена на рис. 11. Масса этого пресса (без приводов) составляет 2 т.

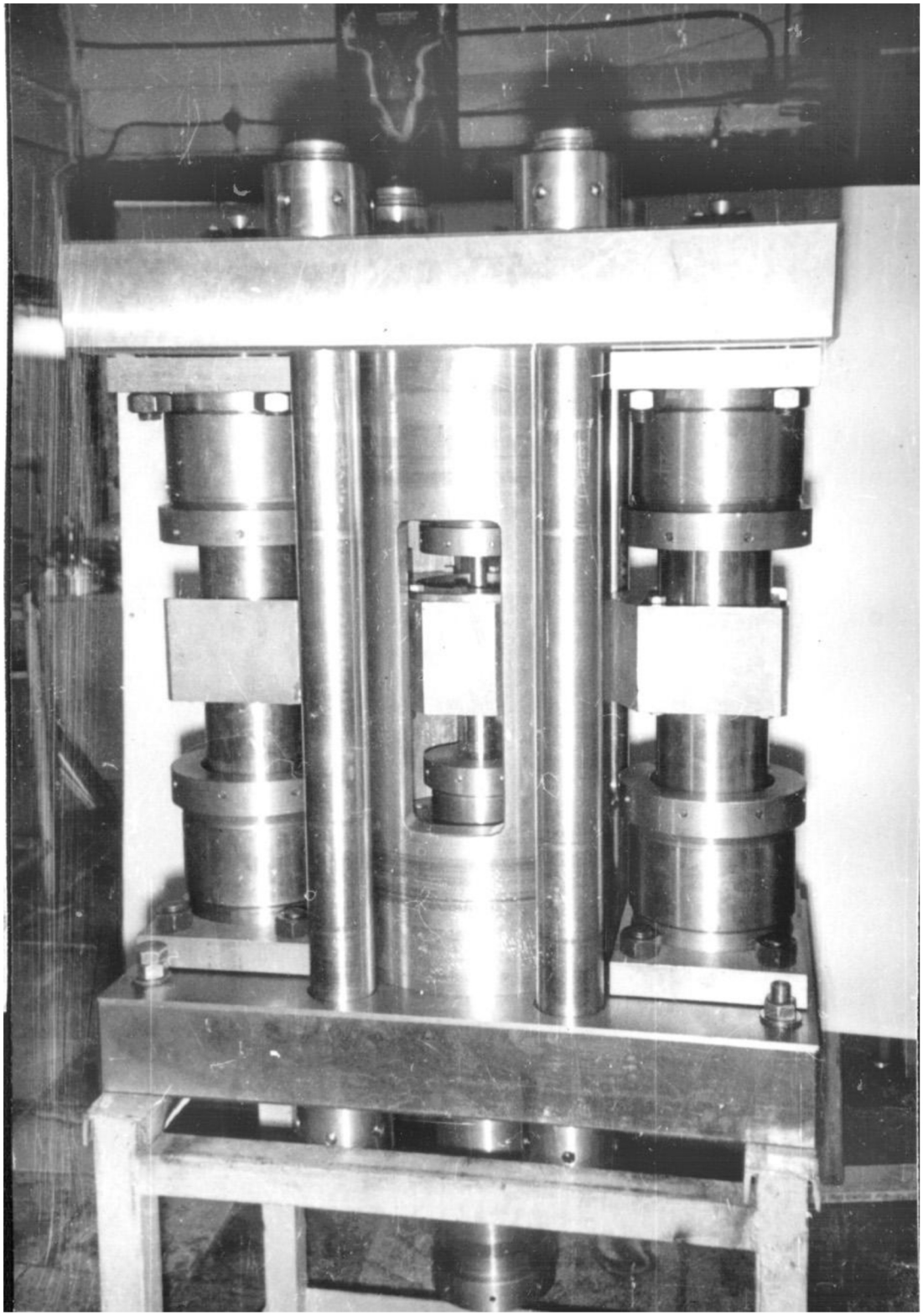


Рисунок 26 - Пресс для выдавливания с активными силами трения

При эксплуатации описанного пресса (рис. 10) выявлено, что траверса *2* имеет недостаточную жесткость и высоту посадочной поверхности в гильзе. В результате в процессе выдавливания возможен перекос траверсы при несинхронной работе гидроцилиндров *3*, что приводит к несоосности внутренней и наружной поверхностей выдавливаемого изделия. Для устранения этого недостатка целесообразно конструировать прессы для выдавливания с принудительным перемещением матрицы в соответствии со схемой, приведенной на рис.12.

В этой конструкции главный гидроцилиндр *8* выполнен вне гильзы *3* и размещен под столом пресса. На его плунжере *7* установлен пуансон *6*. Второй пуансон *4* установлен на опоре *2*. Матрица *5* скреплена с гильзой *3*, которая перемещается боковыми гидроцилиндрами *1* по опоре *2*.

Описанная выше конструкция специализированного пресса для выдавливания с активными силами трения имеет тот недостаток, что для его изготовления требуется применение координатно-расточных станков. Более технологична в изготовлении конструкция пресса (рис. 13), в которой все гидроцилиндры размещены на одной общей оси. При ее изготовлении требуются в основном токарные, круглошлифовальные и простые фрезерные работы.

В прессе главный гидроцилиндр *1* расположен под столом *2*. Плунжер главного гидроцилиндра является ползуном пресса и штамповой плитой. На нем установлен пуансон *4*. Второй пуансон *6* закреплен на опоре *8*, которая служит штоком гидроцилиндра *7*. К гильзе гидроцилиндра *7* крепят траверсу *5* пресса, служащего для перемещения матрицы *3* в процессе деформирования.

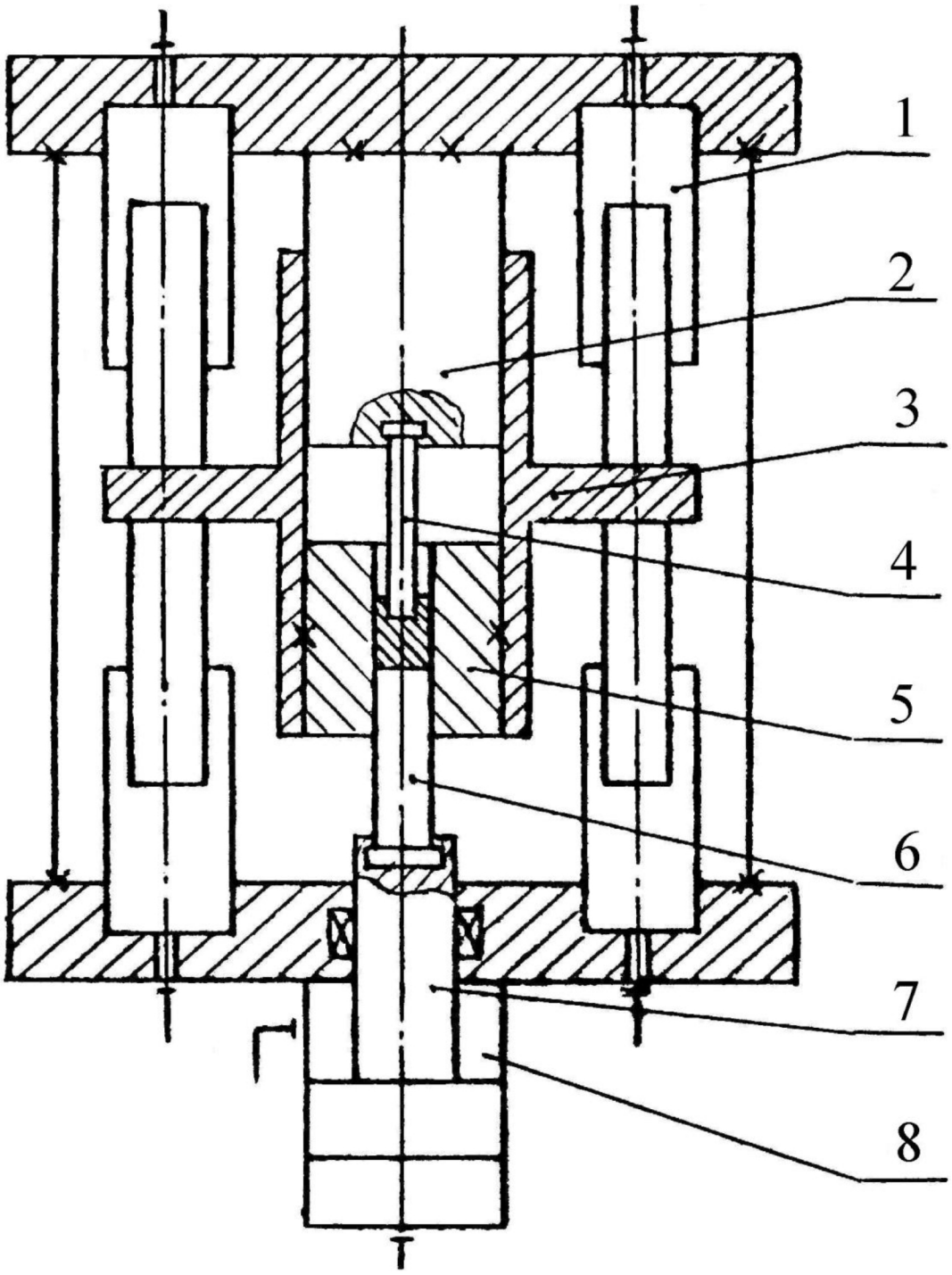


Рисунок 27 - Схема пресса с повышенной жесткостью траверсы для перемещения матрицы

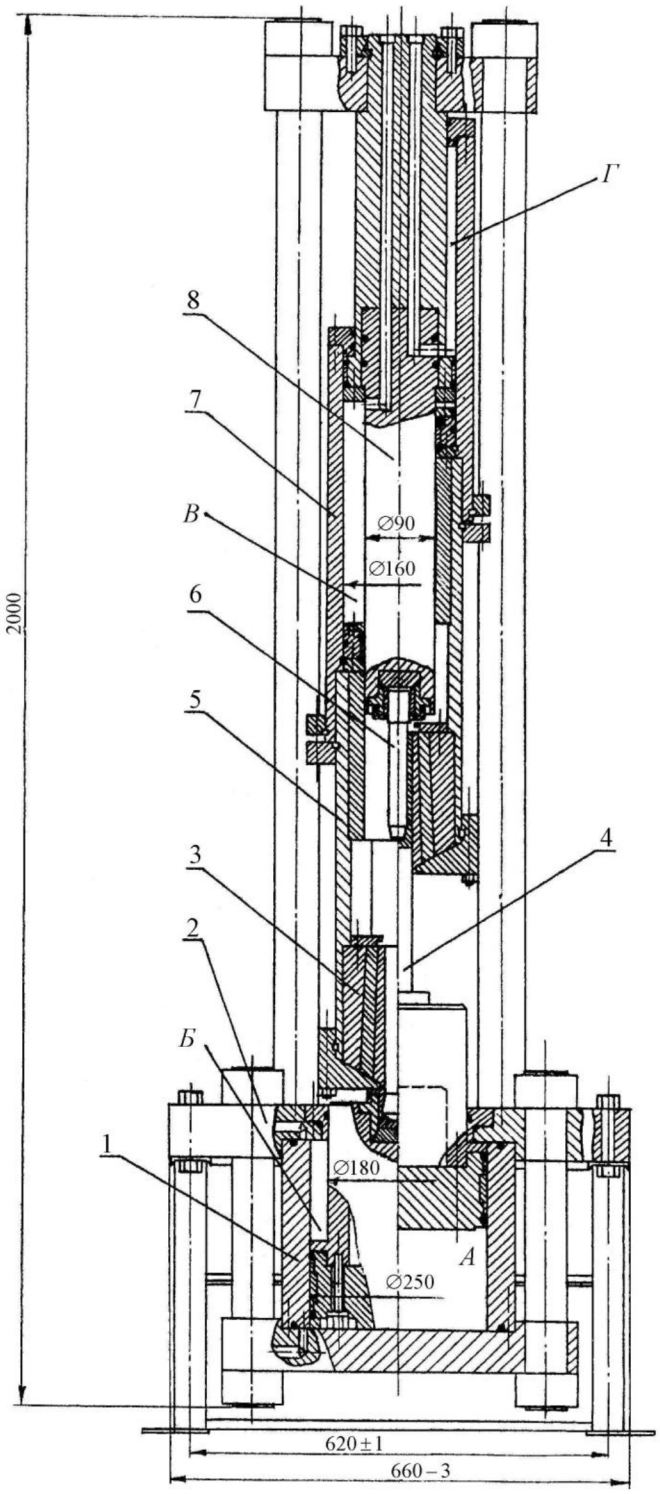


Рисунок 28 - Конструкция пресса для выдавливания с активными силами трения

Рабочие части пресса приводятся в движение от двух насосов. При подаче рабочей жидкости в поршневую полость *А* главного гидроцилиндра поршень совершает рабочий ход, а при подаче рабочей жидкости в штоковую полость *Б* – обратный ход. Прямой и обратный ходы траверсы осуществляются при подаче рабочей жидкости, соответственно, в полости *Г* и *В* гидроцилиндра привода траверсы пресса, служащей для перемещения матрицы.

В конструкции пресса предусмотрено надежное направление гильзы *5* по опоре *8*, что позволяет свести к минимуму несоосность верхнего пуансона и матрицы.

Фотография пресса приведена на рис. 14, 15.

Техническая характеристика пресса для выдавливания с активными силами трения (скорость прессования 2,7 мм/с)

Номинальная сила, МН 1,6
Номинальное давление рабочей жидкости, МПа 32
Наибольшая высота штампуемой детали, мм 160
Наибольший диаметр штампуемой детали, мм 40
Скорость перемещения матрицы, мм/с:
вверх 12,7
вниз 6,8
Габариты, мм ..... 650 х 500 х 2000
Масса без привода, кг 1200
Установочная мощность, кВт 8,5

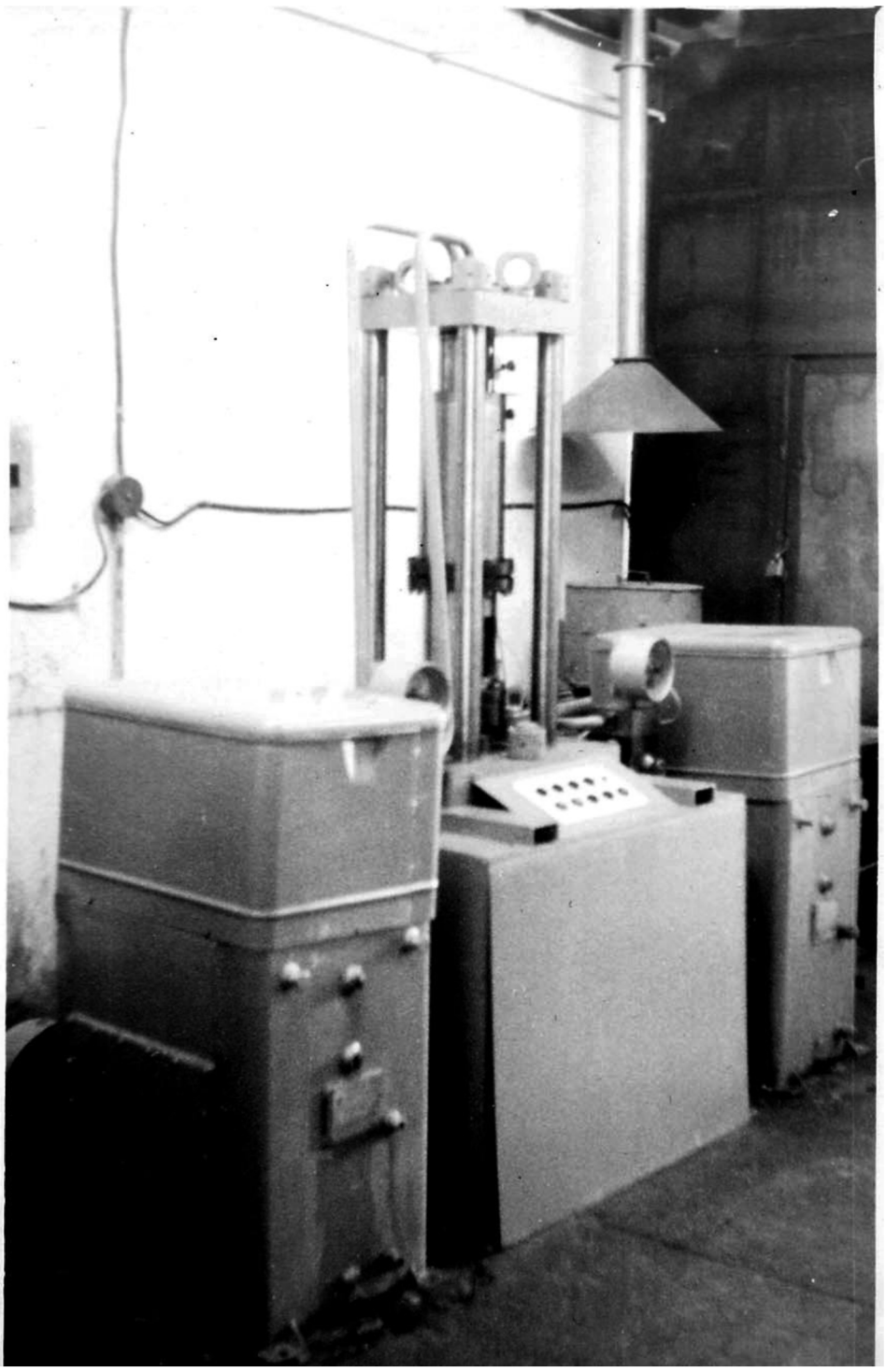


Рисунок 29 - Пресс для выдавливания с активными силами трения на производственном участке

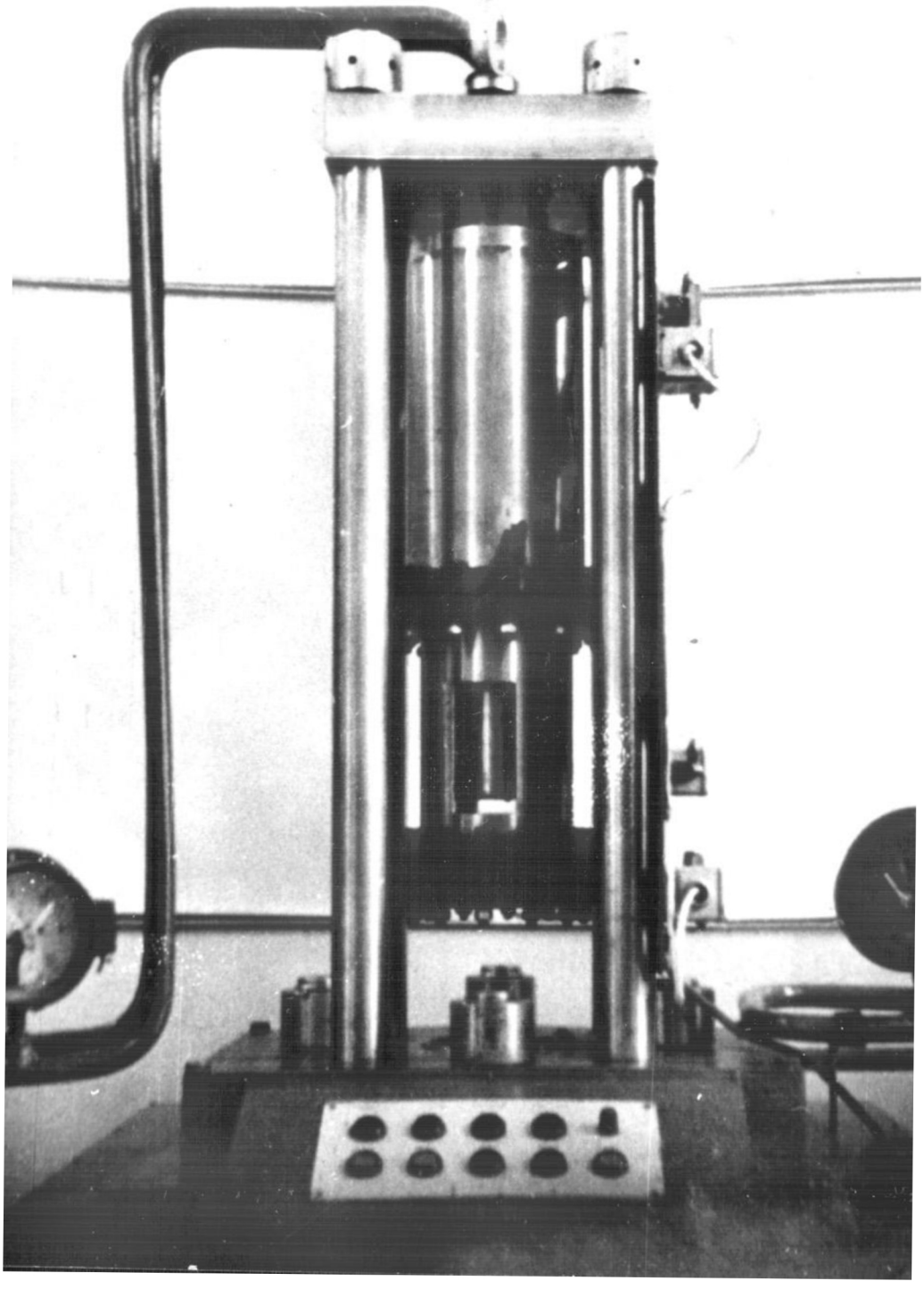


Рисунок 30 - Верхняя часть пресса для выдавливания с активными силами трения

По этому принципу сконструирован другой пресс (рис.16). Масса этого пресса, имеющего силу 1 МН, всего 350 кг. В прессе шток вспомогательного гидроцилиндра *4* является одновременно штоком главного гидроцилиндра 2 с поршнем *3*, а гильза вспомогательного гидроцилиндра является дополнительным плунжером главного гидроцилиндра.

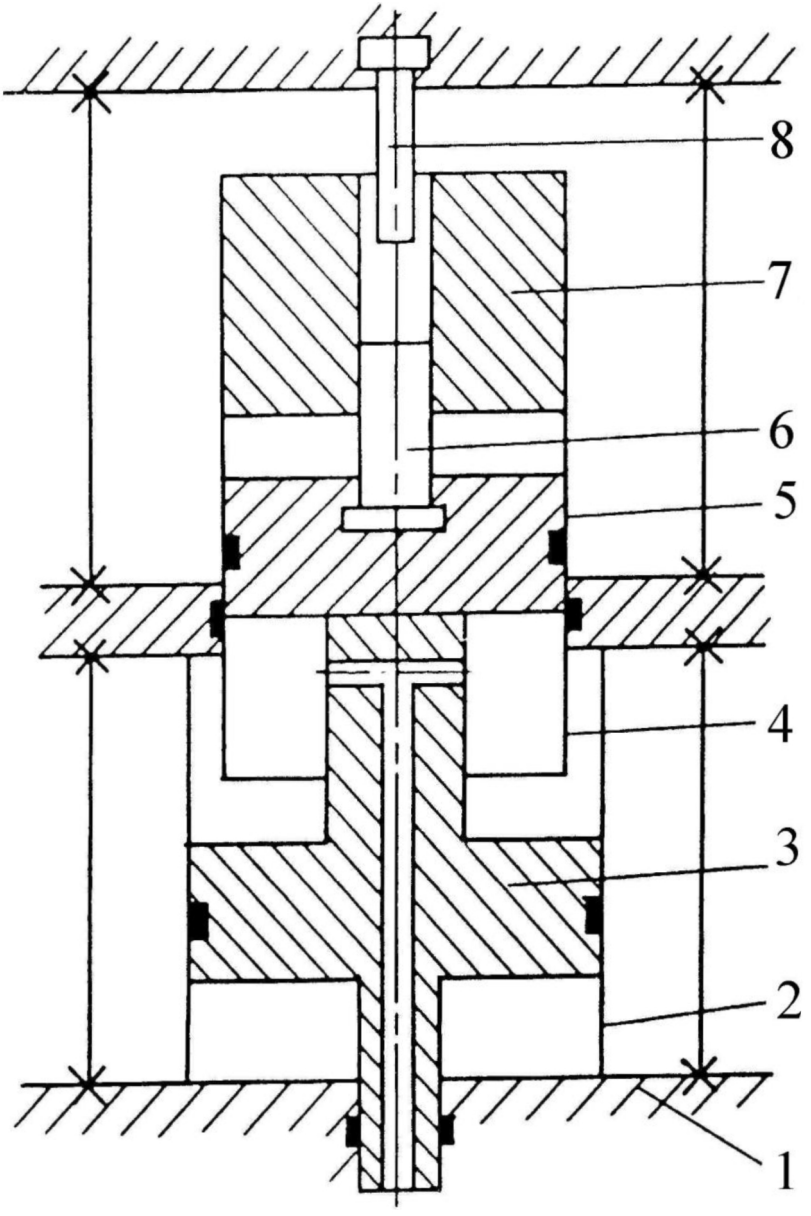


Рисунок 31 - Конструкция особо малогабаритного пресса для выдавливания с активными силами трения

При подаче рабочей жидкости в нижнюю полость главного гидроцилиндра пуансон *6*, установленный на поршне *5* вспомогательного гидроцилиндра, деформирует заготовку относительно неподвижного пуансона *8*, закрепленного на верхней поперечине станины *1*. По мере уменьшения объема верхней полости главного гидроцилиндра из него вытесняется гильза вспомогательного гидроцилиндра, перемещая матрицу *7*. Скорость движения матрицы регулируется путем дополнительной подачи жидкости в верхнюю полость главного гидроцилиндра от гидропривода или путем ее выпуска из этой полости через дроссель. Жидкость из нижней полости вспомогательного гидроцилиндра сливается через осевое отверстие в общем штоке гидроцилиндров. Для возвратного хода жидкость подается через это отверстие. В результате гильза вспомогательного гидроцилиндра с матрицей перемещается вниз, изделие при этом выталкивается из матрицы. После упора гильзы *4* в поршень главного гидроцилиндра происходит их совместное перемещение вниз до исходного положения для нового рабочего хода. При этом деталь съемником (на схеме не показан) снимается с пуансона *8*.

На описанных прессах отработана технология штамповки сдвоенных втулок, показанных на рис. 17 и 18.

При штамповке по схеме на рис. 17 при создании деформирующей силы пуансоном, перемещаемым со скоростью $v_п$, в зависимости от направления перемещения матрицы (на схеме условно обозначено $v_м = 0$ или 2) можно с помощью сил контактного трения направить течение металла, соответственно, во внутреннюю стенку или во внешнюю стенку детали и регулировать соотношение высот стенок (рис. 18).

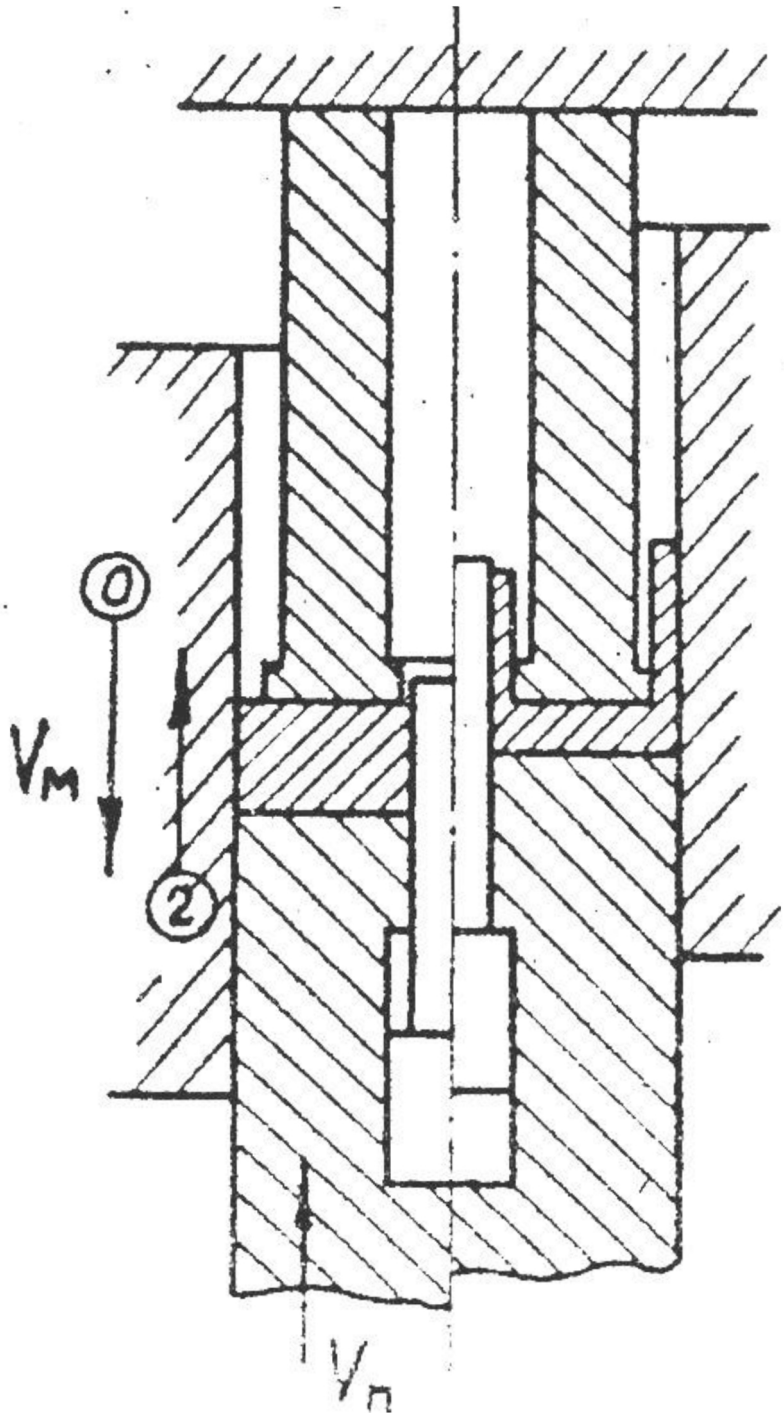


Рисунок 32 - Схема выдавливания сдвоенных втулок

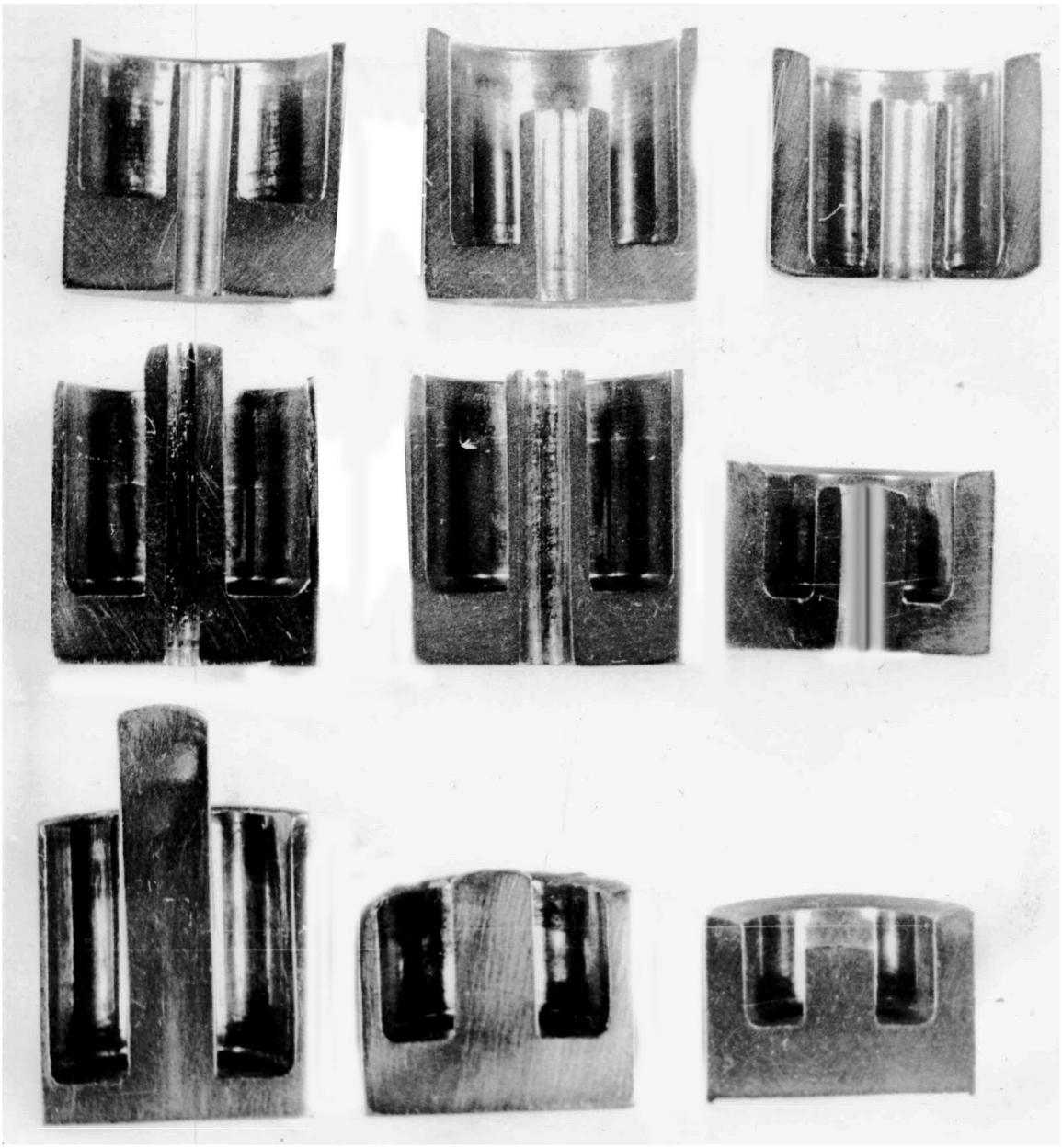


Рисунок 33 - Втулки из стали 15, изготовленные выдавливанием с использованием сил контактного трения для управления соотношения высот стенок

При этом силы трения также используются для снижения удельной деформирующей силы, что позволяет осуществлять холодное выдавливание деталей даже из легированных сталей (рис.19).

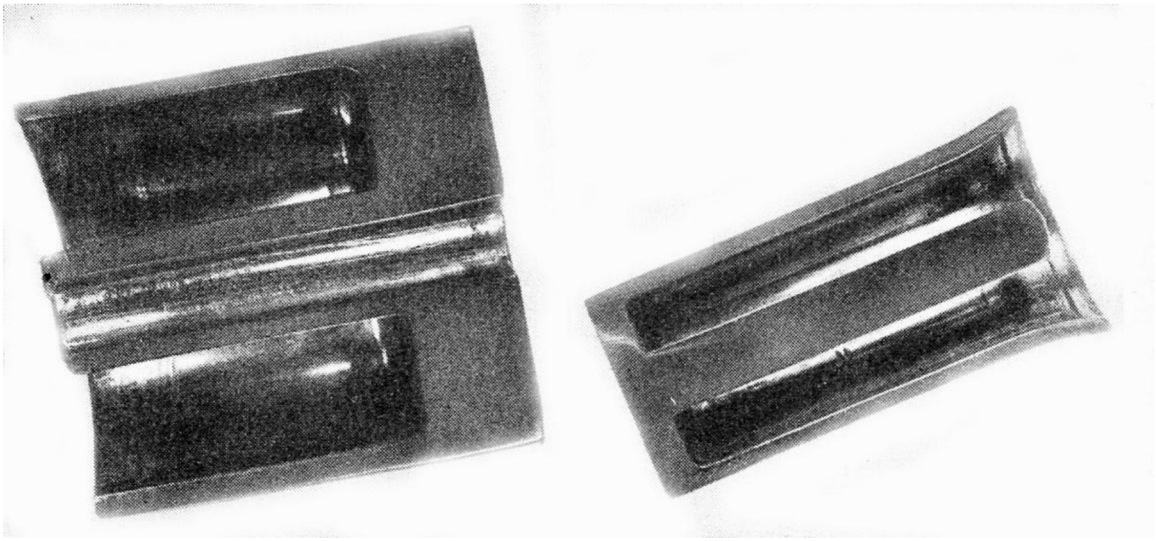


Рисунок 34 - Втулки, изготовленные холодным выдавливанием из стали 20Х

На прессах рассмотренного тип повышается возможность использования, так называемых, компенсационных полостей в штампах (рис. 20) для уменьшения удельных сил, действующих на пуансоны и создания условий холодного выдавливания легирующих сталей.

На рис. 20 показана схема выдавливания стакана со ступенчатой внешней поверхностью из заготовки, имеющий внешний диаметр 2R, пуансоном с диаметром 2r.

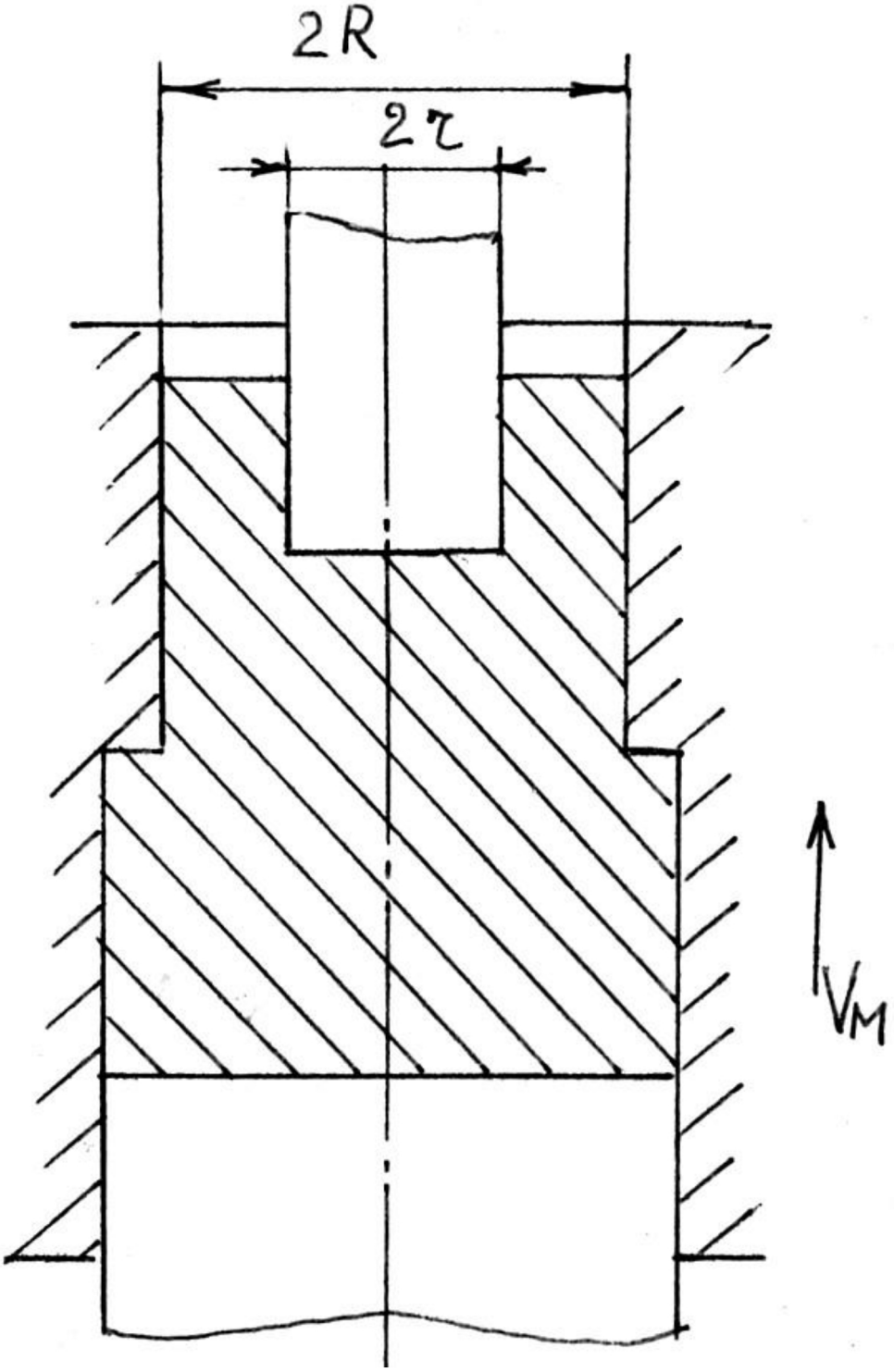


Рисунок 35 - Схема выдавливания с расширяющейся компенсационной полостью в матрице

Исходная заготовка имеет диаметр, равный 2R. Матрица в исходном положении опирается на нижний пуансон, и полость, в которую укладывают заготовку, также равна 2R. По мере внедрения верхнего пуансона в матрицу последнюю передвигают вверх со скоростью $v_{м.}$ При этом на внешней поверхности заготовки действуют активные силы контактного трения, а на уровне ступени матрицы последовательно открывается компенсационная полость, уменьшающая гидростатическое давление в заготовке и снижающее удельную силу выдавливания. Это способствует существенному повышению стойкости инструмента.

Подводя итог, отметим, что изготовление описанных прессов возможно на предприятиях, которым эти прессы нужны для эксплуатации. Трудоемкость изготовления пресса незначительно превышает трудоемкость изготовления штампа для выдавливания к универсальному прессу. Коэффициент полезного действия специализированных прессов выше, чем универсальных. Масса специализированных прессов существенно меньше, чем универсальных, что позволяет использовать их на верхних этажах зданий.

2.3.2 Производство высококачественных деталей из металлических порошков

К реализации операций формования заготовок порошковых деталей сложных форм, когда необходимо создание комбинированного нагружения заготовки, имеют место два подхода. Первый – использование существующих прессов и применение штампов специальных конструкций, создающих комбинированное нагружение заготовки. Второй – создание специализированных прессов, имеющих приводы механизмов, перемещающих с требуемыми силами и рабочими ходами инструменты для заданного нагружения и деформирования заготовки. Первый подход

реализуют японские фирмы Kotaki , Yoshisuka, фирма Mannesmann-Pulvermetall (ФРГ) и др. Сторонники второго подхода специалисты фирмы Bolding Lima Hamilton (США) считают, что максимальное число независимых движений пресса позволяет значительно расширить его технологические возможности и упростить конструкцию штамповых инструментов [2, 3].

В России идут по второму пути, создавая пресс-автоматы с рядом независимых движений. Однако технические характеристики этих пресс-автоматов: высоты засыпных камер, ходы рабочих органов по отношению к номинальной силе пресса таковы, что на этих пресс-автоматах целесообразно изготавливать только плоские детали. Для изготовления высоких деталей приходится создавать сложные штампы к универсальным гидравлическим прессам, имеющим большие ходы ползуна, или разрабатывать новые конструкции специализированных прессов.

В настоящее время работами Дж. Барка, В. Вейса, С.С. Кипарисова, Б.Д. Копыского, А.Г. Овчинникова, А.М. Дмитриева показано, что для получения высокоплотных изделий из железных порошков и порошковых сталей необходимо осуществлять деформирование в условиях, при которых реализуется эффект сдвигов между зернами [4].

Из большого разнообразия процессов изготовления порошковых деталей наибольшей интенсификации производства позволяют достичь холодное выдавливание деталей из спеченных порошковых заготовок и холодное формование порошка в закрытой матрице с последующим спеканием.

Первый из названных технологических процессов состоит в том, что сначала приготавливают порошковую шихту, в состав которой входит железный порошок, порошок пластификатора (стеарата цинка), предназначенный для снижения трения между отдельными частицами, а также, возможно, порошки легирующих элементов.

Затем заготовку спекают в восстановительной атмосфере, например, в водороде или диссоциированном аммиаке, или в атмосфере не допускающей окисления, например, в аргоне или азоте.

Прогрессивность описываемых технологии и оборудования заключается в повышении качества деталей, изготовленных холодным выдавливанием из спеченных из железного порошка заготовок, а также в снижении величин удельных сил, действующих на штамповый инструмент. Снижение удельных сил позволяет повысить прочность инструмента и расширить применение технологии на область производства деталей из легированных порошковых материалов.

Удельная сила (т.е. сила, развиваемая прессом, деленная на площадь перпендикулярного направлению перемещения сечения деформирующего заготовку инструмента) при холодном выдавливании спеченных заготовок составляет 2500 МПа и более. Для снижения удельной силы проводится выдавливание в штампах, рабочие элементы которых перемещаются относительно друг друга таким образом, что силы трения на поверхности контакта пластически деформируемого материала заготовки с этими элементами инструмента становятся направленными в сторону течения материала и способствуют этому течению. Такие силы трения названы активными силами контактного трения.

На рис. 10 показан пресс, в котором выдавливающий пуансон перемещается плунжером *1*. При выдавливании по традиционной схеме силы контактного трения на границе заготовки с матрицей препятствуют течению материала заготовки. Однако, если матрицу, установленную в траверсе *2*, с помощью гидроцилиндров *3* перемещать в направлении течения материала со скоростью, превышающей скорость течения, силы трения на границе заготовки с матрицей будут способствовать течению и разгрузят пуансоны.

Кроме снижения удельной деформирующей силы выдавливание с активными силами контактного трения позволяет улучшить качество изготавливаемой детали.

Исходная спеченная заготовка из железного порошка всегда имеет пористость. Рассмотрим выдавливание, например, детали типа стакан из спеченной порошковой заготовки в обычных штампах при реактивном действии контактного трения по матрице.

Когда пуансон только начинает вдавливаться в цилиндрическую исходную заготовку, чтобы образовать в ней полость, заготовка из-за контактного трения не может переместиться в направлении движения пуансона.

Если бы силы трения не препятствовали такому перемещению заготовки, ее высота, и соответственно пористость, уменьшились бы под действием пуансона. Однако поскольку силы трения препятствуют такому перемещению, заготовка сохраняет имевшуюся у нее пористость, и выдавленный стакан имеет пористую стенку.

Для уменьшения пористости стенки при выдавливании на прессе, показанном на рис. 10, матрицу вначале принудительно перемещают в том же направлении, в каком движется формирующий полость пуансон, создавая силами трения дополнительное препятствие течению материала в стенку стакана, рис. 20, и только после того, как будет исключена пористость заготовки, матрицу направляют в сторону течения материала в стенку стакана, разгружая пуансон при деформировании заготовки.

На рис. 21 видно, что в ачале выдавливания пуансон выполняет только небольшую наметку полости на верхнем торце заготовки, после чего происходит осадка заготовки, при которой исключается остаточная пористость в материале. После завершения выбора остаточной пористости, когда заготовка становится практически компактной, пуансон продолжает свое внедрение в заготовку, и из нее выдавливается стакан. Такое формоизменение особенно важно для увеличения плотности стенок стакана в их верхней части. Если бы на начальном этапе выдавливания не создавали бы силы трения, препятствующие вытеканию заготовки в стенку, то пуансон внедрялся бы в заготовку, не осаживая ее, и верхняя часть стенки стакана

имела бы почти такую же остаточную пористость, как в исходной заготовке, т.е. 13-15%.

В результате получают деталь с высокой равномерной плотностью, рис. 22.

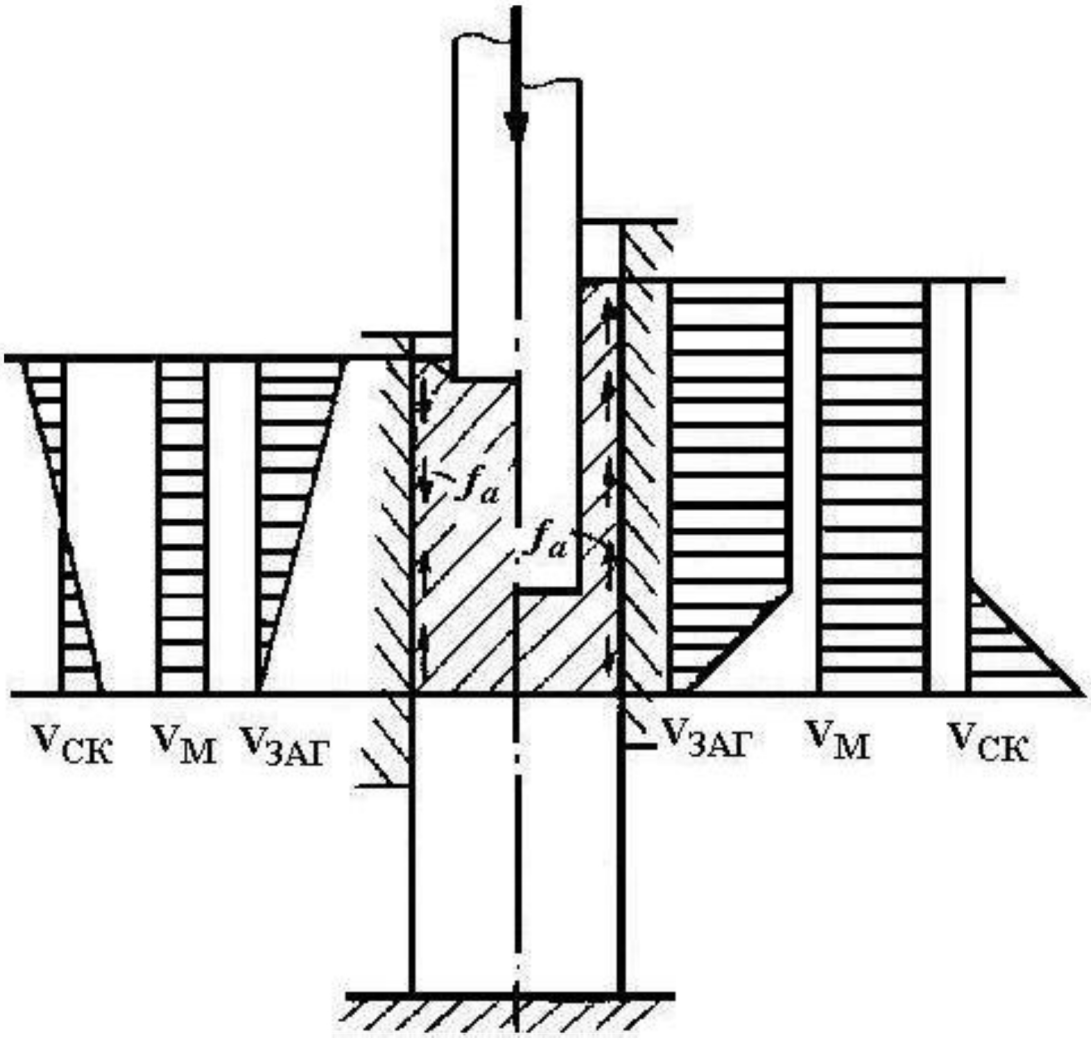


Рисунок 36 - Выдавливание с активными силами трения стаканов из спеченных порошковых заготовок



Рисунок 37 - Поэтапное формоизменение спеченной порошковой заготовки при выдавливании из нее стакана при активном действии сил трения



Рисунок 38 - Стаканы, изготовленные выдавливанием из спеченных порошковых заготовок

При формовании деталей непосредственно из легированного железного порошка с последующим спеканием необходимы меньшие удельные силы, чем при выдавливании спеченных порошковых заготовок. Однако при достижении относительной плотности, равной 83…88 % от плотности компактного материала, в заготовке образуются расслойные трещины. Такие трещины не «залечиваются» при дальнейшем деформировании. Невысокая плотность деталей не позволяет использовать преимуществ легирования.

Для получения высокоплотных деталей непосредственно из порошковой шихты необходимо осуществлять деформирование в условиях, при которых в заготовке происходят интенсивные сдвиги между частицами. Наиболее надежно чистую поверхность частиц можно получить при их сближении благодаря растяжению поверхности контакта. Хрупкие пленки при растяжении поверхности частиц лопаются, и в трещины выходят свежие неокисленные объемы металла, которые и участвуют в диффузии.

Достигается это при совмещении уплотнения давлением всестороннего сжатия со сдвигом частиц относительно друг друга.

Для формования порошковой детали со сдвигом частиц относительно друг друга применяют штампы, конструкция которых схематично представлена на рис. 23.

В этих штампах деталь *2* формуют в матрице *1*. Пуансон *3* совершает винтовое движение: перемещается поступательно и одновременно поворачивается благодаря наличию в его приводе пары винт *5* – гайка *4* с резьбой, имеющей такой шаг, который исключает заклинивание при осевой нагрузке. С помощью этого штампа возможно осуществлять различные соотношения поступательного и вращательного движений пуансона *3*, имея лишь одну пару винт – гайка с неизменным шагом резьбы.

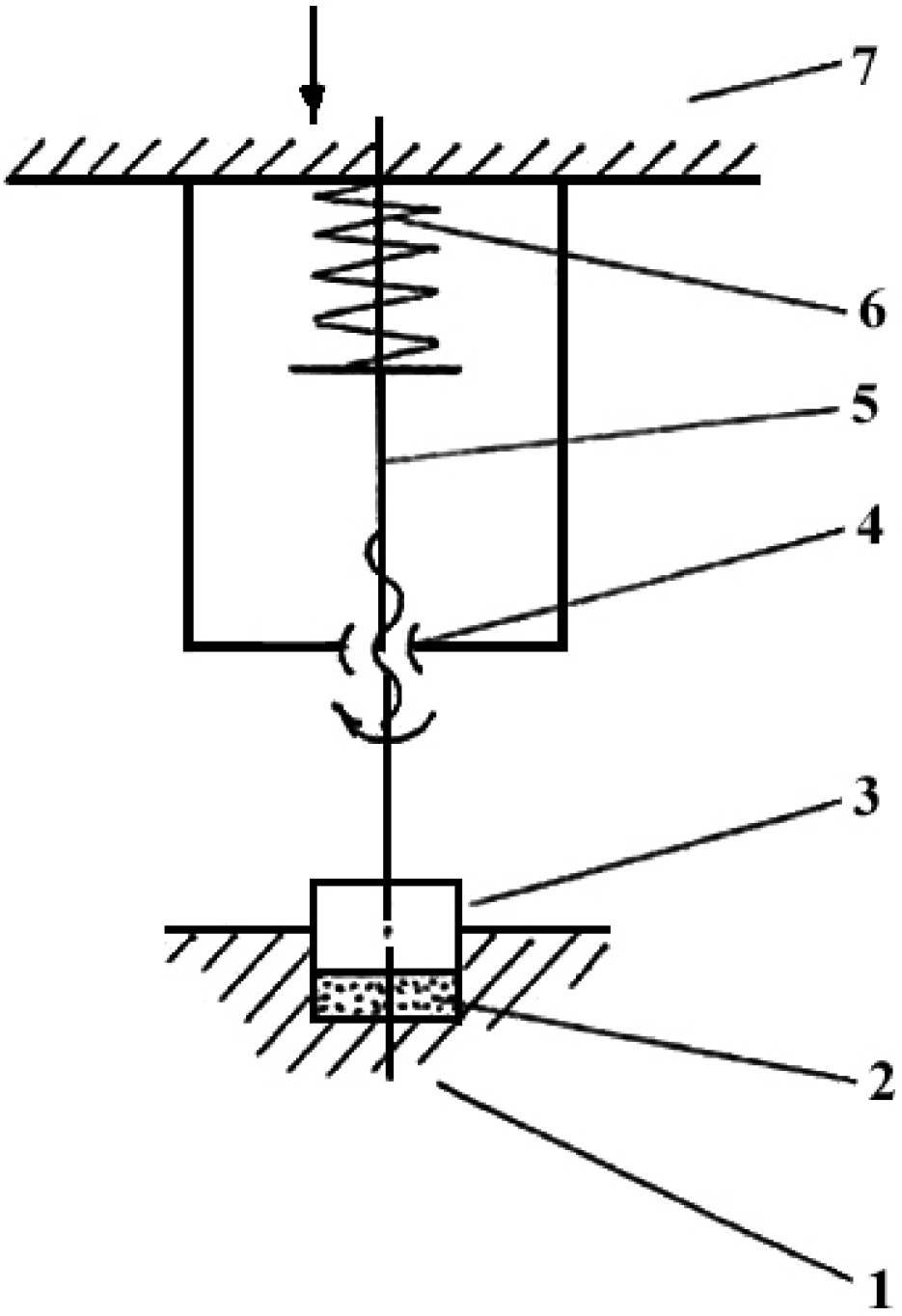


Рисунок 39 - Схема штампа для формования порошковой детали со сдвигом частиц

Это достигается выбором жесткости упругого элемента *6* между верхним торцом винта *5* и плитой *7*, которой штамп соединен с ползуном пресса. При бесконечной жесткости пуансон будет совершать только

поступательное движение, а при нулевой жесткости – в основном вращательное.

На рис. 24 приведена конструкция штампа, позволяющая при использовании лишь одной пары винт – гайка с несамотормозящей резьбой получать винтовое перемещение пуансона с различными углами подъема.

Штамп содержит корпус *1* с полостью *2* для порошка, траверсу *3*, закрепленную на верхней плите *4*. В полости траверсы *3* размещена винтовая пара: винт *5*, гайка *6*, причем гайка *6* закреплена в траверсе *3*, а винт *5* в начальном положении удерживается от выпадения из гайки *6* при помощи своего фланца. На нижнем торце винта 5 закреплен пуансон *7*. Внутри траверсы *3* с первоначальным зазором относительно верхнего торца винта *5* расположена ограничительная плита *8*, над которой размещен упругий элемент *9*, предварительное сжатие которого осуществляется при закреплении траверсы *3* к верхней плите *4* и регулируется толщиной ограничительной плиты *8*.

Штамп работает следующим образом. После засыпки порошка в полость *2* корпуса *1* верхняя плита *4* с траверсой *3*, гайкой *6*, винтом *5*, опирающимся в первоначальном положении своим фланцем на торец гайки, и пуансоном *7* движется вниз. При соприкосновении пуансона 7 с порошковой заготовкой винт *5* начинает перемещаться относительно гайки *6*, совершая вынужденное вращательное движение. При этом происходит подравнивание верхнего слоя порошка под действием веса вращающегося винта и пуансона. После того, как верхний торец винта упирается в ограничительную плиту, он перестает вращаться и, перемещаясь совместно с траверсой *3* и гайкой *6*, производит формование порошка. Как только сила на верхнем торце винта 5 станет больше силы предварительного сжатия упругого элемента *9*, винт *5* перемещается вместе с ограничительной плитой *8* относительно гайки *6* в траверсе *3*, в результате чего окончательное формование осуществляется при осевом перемещении пуансона *7* с одновременным его вращением.

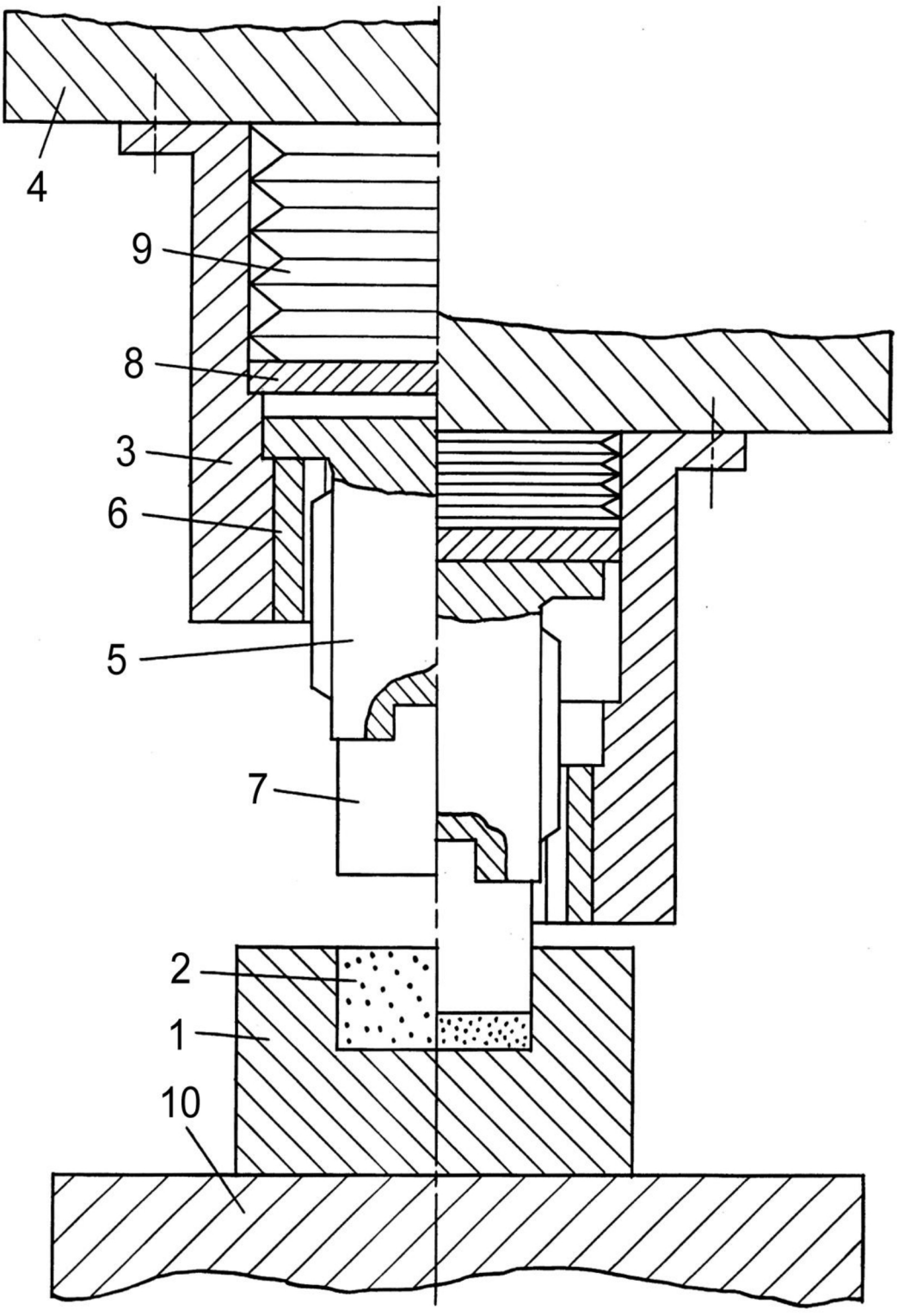


Рисунок 40 - Конструкция штампа для уплотнения заготовки поворачивающимся пуансоном

При этом соотношение вращательного и поступательного перемещений пуансона зависит не только от угла подъема резьбы пары винт – гайка, но и от жесткости применяемого упругого элемента. Это дает возможность совершать пуансоном винтовое движение с углами подъема намного меньшими предельных для несамотормозящей резьбы.

По окончании формования заготовки при обратном ходе верхней плиты *4* ограничительная плита *8* и винт 5 под действием упругого элемента и сил тяжести возвращаются в первоначальное положение и продолжая подниматься вместе с траверсой *3* и гайкой *6* освобождают формованную деталь, которая извлекается из корпуса *1* при помощи выталкивателя.

При эксплуатации описанного штампа (рис. 25) возникали трудности с возобновлением при каждом рабочем цикле смазки в зазорах в резьбе между винтом и гайкой, а также между верхним торцом винта *5* и ограничительной плитой *8*. Поэтому не смотря на большой опыт, накопленный в научной школе, к которой относятся авторы, по созданию машин с винтовым приводом, в дальнейшей своей работе авторы предпочли применять описываемые вдан6ном разделе прессы, не использующие винтовой привод.

В развитие способов формования порошковых заготовок при создании активных сдвигов между частицами заготовки предложена схема, приведенная на рис. 26. Формование по этой схеме осуществляется с помощью штампа, описанного в разделе 1 и показанного на рис. 3.

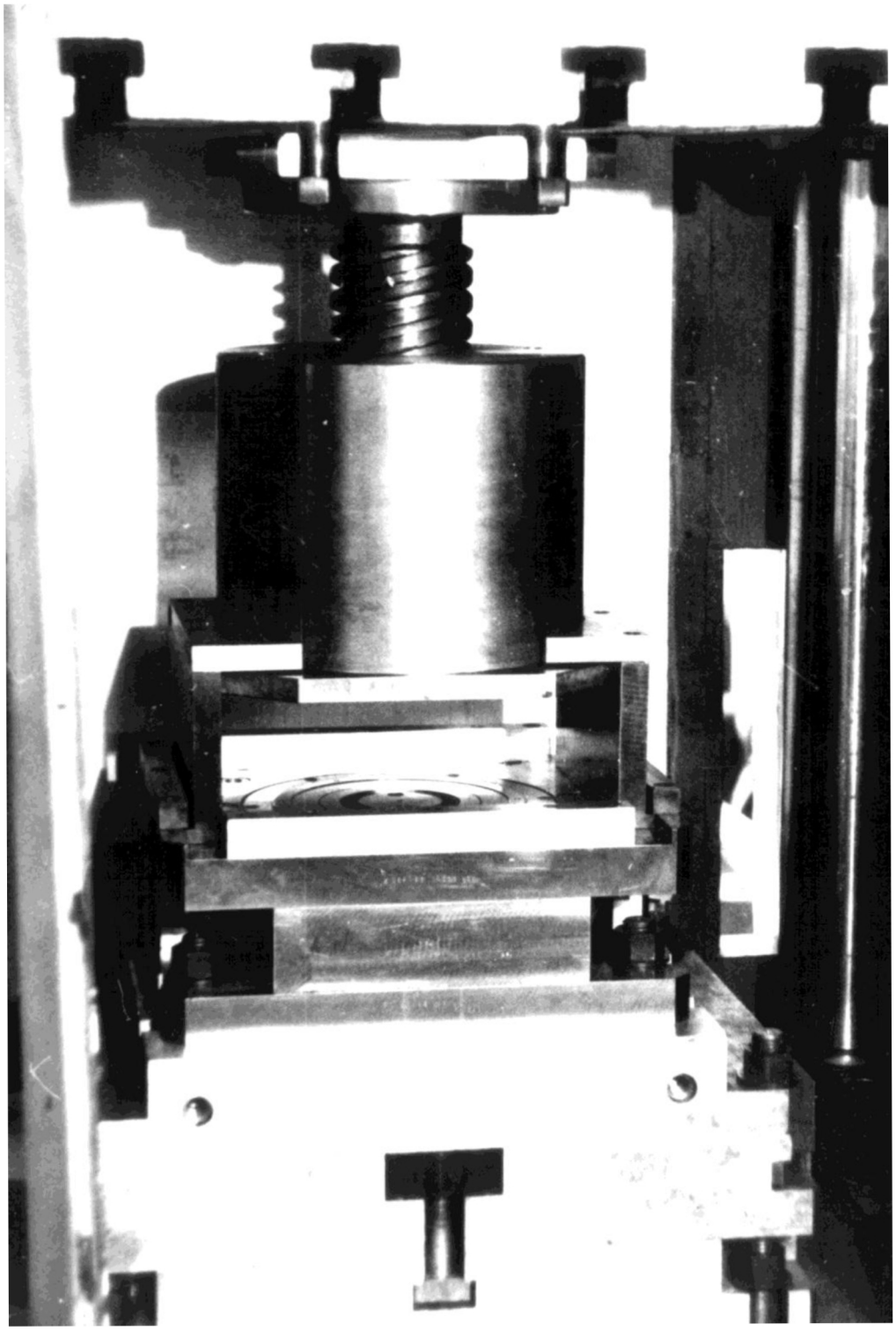


Рисунок 41 - Штамп для формования порошковых деталей поворачивающимся пуансоном

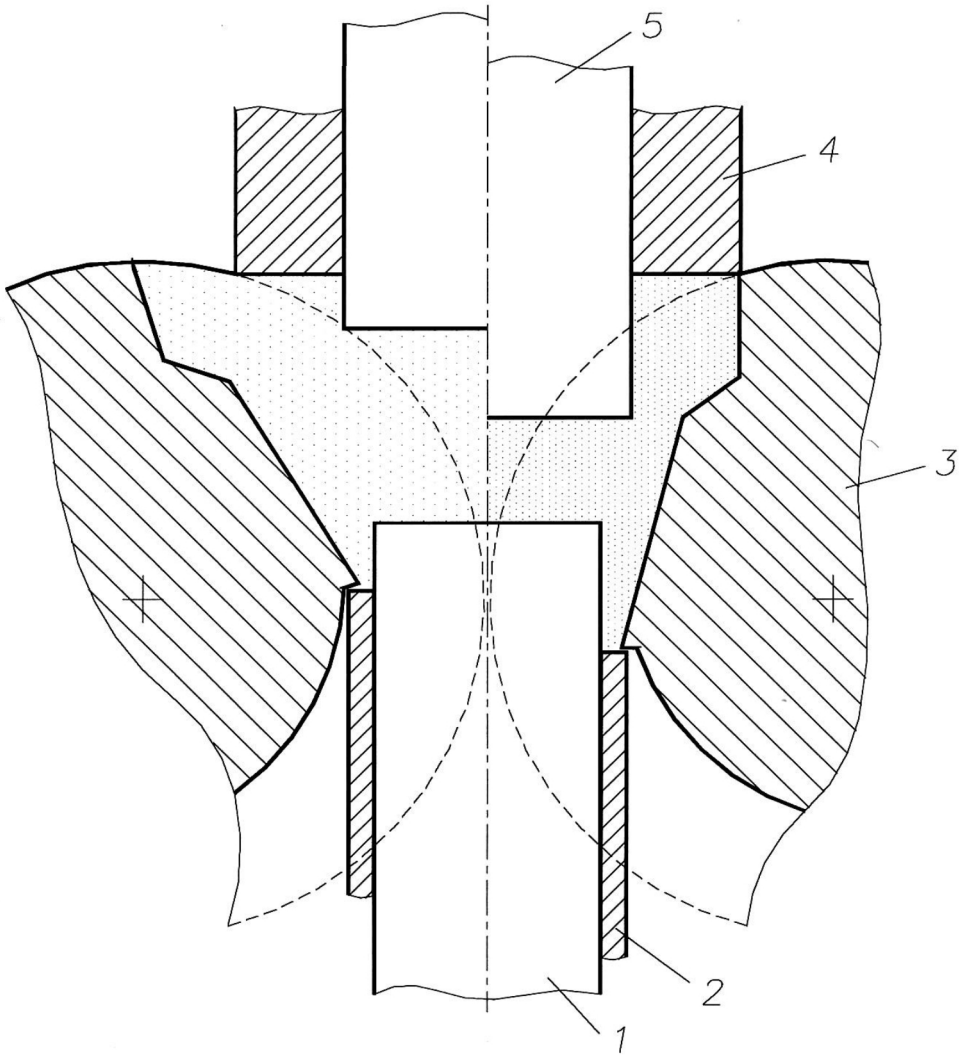


Рисунок 42 - Формование порошковой заготовки в матрице, образованной вальцами

Формование производится одновременно сближающимися пуансоном 5 и оправкой 1 и поворачивающимися вальцами, в которых выполнена полость с заданным профилем. При принудительном повороте вальцев 3 от ползуна пресса объем этой полости уменьшается, и происходит формование порошковой детали. В рассматриваемом способе привод вальцов может быть осуществлен аналогично описанному в разделе 1. Втулочный пуансон 2 формует нижний торец детали, а втулочный пуансон 4 – верхний торец.

Формование высокоплотных деталей со сдвигом частиц может проводиться на прессах для выдавливания с активными силами контактного трения, конструкция которых представлена на рис. 10, 12, 13, 16.

Формование осевым сжатием с одновременным созданием в заготовке сдвигов слоев материала осуществляется на этих прессах по схеме, приведенной на рис. 27.

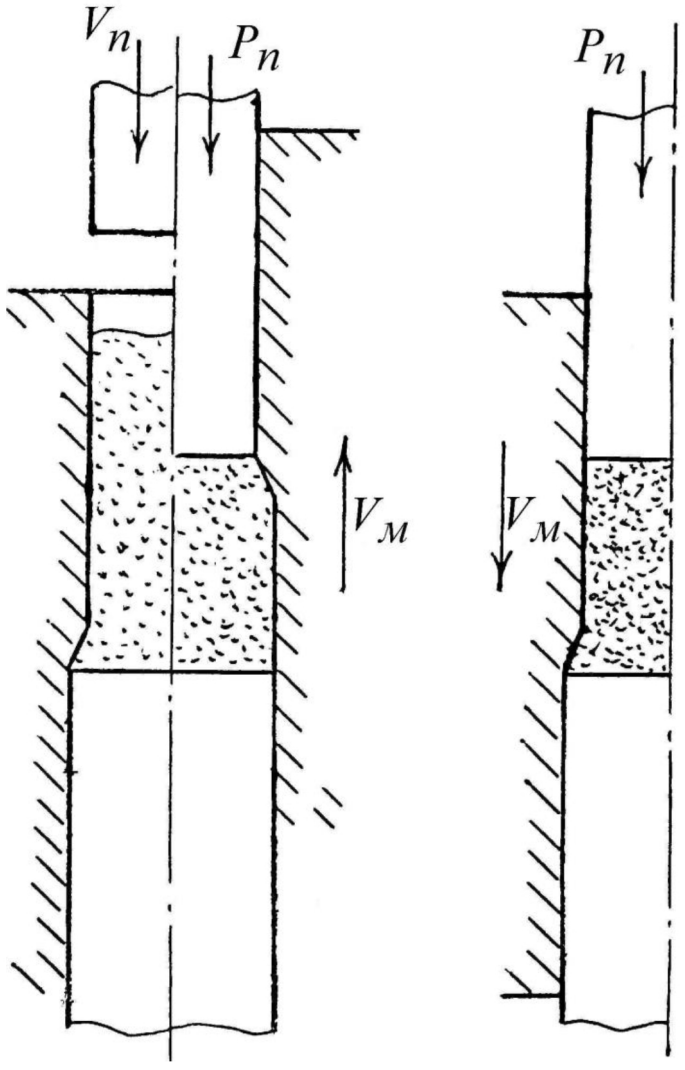


Рисунок 43 - Схема формования порошковой заготовки осевым сжатием с созданием сдвигов слоев материала

На первом этапе (рис. 27, *а*) осуществляется уплотнение порошка движением пуансона со скоростью $v_п$ с одновременной раздачей заготовки путем перемещения матрицы, имеющей ступенчатую рабочую полость, навстречу пуансону со скоростью $v_м$.

При раздаче создаются сдвиги слоев материала заготовки. На втором этапе (рис. 27, *б*) осуществляется обжим брикета по боковой поверхности перемещением матрицы со скоростью $v_м$ при воздействии силой $P_п$ со стороны верхнего пуансона.

При этом создаются дополнительные сдвиги слоев материала заготовки. При формовании по таким схемам достигается средняя плотность формованных деталей 90 % и выше.

Конструкция наиболее компактного и многофункционального из прессов для рассмотренных технологий схематично изображена на рис. 28.

Этот пресс, кроме холодного выдавливания с активными силами трения, предназначен для формования высокоплотных стаканов из железного порошка. В прессе главный гидроцилиндр *1* является одновременно станиной. Главный гидроцилиндр содержит два поршня: *2* и *9*. Шток *3* поршня *2* является гильзой вспомогательного гидроцилиндра с поршнем *4* и штоком *5*, на котором установлен пуансон *7*, второй пуансон *6* установлен на штоке *3*.

Поршень *9* неподвижно соединен с матрицедержателем *8*, в котором находится матрица *10*. Третий пуансон *11* (контрпуансон) установлен на станине *1*.

Пресс работает следующим образом. В матрицу *10* засыпают металлический порошок, смешанный с пластификатором. Подачей жидкости в рабочие полости гидроцилиндров инструменты отводят в положение, при котором торец пуансона *6* находится выше торца пуансона *7* и является оправкой, формующей полость в заготовке. Матрица находится в нижнем положении (рис. 8 – правая половина).

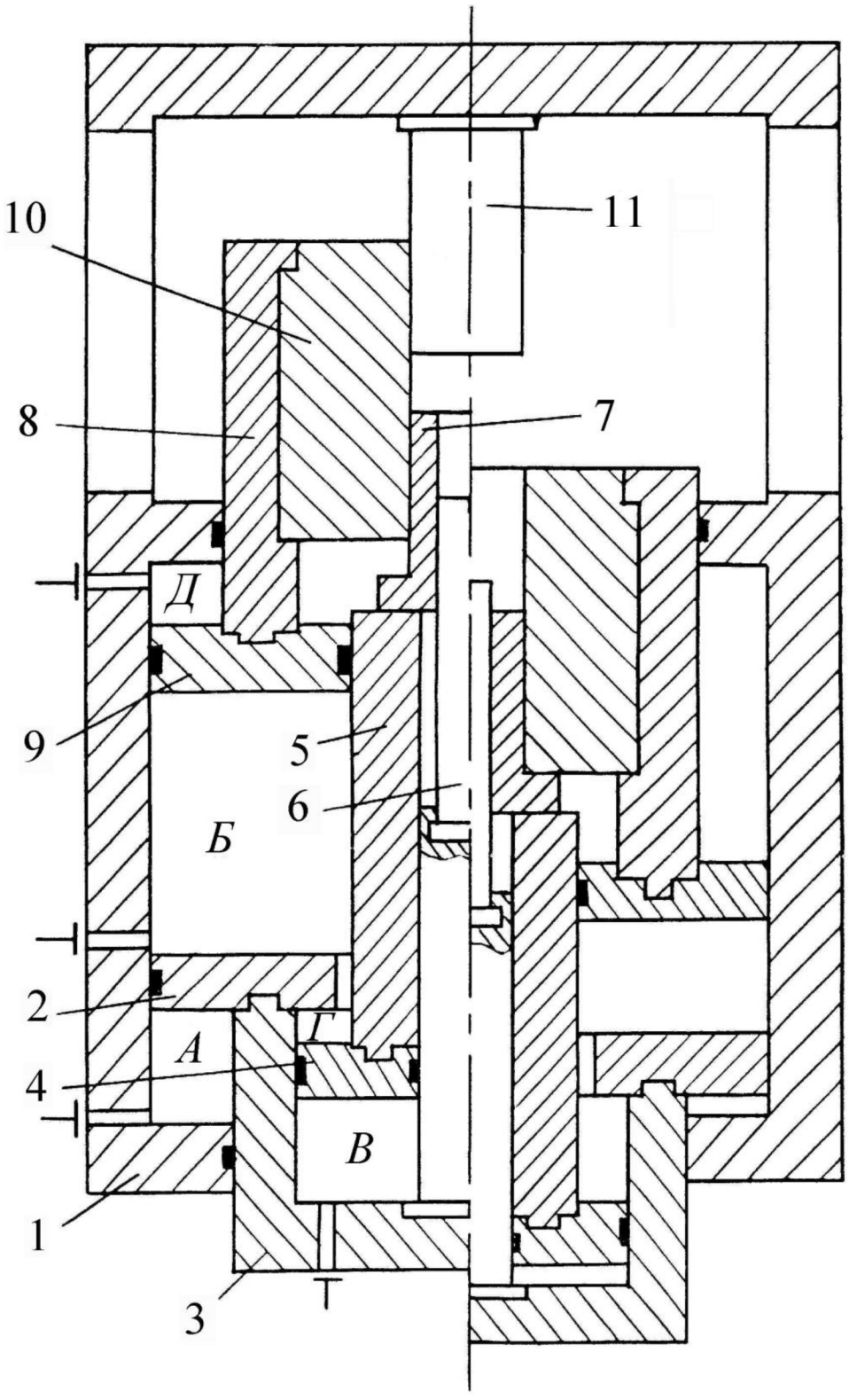


Рисунок 44 - Компактный многофункциональный гидропресс

При рабочем ходе вначале подается жидкость в полость *Б*, при этом полость *Д* соединяется со сливом, а входы в полости *А* и В закрыты. Матрица *10* поднимается, и пуансон *11* закрывает ее горловину. Затем подают рабочую жидкость в полость *В*, при этом полость *Б* соединяют со сливом. Входы в полости *А* и *Д* закрыты. Пуансон *7* поднимается и уплотняет стенку формуемого стакана. После окончания уплотнения стенки подают рабочую жидкость в полость *Д*, при этом полость *Б* соединяют со сливом, а входы в полости *А* и *В* закрыты. При этом матрица перемещается вниз и активными силами контактного трения дополнительно уплотняет стенку формуемого стакана. Затем подают рабочую жидкость в полость *А* при соединенной со сливом полости *Б* и закрытых входах в полости *В* и *Д*. При этом пуансоны *6* и *7* калибруют дно стакана.

После окончания формования последовательной подачей жидкости в одну из полостей каждого гидроцилиндра при соединении другой со сливом и одновременном перекрытии входов в оставшиеся две полости производят раскрытие штампа и извлечение изделия.

Преимуществом этого пресса является его работа от одного насоса. В конструкциях, показанных на рис. 10, 12, 13, 16, малые габариты прессов недостаточно ощущаются из-за массивных гидроприводов (см. рис. 14).

Таким образом, современные технологические процессы производства высококачественных деталей из металлических порошков обеспечены прессовым оборудованием, производимым отечественными и зарубежными предприятиями.

Схема формования стакана с созданием сдвигов в материале заготовки на гидропрессах рассматриваемого типа выглядит следующим образом (рис. 29).

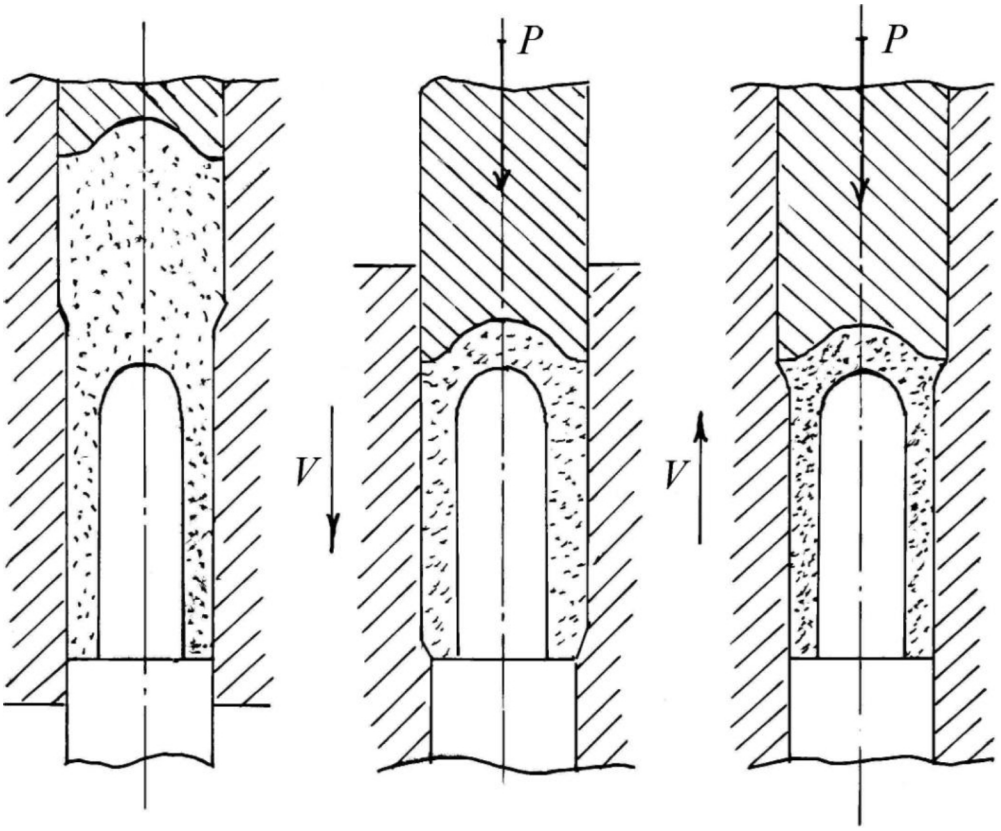


Рисунок 45 - Схема формования стаканов с созданием интенсивных сдвигов в материале порошковой заготовки

Стаканы изготавливают с фланцем, который является технологическим припуском. Матрица имеет полость, состоящую из участков двух диаметров: диаметр одного участка равен диаметру внешней поверхности стакана, а диаметр другого – диаметру фланца стакана. На первом этапе формования матрица перемещается вниз (рис. 29, *а*), при этом засыпную полость образует участок большего диаметра, а силы трения на поверхности контакта порошка с матрицей способствуют заполнению полости матрицы. После окончания засыпки порошка и предварительного его уплотнения верхним пуансоном осуществляется движение матрицы вверх (рис. 29, *б*), при этом сформованный на первом этапе стакан перемещается в участок полости

матицы меньшего диаметра. В результате происходит дополнительное уплотнение стенок стакана (рис. 29, *в*). На донную часть заготовки постоянно действует сила, создаваемая верхним пуансоном.

Ниже приведены фотографии (рис. 30, 31) некоторых деталей, изготовленных на созданных описанных выше прессах с использованием описанных схем деформирования.



Рисунок 46 - Порошковые втулки с тонкой стенкой из ПЖВ2.160.28



Рисунок - Порошковые втулки со ступенчатой фланцевой частью из ПЖРВ3.160.24

2.3.3 Производство нанопорошковых заготовок

Среди сформулированных Правительством РФ приоритетных направлений развития науки на ближайшие годы ведущее место занимают наноматериалы и нанотехнологии. Это направление, интенсивно развивающееся в мировой науке и практике в последнее десятилетие и часто называемое технологией XX1 века, не является абсолютно новым для обработчиков давлением. Мы, в отличие от физиков, мтериаловедов и представителей других научных направлений, технически подготовлены к производству наноматериалов в промышленном масштабе.

Приставка "нано" означает - одна миллиардная часть (1 нанометр (нм) = 10^{-9} м). Под термином "нанотехнология" понимают создание и использование материалов, структура которых регулируется в нанометровом масштабе, т.е. в диапазоне размеров атомов и молекул.

Исследования последних лет продемонстрировали важную роль наноструктур в различных областях науки и техники. Характерные размеры элементов структуры нанообъектов лежат в диапазоне 10^{-9} - 10^{-7} м, соответствующем средним размерам атомов и молекул в обычных материалах. Нанотехнологический подход означает целенаправленное регулирование свойств объектов на молекулярном уровне. Придавая материалам и системам принципиально новые качества, нанотехнология может обеспечить прогресс практически во всех существующих областях деятельности.

Наночастицами считают такие, у которых доля поверхностных атомов превышает 10% от их общего количества. Поверхность является "стоком" большинства дефектов кристаллической структуры почти бесконечной емкости. В результате выхода дефектов на поверхность структура внутри зерен приближается к классической структуре монокристалла.

Формирование нанокристаллических структур позволяет получать конструкционные материалы с уникально высокими свойствами. Например, их микротвердость в 2-7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов, причем это не зависит от метода получения материала. Прочность нанокристаллических материалов при растяжении в 1,5-2 раза выше, чем у крупнозернистых аналогов. Для больших зерен рост прочности и твердости при уменьшении их размера обусловлен введением дополнительных границ зерен, которые являются препятствиями для движения дислокаций. При малых наноразмерных зернах рост прочности происходит благодаря низкой плотности имеющихся дислокаций и трудности образования новых.

Для керамических нанокристаллических материалов обнаружена повышенная пластичность при низких температурах, ее можно использовать

в промышленных процессах экструзии и прокатки. Для всех наноматериалов имеет место увеличение теплоемкости с уменьшением размера зерна, но наибольший ее прирост наблюдается для наноматериалов, полученных формованием порошков. Коэффициент объемного термического расширения увеличивается с уменьшением размера зерна. Коэффициент граничной диффузии в наноматериалах значительно выше, чем в крупнозернистых, что позволяет легировать их нерастворимыми или слаборастворимыми при обычных условиях элементами за счет более развитой зеренной структуры.

Развитие науки о наноматериалах и нанотехнологиях произошло таким образом, что первыми о разработке этой проблемы сообщили физики и материаловеды.

Физики пошли по пути конструирования новых материалов, совершенствования их структуры и свойств, создания наноматериалов и наносистем на основе молекулярной архитектуры, что неразрывно связано с применением адекватных (атомного разрешения) диагностических средств. Рентгеновские методы сыграли ключевую роль в развитии современной науки о материалах. Однако применение рентгеновского излучения для анализа наноматериалов и наноструктур связано с решением ряда сложных задач в области физики рассеяния рентгеновских лучей. В настоящее время эти проблемы находятся в стадии их успешного решения.

Что касается металловедов, то в их работах по технологии наноматериалов ключевую позицию заняли методы интенсивной пластической деформации (ИПД). При этом они "открыли" способы равноканального углового (РКУ) прессования и уплотнения заготовки пуансоном, совершающим одновременно поступательное и вращательное движения. Во-первых, не можем не отметить, что эти методы были открыты специалистами в области обработки давлением на десятилетия раньше. Во-вторых, у обработчиков давлением создано и работает в промышленности оборудование для реализации этих методов.

Многие "старые" научно-технические направления вливаются в современное понятие нанотехнологии. Такие методы получения консолидированных наноструктурных материалов, как порошковая технология, консолидируемая кристаллизация из аморфного состояния, ИПД и технология нанесения наноструктурных покрытий и пленок также относятся к нанотехнологии.

Многие технические решения в «доперестроичный» период развития отечественной науки не опубликованы широко, поскольку они имели оборонное предназначение. Поэтому до настоящего времени для получения наноматериалов не нашла применения и достаточного литературного освещения схема, приведенная на рис. 13. Эта схема имеет существенные преимущества по сравнению с вновь "открытыми" материаловедами схемами ИПД: равноканальным угловым прессованием и уплотнением заготовки пуансоном, совершающим одновременно поступательное и вращательное движения. Основное преимущество - возможность создания простого и надежного прессового оборудования.

Такое оборудование создано и описано выше в настоящем издании.

Заключение

Разработан метод направленного изменения толщины заготовки благодаря комплексной увязке теоретических и технологических решений и по своей сути относится к вариационной задаче, так как базируется на минимизации функционала, обеспечивающего наилучшее равномерное приближение технологически возможной толщины штампованной детали к заданной.

Варьирование производится по технологическим параметрам, в качестве которых используются: толщина плоской заготовки, граничные условия, геометрия штамповой оснастки, механические свойства материала заготовки в рамках выбранной модели формообразования, основанной на использовании традиционных операций листовой штамповки (вытяжка, обжим, отбортовка, протяжка, осадка).

Эффективность технологических решений в значительной степени обусловлена разработанными новыми способами формообразования, устройствами, которые защищены авторскими свидетельствами, нашедшие применение в промышленности.

Установлено, что заданную толщину штампованной детали определяют её эксплуатационные характеристики, минимальная трудоемкость процесса штамповки, требования с позиций организации производства.

Разработаны методы определения заданной толщины для штампованной детали по геометрическим размерам механически обработанной детали. Заданные размеры по толщине определены с учетом необходимых требований, предъявляемых к штампованным деталям: гладкости образующей срединной поверхности, возможности беспрепятственного удаления детали из штампа.

Аналитические зависимости для определения толщины штампованной детали получены на основе кинематических и статических решений. Для них,

как показали расчеты, наиболее рациональным является использование приближенных последовательных методов, основанных на разложении решения в степенной ряд и представлении решения в виде кусочно-линейной функции. В качестве нулевого решения используется соотношение средних толщин детали и заготовки, найденное из оценочных решений и близкое к единице.

Установлено, что оптимальной степенью функции толщины является многочлен второго порядка. Он положен в основу классификации деталей по заданной толщине.

Разработанные в настоящее время способы штамповки позволяют решить проблему получения толщины штампованной детали близкой к заданной толщине даже при разнотолщинности, достигающей 40–50%.

Список использованных источников

1 Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 478 с.

2 Ковка и штамповка. Справочник. Т. 4. Листовая штамповка, под ред. А.Д. Матвеева. - М.: Машиностроение, 1987. – 543 с.

3 Коллатц Л., Кробс. В. Теория приближений. Чебышевские приближения.-М.:Наука, 1978.-271с.

4 Румшинский Л.З.. Математическая обработка результатов эксперимента.-М: Наука, 1971.-192с.

5 Бахвалов И.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.. Численные методы. – М.: Наука, 1987. - 598 с.

6 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.

7 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.

8 А.с. 550200 СССР, МКИ В21Д 22/26. Способ изготовления штампованных днищ с отборотованными наружу люками // В.П. Чистяков, И.П. Попов, Л.С. Токмак (СССР). - Опубл. 15.03.77, Бюл. № 10.

9 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.

10 Мельников Э.Л., Холодная штамповка днищ. - М.: Машиностроение. 1976. – 183 с.

11 Попов И.П., Маслов В.Д.. Использование метода возмущения при определении технологических параметров штамповки авиа-ционных деталей // Известия вузов. Авиационная техника.-1985.- № 4. - С.93-96.

12 Гречников Ф.В.. Деформирование анизотропных материалов. -М.: Машиностроение, 1998. – 445 с.