

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

**Расчёт технологических параметров инновационных процессов
деформирования, основанных на процессах формовки
тонкостенных осесимметричных деталей усеченной
сужающейся формы**

Электронные методические указания
к практическим работам

САМАРА
2012

Авторы-составители: **Попов Игорь Петрович**
Демьяненко Елена Геннадьевна

Расчёт технологических параметров инновационных процессов деформирования, основанных на процессах формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к практич. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (0,97 Мбайт); авт.-сост. И. П. Попов, Е. Г. Демьяненко. - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Приведены задания по расчёту технологических параметров новых способов деформирования, основанных на процессах формовки и совмещённых с процессом отбортовки, вытяжки для тонкостенных осесимметричных конических деталей. Для каждого способа приведены примеры решения задач.

Указания предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Инновационные технологии получения и обработки материалов с заданными свойствами» по направлению 150400.68 «Металлургия» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Технологии и оборудование инновационных процессов деформирования» в В семестре.

Подготовлены на кафедре обработки металлов давлением.

Содержание

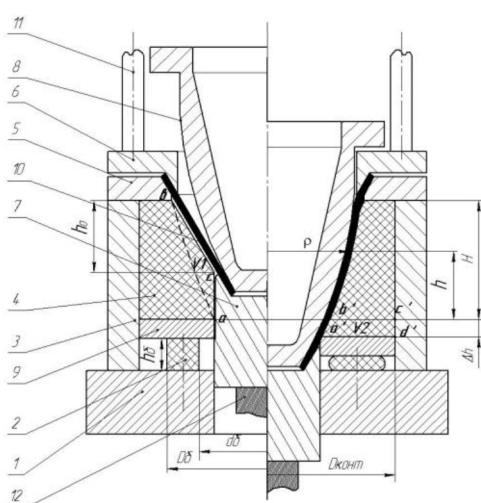
Основные условные обозначения	4
1 Способ формовки с применением давления по наружной поверхности заготовки от эластичного элемента с условием минимальной разнотолщинности детали.....	5
1.1 Определить размеры плоской заготовки для усечённой конической оболочки	8
1.2 Определить размеры плоской заготовки для выпуклой усечённой сужающейся детали с постоянной толщиной стенки.....	9
1.3 Определить усилие формовки по схеме.....	11
2 Способ формовки, совмещённый с вытяжкой.....	13
2.1 Установить возможность получения цельноштампованной конической оболочки способом формовки с вытяжкой.....	14
2.2 Определить усилие прижима заготовки по данным деталей.....	15
2.3 Определить усилие способа формовки-вытяжки.....	15
3 Способ формовки с применением эластичного пуансона и разъёмных секторов.....	16
3.1 Определить давление эластичной среды.....	20

Основные условные обозначения

R - радиус большего основания детали, мм;
 r - радиус меньшего основания детали, мм;
 D - диаметр большего основания детали, мм;
 d - диаметр меньшего основания детали, мм;
 $S_{зад}$ - заданная толщина детали, мм;
 S_T - технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки, мм;
 $\alpha_{заг}$ - угол конусности заготовки, град;
 $\alpha_{дет}$ - угол конусности полученной детали, град;
 $V_{заг}, V_{дет}$ - объем заготовки, детали, мм³;
 $F_{заг}, F_{дет}$ - площадь заготовки, площадь детали, мм²;
 $S_{заг}, S_{дет}$ - толщина заготовки, толщина детали, мм;
 e_i - интенсивность деформаций;
 P - модуль упругости;
 σ_s - напряжение текучести, МПа;
 σ_{T_0} - экстраполированный предел текучести, МПа;
 k - коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента, 1/мм;
 σ_θ - предел прочности, МПа;
 σ_ρ - напряжения в меридиональном направлении, МПа;
 σ_θ - напряжения в тангенциальном направлении, МПа;
 f - коэффициент трения между поверхностями матрицы и заготовки;
 μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;
 R_ρ - радиус детали в меридиональном направлении, мм;
 R_θ - радиус детали в тангенциальном направлении, мм;
 q - давление, создаваемое эластичным элементом, МПа;
 e_s - деформация по толщине;
 e_ρ - деформация в меридиональном направлении;
 e_θ - деформация в тангенциальном направлении;
 b - коэффициент утонения материала;
 n, A - показатели механических свойств материала;
 $\sigma_{ш}$ - напряжения в момент появления шейки, МПа;
 d_3 - диаметр меньшего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм;
 D_3 - диаметр большего основания заготовки с учетом припуска под зажимы, мм.

1 Способ формовки с применением давления по наружной поверхности заготовки от эластичного элемента с условием минимальной разнотолщинности детали

На рисунках 1.1 и 1.2 показаны устройства для промышленного производства соответственно выпуклых и вогнутых тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы (слева от оси в открытом, а справа от оси в закрытом положении).



1 - плита штампа; 2 - эластичный буфер; 3 - контейнер; 4 - эластичный элемент; 5 - матрица; 6 - прижим; 7 - выталкиватель; 8 - пуансон; 9 - подкладная плита; 10 - заготовка; 11 - шпилька прижимного устройства; 12 - шпилька буферного устройства

Рисунок 1.1 - Схема устройства для формообразования выпуклых тонкостенных деталей

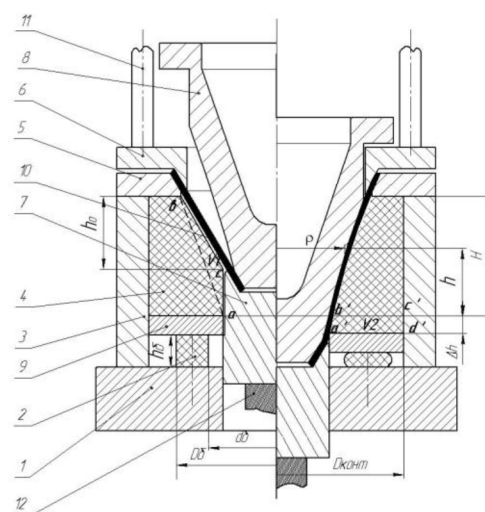


Рисунок 1.2 - Схема устройства для формообразования вогнутых тонкостенных деталей

Устройство, содержащее пуансон 8, контейнер 3, прижим 6, выталкиватель 7, матрицу 5, согласно модели, снабжено плитой штампа 1, на которую установлен контейнер 3, внутри него на плите штампа расположен эластичный элемент 4, размещённый на подкладной плите. Давление эластичным элементом создается с помощью подкладной плиты, усилие подпора которой определяется с помощью буферного устройства (либо прессы, либо штампа, что определяется необходимостью промышленного

производства или эксперимента). Эластичный элемент выполнен в виде кольца прямоугольного сечения высотой H , которая больше на 5-10% рабочей части поверхности пуансона, со срезанной со стороны пуансона частью в виде конического сечения с углом конусности равным углу конусности заготовки. Большой диаметр эластичного элемента равен внутреннему диаметру матрицы, а меньший диаметр равен диаметру выталкивателя. Заготовка, в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 5, а прилегающие к торцу меньшего основания, на выталкиватель 7. Затем заготовка зажимается по внутренним поверхностям к матрице 5 прижимом 6, а к выталкивателю 7 пуансоном 8. Инструмент, где происходит зажим заготовки, выполнен с рабочими поверхностями, имеющими конусность, совпадающей с конусностью заготовки. Такая геометрия позволяет надёжно закрепить заготовку до момента пластического деформирования. Пуансон перемещается вниз, вытесняя часть объёма эластичного элемента V_1 , который перемещает подкладную плиту 9 вниз. Давление, которое создается внутри эластичного элемента, определяется усилием подпора буферного устройства пресса. Происходит пластическая деформация заготовки в условиях плоского растяжения и значительных активных сил трения, между пуансоном и заготовкой. Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности пуансона, формирующей размеры готовой детали, и ограничен величиной утонения заготовки в зоне опасного сечения наименьшего диаметра. На поверхности контакта эластичного элемента и заготовки действуют реактивные силы трения, так как перемещение эластичного элемента отстаёт от заготовки. Создание активных сил трения на рассматриваемой поверхности, когда перемещение эластичного элемента опережает перемещение заготовки, возможно при относительно малых объёмах эластичного элемента. Однако при этом, отношение вытесненного объёма V_1 к объёму всего эластичного элемента превышает допустимый

предел его деформирования: 25-30%. На поверхности контакта пуансона и заготовки действуют активные силы трения, которые перераспределяют напряжения в меридиональном направлении σ_r , уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра. Создав их преобладающее влияние, возможно, получить минимальную разнотолщинность, используя аналитическую зависимость для осесимметричной детали:

$$\int_l (S_T - S_{зад})^2 dl \rightarrow \min ,$$

где l - длина образующей детали.

Выражение (1.1) является функционалом. Он требует приближение технологически возможной толщины S_T к заданной толщине детали $S_{зад}$ при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин. Выполнение условия (1.1), дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысить эксплуатационные характеристики детали, что доказано в работах.

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. Для нашего случая $S_{зад} = S_{дем} = const$.

1.1 Определить размеры плоской заготовки для усечённой конической оболочки

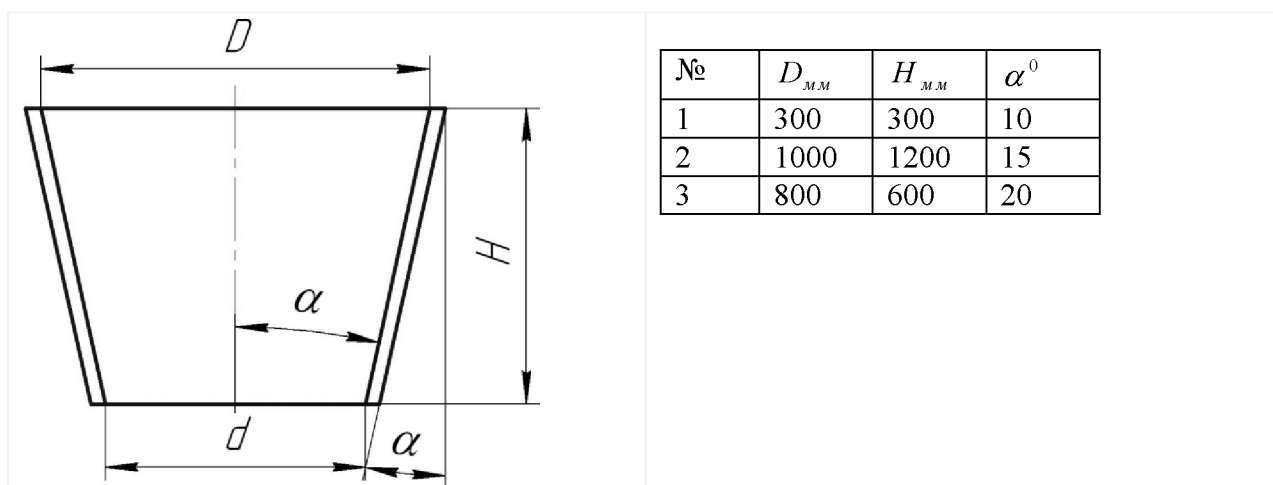


Рисунок 1.3

Чтобы получить коническую оболочку после свёртки плоской заготовки, последняя должна иметь форму, у которой неизвестны R , r , Q . Для их нахождения составим 3 уравнения:

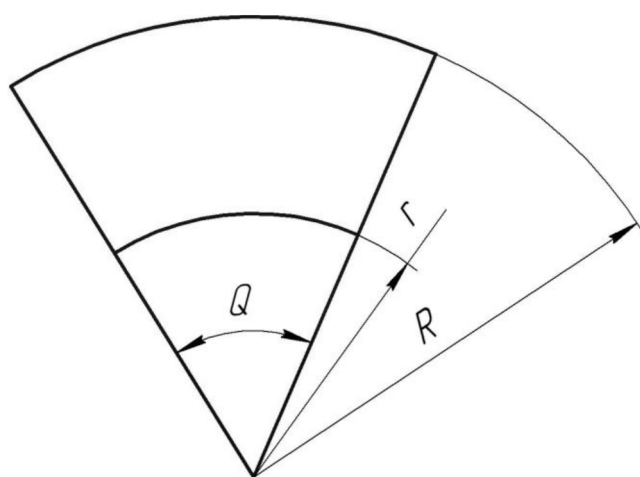


Рисунок 1.4

$$RQ = \pi D, \quad (1.1)$$

$$rQ = \pi d, \quad (1.2)$$

$$R - r = \frac{D - d}{2} / \cos \alpha. \quad (1.3)$$

Далее:

$$\pi \frac{D - d}{2} = \frac{D - d}{2} / \cos \alpha. \quad (1.4)$$

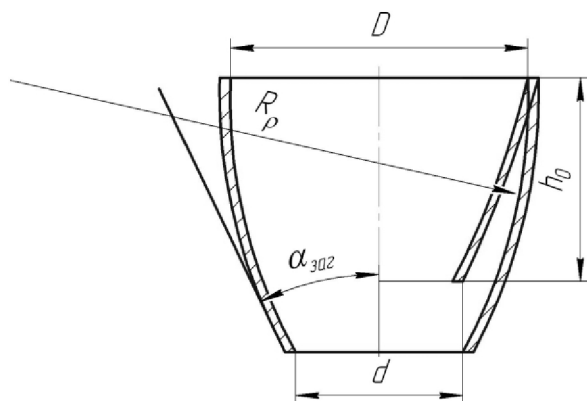
Из 1.4 находим Q :

$$Q = 2\pi \cos \alpha. \quad (1.5)$$

Далее:

$$R = \pi \frac{D}{Q}; r = \pi \frac{d}{Q}. \quad (1.6)$$

1.2 Определить размеры плоской заготовки для выпуклой усечённой сужающейся детали с постоянной толщиной стенки



№	$D_{\text{мм}}$	$d_{\text{мм}}$	α^0	$R_{\rho_{\text{мм}}}$	$S_{\text{дет}_{\text{мм}}}$
1.	800	400	15	3500	1
2.	900	500	10	4000	1,5
3.	1000	600	8	4000	2

Рисунок 1.5

В первую очередь определяется угол конусности исходной заготовки. Он равен углу наклона, образованного касательной, проведённой к кромке детали у меньшего основания (рисунок 1.5). Высота конусной заготовки:

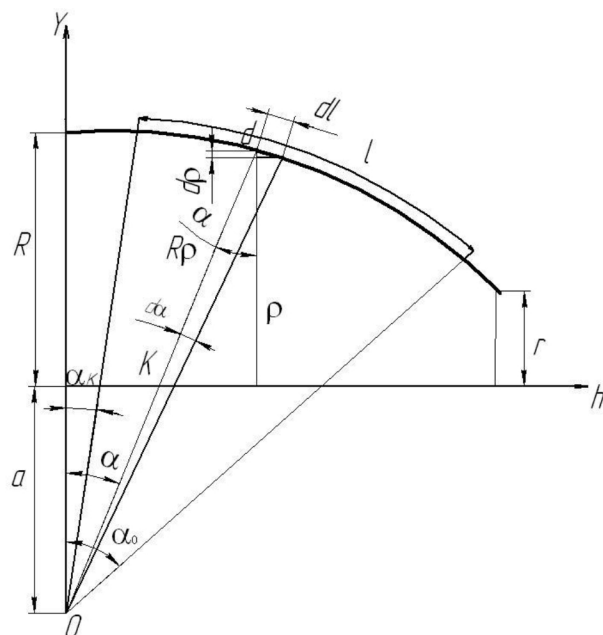
$$h_0 = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) / \operatorname{tg} \alpha_{\text{заг}}. \quad (1.7)$$

Сама же толщина определяется из условия постоянства объёма заготовки и детали:

$$\begin{aligned} V_{\text{заг}} &= V_{\text{дет}}, \\ F_{\text{дет}} S_{\text{дет}} &= F_{\text{заг}} S_{\text{заг}}, \\ S_{\text{заг}} &= \frac{F_{\text{дет}} S_{\text{дет}}}{F_{\text{заг}}}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

где $F_{\text{дет}}$ - площадь детали по срединной поверхности.

Выделим элементарный участок, определенный размерами $dl, d\rho, d\alpha$ (рисунок 1.6) и найдем площадь детали.



R_p - радиус детали в меридиональном направлении; Kd - радиус в тангенциальном направлении; α_0 - угол, образованный радиусом R_p , проведенным к кромке детали меньшего основания и осью, проведенной из центра радиуса R_p и перпендикулярной оси симметрии детали; α_k - угол, образованный радиусом R_p , проведенным к кромке детали большего основания и осью, проведенной из центра радиуса R_p и перпендикулярной оси симметрии детали; α - угол, образованный радиусом R_p , проведенным к кромке (со стороны большего основания) элементарного участка и осью, проведенной из центра радиуса R_p и перпендикулярной оси симметрии детали; R - радиус большего основания детали; r - радиус меньшего основания детали; $dl, d\rho, d\alpha$ - размеры элементарного участка; a - расстояние от центра радиуса R_p до оси симметрии; l - участок с длиной образующей, где происходит непосредственный контакт пуансона с заготовкой

Рисунок 1.6 - Геометрическая схема детали выпуклой формы для определения площади детали

Из геометрии видно:

$$R_\rho = a + R = Od = const,$$

$$Kd = R_\rho - OK = R_\rho - \frac{a}{\cos \alpha},$$

$$\rho = (Kd) \cos \alpha = \left(R_\rho - \frac{a}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = R_\rho \cos \alpha - a, \quad (1.9)$$

$$dl = R_\rho d\alpha. \quad (1.10)$$

С учетом полученных соотношений:

$$F_{\partial em} = 2\pi R_\rho |R_\rho (\sin \alpha_0 - \sin \alpha_\kappa) - a \cdot (\alpha_\rho - \alpha_\kappa)|. \quad (1.11)$$

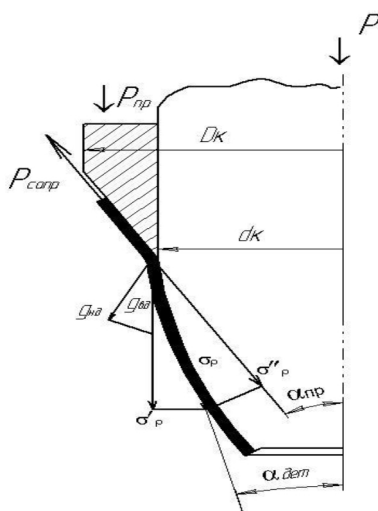
Площадь заготовки определяется согласно рисунку (см. рисунок 3.3):

$$F_{3a2} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4 \sin \alpha_{3a2}}. \quad (1.12)$$

По найденным значениям конической усечённой заготовки определяем размеры плоской заготовки (см. 1.1).

1.3 Определить усилие формовки по схеме

Рассмотрим схему действия сил на верхнем прижиме (рисунок 1.7).



P - усилие процесса формовки; $P_{сomp}$ - усилие сопротивления от прижима; P_{np} - усилие прижима; $\alpha_{дет}$ - угол, образованный касательной, проведенный к образующей детали большего основания и осью симметрии детали; σ'_ρ - вертикальная составляющая напряжения в меридиональном направлении; σ''_ρ - напряжение, определяющее величину тянущего усилия из зажимов заготовки; α_{np} - угол конусности заготовки; $g_{нд}$ - нормальная составляющая от давления прижима; $g_{вд}$ - вертикальная составляющая от давления прижима; D_k - больший диаметр конуса; d_k - меньший диаметр конуса

Рисунок 1.7 - Схема действия сил на верхнем прижиме

Усилие процесса формовки деталей определяется:

$$P = \sigma_\rho^l \pi D S_{\rho em}, \quad (1.13)$$

где D - диаметр большого основания детали.

Вертикальная составляющая напряжения в меридиональном направлении равна:

$$\sigma_{\rho}' = \sigma_{\rho} \cos \alpha_{\text{дет}}, \quad (1.14)$$

где σ_{ρ} - вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_{\rho}^* \frac{1 + B \left(R_{\rho} k \left(1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1 + Ax}. \quad (1.15)$$

где

$$A = 1 - \mu - f\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha,$$

$$B = \frac{r' \cdot f}{\sin \alpha},$$

$$x = \left(\frac{\rho'}{r'} - 1 \right),$$

$$\sigma_{\rho}^* = \frac{\sigma_{T_o}}{\sqrt{1 - \mu^2}} + \frac{\Pi}{1 - \mu^2} \left(\frac{S_{\text{заг}} - S_{\text{дет}}}{S_{\text{заг}}} \right), \quad (1.16)$$

где $S_{\text{заг}}$, $S_{\text{дет}}$ - известные значения толщин.

$$k = \frac{(1 - \mu - f\mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \sin \alpha + r' f}{r' \cdot R_{\rho}} \cdot \frac{1}{f - f_1}, \quad (1.17)$$

где $X = \left(\frac{\rho}{r} - 1 \right)$, $\bar{r} = \frac{r}{R_{\rho}}$.

Задаются преподавателем:

σ_{T_o} , Π - показатели механических свойств;

f , f_1 - коэффициенты между заготовкой и пуансоном и заготовкой и эластичным элементом.

μ - коэффициент трансверсальной анизотропии.

Полное усилие составляет на пуансоне:

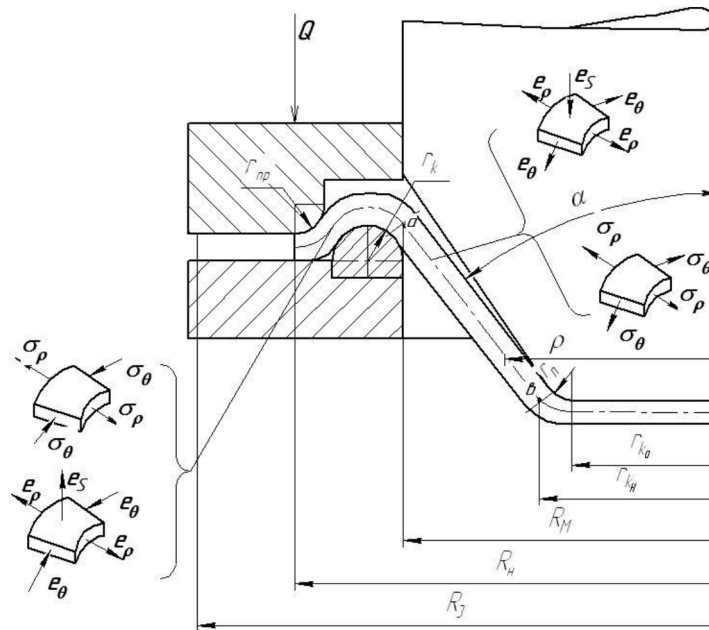
$$P_n = P + P_{\text{эл}}, \quad (1.18)$$

где $P_{\text{эл}}$ - сопротивление от эластичного элемента, которое определяется:

$$P_{эл} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot q, \quad (1.19)$$

$$\text{где } q = K \cdot \sigma_p^* S_{\text{дет}}. \quad (1.20)$$

2 Способ формовки, совмещённый с вытяжкой



1 - пуансон; 2 - заготовка; 3 - прижим; 4 - кольцо; 5 - матрица

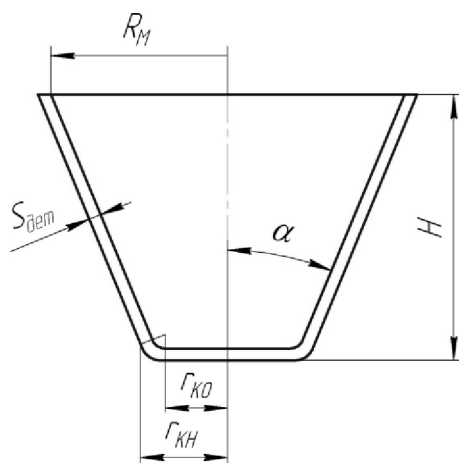
Рисунок 2.1- Схема формовки-вытяжки

Способ формообразования, основанный на процессах формовки и вытяжки, позволяет увеличить относительную высоту детали. Это возможно, когда очаг деформации процесса формовки донного и конического участков снабжается дополнительным материалом со стороны сильно прижатого фланца. Условие формовки и устранение гофр на коническом свободном участке, выполняется, если в точке «а» (в зоне касания заготовки) меридиональные напряжения σ_p будут равны пределу текучести. Тогда тангенциальные напряжения $\sigma_\theta = 0$ (т.е. меняется знак сжатия при вытяжке на знак растяжения при формовке). Это достигается конструктивно: применением перетяжного порога. Такая схема реализует максимальные

напряжения σ_p в точке касания «а» при минимальном значении усилия прижима и минимальных размерах фланца заготовки за счет изгиба трения на пороге, упрочненной и утолщенной заготовки. Важен момент, когда кромка заготовки R_n достигнув радиуса закругления прижима r_{np} , обеспечивает в течение всего процесса вытяжки максимальные напряжения σ_p в точке касания «а», равные пределу текучести, но уже упрочненных элементов. Для этого необходим расчет размеров заготовки.

В этом случае можно считать, что объем фланца заготовки, находящейся между радиусами R_z и R_n , будет дополнительным для формирования конической детали. Благодаря чему появляется возможность увеличения ее высоты. Внимание необходимо обратить на то обстоятельство, чтобы на заключительной стадии (при $\sigma_p - \max$) меридиональные напряжения σ_p в точке касания «а» не превышали некоторого значения предела текучести, во избежании обрыва в донной части заготовки при формовке. Т.е. напряжения в радиусной части пуансона не должны превысить предельного значения - напряжения разрыва.

2.1 Установить возможность получения цельноштампованной конической оболочки способом формовки с вытяжкой



№	R_M , мм	α , град	r_{KO} , мм	r_{KH} , мм	$S_{дет}$, мм	Материал
1.	100	20	50	58	0,5	X18H10T
2.	150	45	90	100	0,5	АД0
3.	800	10	600	610	0,5	Л62

Рисунок 2.2

Высота детали равна:

$$H = \frac{R_M - r_{cp}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.1)$$

где $r_{cp} = \frac{(r_{\kappa_n} + r_{\kappa_0})}{2}$;

$$\alpha = \arcsin \left\{ \frac{0,5[R_M^2 - 0,25(r_{\kappa_0} + r_{\kappa_n})^2]S_{\partial em}}{(R_n^2 + R_3^2 - R_M^2)S_{3az} - 0,25S_{\partial em}(r_{\kappa_0} + r_{\kappa_n})^2} \right\}, \quad (2.2)$$

где

$$R_n = R_M + 3r_{np}, \quad S_{3az} = \frac{S_{\partial em}}{1 + \delta_\rho} \quad (2.3)$$

$$R_3 = \frac{R_n}{1 - \bar{X}}, \quad (2.4)$$

где

$$\bar{X} = \exp[f(\alpha - 1,5\pi)] - \frac{\sigma_{T_0}}{\Pi} \quad (2.5)$$

Значения показателей механических свойств линейной кривой упрочнения ищем по известным зависимостям. Используя кривую упрочнения 1 рода, примем $\sigma_{T_0} / \Pi = 1$.

2.2 Определить усилие прижима заготовки по данным деталей

(см. рисунок 2.1).

$$Q = \frac{2\pi R_3 S_3}{f} \left[\left(e^{-f(\pi - \alpha)} - \frac{1}{2\bar{r}_\kappa + 1} \right) e^{-0,5\pi f} - \ln|K_\epsilon| + \bar{X} - \frac{1}{2\bar{r}_{np} + 1} \right], \quad (2.6)$$

где $\bar{r}_\kappa = \frac{r_\kappa}{S_{3az}}$; $\bar{r}_{np} = \frac{r_{np}}{S_{3az}}$; $K_\epsilon = \ln \left| \frac{R_3}{R_M} \right|$.

2.3 Определить усилие способа формовки-вытяжки

$$P_\phi = 2\pi R_M S_{\partial em} \cos \sigma_{\rho\alpha}, \quad (2.7)$$

где

$$\sigma_{\rho_a} = \beta(\sigma_{T_0} + \Pi X) \left\{ \left[\ln|K_\theta| - X + \frac{1}{2\bar{r}_{np} + 1} + \frac{Q \cdot f}{\pi S_{заг} R_3} \right] e^{0,5 f \pi} + \frac{1}{2\bar{r}_\kappa + 1} \right\} e^{f \pi}, \quad (2.8)$$

σ_{T_0} , Π - показатели упрочнения линейной функции;

$K_\theta = \ln \left| \frac{R_3}{R_m} \right|$ - коэффициент вытяжки;

R_m - радиус отверстия в матрице;

$\bar{r}_{np} = \frac{r_{np}}{S_{заг}}$ - относительный радиус скругления на кольце;

$\bar{r}_\kappa = \frac{r_\kappa}{S_{заг}}$ - относительный радиус перетяжного порога;

f - коэффициент трения;

α - угол конусности детали;

Q - усилие прижима;

R_3 - радиус заготовки (принято условие, что от трения под прижимом дополнительное напряжение постоянно);

$S_{заг}$ - толщина заготовки;

$X = \frac{R_3 - R_n}{R_3}$ - относительное перемещение кромки;

R_n - радиус кромки заготовки на заключительной стадии.

Для трансверсальной анизотропии приведённый коэффициент Лоде равен:

$$\beta = 0,5 \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+\mu}} + \frac{\sqrt{1-\mu}}{\sqrt{1+3\mu+2\mu^2}} \right). \quad (2.9)$$

3 Способ формовки с применением эластичного пуансона и разъёмных секторов

Способ реализуется с помощью устройства, схема которого представлена на рисунке 3.1

Оно состоит из пуансона 1, жестко соединенного с матрицей 2, эластичного элемента 3 в виде конической оболочки, раздвижных секторов 4,

конуса с направляющими пазами 5, опорного кольца 6, шпилек 7, установленных в плиту пресса 8. Устройство работает следующим образом. Опорное кольцо 6 поднято вверх. Пуансон с матрицей отведены кверху на высоту, обеспечивающую установку заготовки 10. Раздвижные секторы 4 подняты вверх вместе с эластичным элементом 3. В этом положении устанавливают конусную заготовку сверху на эластичный элемент. Далее опускается пуансон с матрицей до упора на опорное кольцо 6. При этом рабочие поверхности в элементах наибольшего и наименьшего диаметров касаются эластичного элемента. Рабочая поверхность матрицы h_m по высоте меньше высоты заготовки h_z , а высота эластичного элемента h_e равна высоте матрицы h . При движении пуансона вниз вместе с ним опускается и матрица 2, преодолевая сопротивление опорного кольца 6, раздвижных секторов 4 и эластичного элемента 3 вместе с заготовкой 10. Секторы, опускаясь вниз по конусу 5, увеличиваются в диаметре. При этом увеличиваются в диаметре и эластичный элемент, который начинает деформировать давлением изнутри заготовку, плотно прижимая ее к рабочей поверхности матрицы. Полученную деталь 9 удаляют, подняв сначала пуансон с матрицей, а затем опорное кольцо 6.

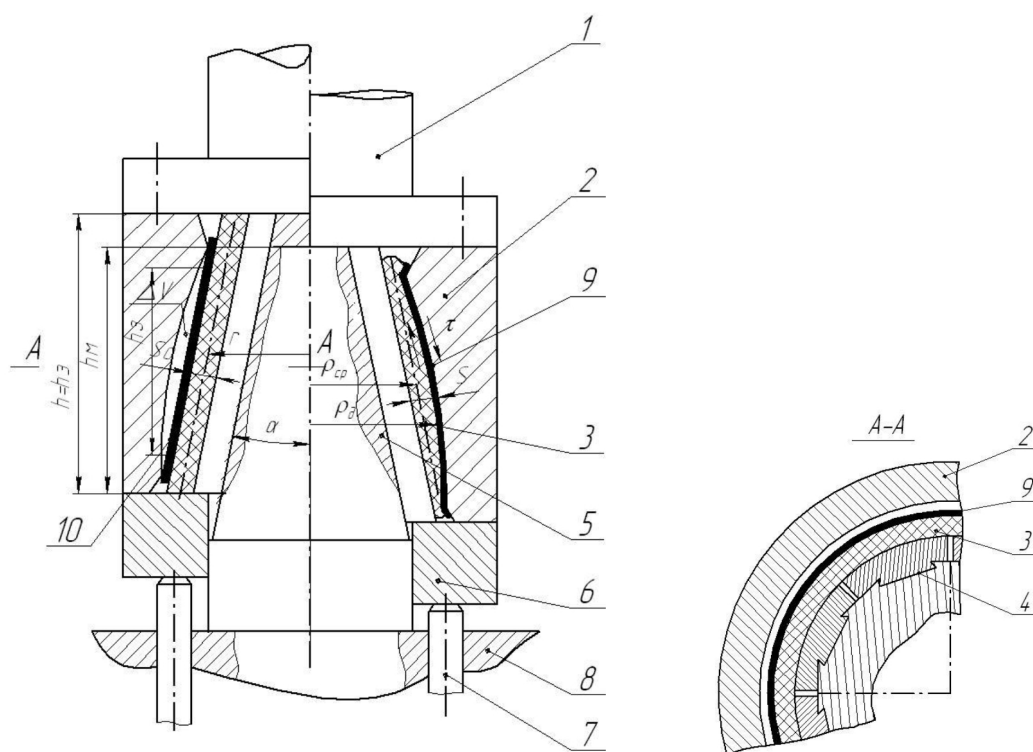


Рисунок 3.1- Устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы

Чтобы избежать при увеличении диаметра эластичного элемента его уменьшения высоты и возникновения на поверхности контакта с заготовкой сжимающих сил трения, которые могут привести к потере устойчивости тонкостенной заготовки, эластичный элемент в районах наибольшего и наименьшего диаметров матрицы зажимается (в начальный момент) между матрицей и секторами. Для надежного обеспечения условия зажима эластичного элемента необходимо, чтобы его высота была больше высоты рабочей поверхности, но не превышала общую высоту матрицы, иначе эластичный элемент может попасть в зазор между матрицей 2 и секторами 4. Это устраняет сжимающие силы трения на внутренней поверхности заготовки. Эластичный элемент, деформируясь, увеличивает диаметр и уменьшает толщину, то есть соответствует условию плоского деформированного состояния, когда деформация по толщине ε_s равна по величине и противоположна по знаку деформации увеличения диаметра

эластичного элемента ε_θ . Приближенно можно записать, считая выполнения условия постоянства объема для эластичного элемента:

$$\varepsilon_s \approx -\varepsilon_\theta \text{ или } \frac{\rho_{cp} - r}{r} \approx -\frac{S - S_0}{S_0}, \quad (3.1)$$

где ρ_{cp}, r – соответственно радиусы по средней поверхности средние по очагу эластичного элемента до и после деформации;

S_0, S – соответственно толщины эластичных элементов средние по очагу до и после деформации.

Несмотря на уменьшение толщины эластичного элемента, прирост объема ΔV_ρ его за счет увеличения диаметра должен компенсировать разницу между внутренним объемом, ограниченным рабочей поверхностью матрицы и объемом, ограниченным наружной поверхностью эластичного элемента в исходном состоянии ΔV .

$$\Delta V_\rho = \Delta V \text{ или } \pi \frac{(\rho_{cp}^2 - r^2)^2}{\cos \alpha} h_m = \Delta V, \quad (3.2)$$

где h_m - высота рабочей поверхности матрицы;

α - угол конусности конуса.

Выразим r из (1) и, подставив его в (2) после преобразований получим:

$$\rho_{cp} = \left(2 - \frac{S}{S_0}\right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m} \left[\left(2 - \frac{S}{S_0}\right)^2 + 1 \right]}. \quad (3.3)$$

Приняв во внимание, что $\rho = \rho_\phi - 0,5S$ имеем:

$$S = 2 \left(\rho_\phi - \left(2 - \frac{S}{S_0}\right) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m} \left[\left(2 - \frac{S}{S_0}\right)^2 + 1 \right]} \right). \quad (3.4)$$

Исходную толщину эластичного элемента найдем, поставив ограничения по степени деформации:

$$\frac{S}{S_0} \leq k \leq 0,9 \div 0,75 \text{ или}$$

$$S_0 = \frac{S}{k}, \quad (3.5)$$

где

$$S = 2 \left(\rho_0 - (2-k) \sqrt{\frac{\Delta V \cos \alpha}{\pi \cdot h_m [(2-k)^2 + 1]}} \right), \quad (3.6)$$

где ρ_0 – средний радиус детали.

3.1 Определить давление эластичной среды

Для деталей, приведённых на рисунке 1.5 определить давление эластичной среды.

$$q = \beta \cdot S_{заз} (1 - e_S) (\sigma_{T_0} + P e_S) \left(\frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{R_\rho - a / \cos \frac{\alpha_0}{2}} \right), \quad (3.7)$$

где

$$e_S = -c \sin \left(\frac{1 - \bar{\rho}}{1 - \bar{\rho}_0} \pi \right), \text{ при } \bar{\rho}_0 = \frac{\rho_0}{R_\rho}, \bar{\rho} = \frac{\rho}{R_\rho}. \quad (3.8)$$

Значения постоянной c найдём:

$$c = - \frac{\bar{\sigma}_{T_0} \left(\frac{1 + 2\ell}{2\bar{\rho}_c} + K \right) (1 - \bar{\rho}_0)}{\left(\frac{1 + 2\ell}{2\bar{\rho}_c} + K \right) (1 - \bar{\rho}_0) + 1}, \quad (3.9)$$

где $\bar{\sigma}_{T_0} = \frac{\sigma_{T_0}}{P}$; $K = \frac{f}{R_\rho \sin \alpha}$; $\ell = f \operatorname{ctg} \bar{\alpha}$; $\bar{\alpha} = \frac{\alpha_0}{2} = \operatorname{const}$; $\bar{R}_\rho = \frac{R_\rho}{R_\rho}$, $\bar{\rho}_c = \frac{\bar{\rho}_0 + 1}{2}$.