

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-53-10-22>

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СТАКАНА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ МЕТОДАМИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Кондратьев В.И.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*

Ключевые слова: листовая штамповка, осесимметричный стакан сложной формы, разработка алгоритмов, исследование геометрии, соотношение между углами и сторонами, зависимости расчета параметров заготовки, модель деформации, конструирование переходов, постоянство объема, программный модуль.

Аннотация. Процессы листовой штамповки занимают значительное место в машиностроительном производстве. Для них характерно постоянное появление новых видов изделий в связи с совершенствованием конструкций машин. Зачастую в них используются новые достаточно сложные детали или для существующих деталей отсутствуют точные методики расчета параметров заготовок и переходов. Поэтому существует потребность в создании новых и достаточно точных методов расчета параметров заготовок и конструкций переходов. Кроме того, в современных CAD системах отсутствуют совершенные средства проектирования заготовок и переходов для деталей, изготавливаемых способами вытяжки. Тема работы посвящена получению зависимостей для расчета параметров заготовки и конструированию перехода для осесимметричного стакана сложной формы, получаемого способами листовой штамповки. Цель работы обусловлена необходимостью получения зависимостей для конструирования осесимметричных деталей произвольной формы. Исследованы особенности геометрии детали. Получены соотношения между углами и линейными размерами, для расчета объемов элементов тел вращения. Получены зависимости для конструирования заготовки и перехода. Для исследования использованы методы математического моделирования: принято допущение, что толщина стенки в процессе деформации не меняется на всей поверхности стакана, расчет параметров перехода выполняется при условии постоянства объема и его верхняя часть совпадает с верхней частью стакана, а нижняя представляет собой цилиндр. На основе полученных зависимостей разработаны алгоритмы для создания программного модуля проектирования осесимметричного стакана сложной формы.

WORKING OUT OF ALGORITHMS FOR THE AUTOMATED DESIGNING OF MANUFACTURING TECHNIQUES SIMMETRIC CONSERNING AN AXIS OF THE GLASS OF THE DIFFICULT FORM BY METHODS SHEET PUNCHING

Kondratyev V.I.

*The Ural federal university of a name of the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia*

Keywords: sheet punching, concerning an axis a glass of the difficult form, working out of algorithms, geometry research, a parity between corners and the parties, dependences of calculation of parametres of preparation, deformation model, designing of transitions, a volume constancy, the program module.

Abstract. Processes of sheet punching occupy an important place in machine-building manufacture. For them constant occurrence of new kinds of products in connection with perfection of designs of cars is characteristic. Frequently in them new difficult enough details are used or for existing details there are no exact design procedures of parametres of preparations and transitions. Therefore there is a requirement for creation new and enough exact methods of calculation of parametres of preparations and designs of transitions. Besides, in modern CAD systems there are no perfect design tools of preparations and transitions for the details made in the ways of an extract. The work theme is devoted reception of dependences for calculation of parametres of preparation and to designing of transition for concerning an axis a glass of the difficult form received in the ways of sheet punching. The work purpose is caused by necessity of reception of dependences for designing concerning an axis details of any form. Features of geometry of a detail are investigated. Parities between corners and the linear sizes, for calculation of volumes of elements of bodies of rotation are received. Dependences for preparation and transition designing are received. For research methods of mathematical modelling are used: the assumption is accepted that the thickness of a wall in the course of deformation does not vary on all surface of a glass, calculation of parametres of transition is carried out under condition of a constancy of volume and its top part coincides with more true a glass part, and bottom represents the cylinder. On the basis of the received dependences algorithms are developed for creation of the program module of designing concerning an axis a glass of the difficult form.

Введение

Процесс листовой штамповки связан с необходимостью постоянного освоения все новых видов деталей. Поэтому зачастую отсутствуют методики или имеются пробелы в методиках расчета технологических параметров.

Кроме этого, расчеты многих технологических параметров требуют выполнения весьма значительных вычислений [1-7]. Например, при определении формы и размеров заготовок, а также формы и размеров переходов при условии сохранения постоянства объема.

Совершенствование проектных работ рассматриваемых процессов требует разработки методов проектирования на основе точных зависимостей, что возможно на базе применения вычислительной техники.

Следует отметить, что известные CAD системы не содержат совершенных средств проектирования технологии листовой штамповки процесса вытяжки.

Работа ориентирована на получение зависимостей по расчету параметров заготовки и переходов.

Методы решения задачи

Для решения поставленной задачи проектирования технологии процесса вытяжки применены методы моделирования. Так объем в процессе вытяжки не меняется, толщина стенки остается постоянной у всей детали, принята модель перехода в форме цилиндра и верхней части, совпадающей с верхней частью стакана. Получены зависимости для расчета объема как отдельных элементов стакана, так и в целом с применением математических методов. Для решения задачи конструирования переходов применены математические методы для получения параметров с учетом постоянства объема.

Конструирование стакана и определение параметров заготовки

Рассмотрим процесс вытяжки стакана сложной формы (рис. 1).

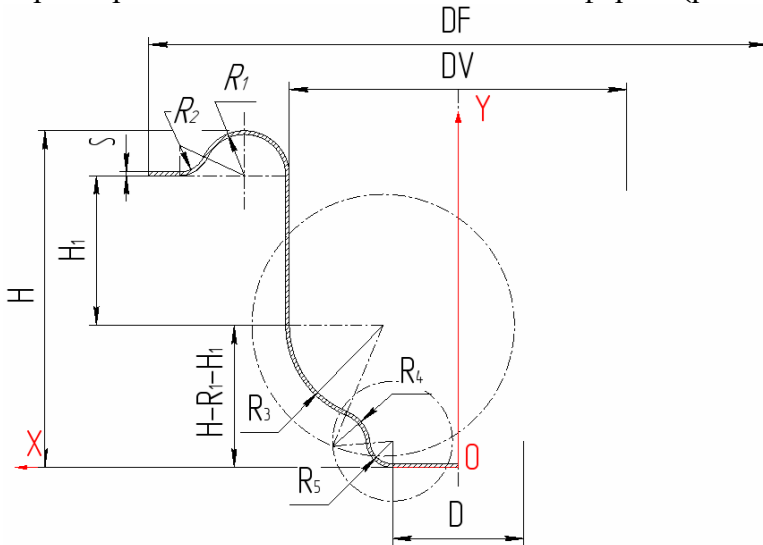


Рис. 1. Параметры стакана сложной формы

На рисунке 1 обозначено DV – внутренний диаметр цилиндрической части; DF – диаметр фланца; H – высота стакана; H_1 – высота цилиндрической части; S – толщина стенки; R_1, R_2 – наружные радиусы скруглений; R_3, R_4, R_5 – внутренние радиусы скруглений; D – диаметр дна.

Расчет параметров заготовок реализован с учетом равенства объемов готовой коробки и заготовки. Получим зависимости для расчета объема стакана.

Ввиду сложности формы стакана последовательно получим формулы для отдельных участков.

Определим объем первого участка (рис. 2).

Он состоит из кольцевой части между точками P_1 и P_2 .

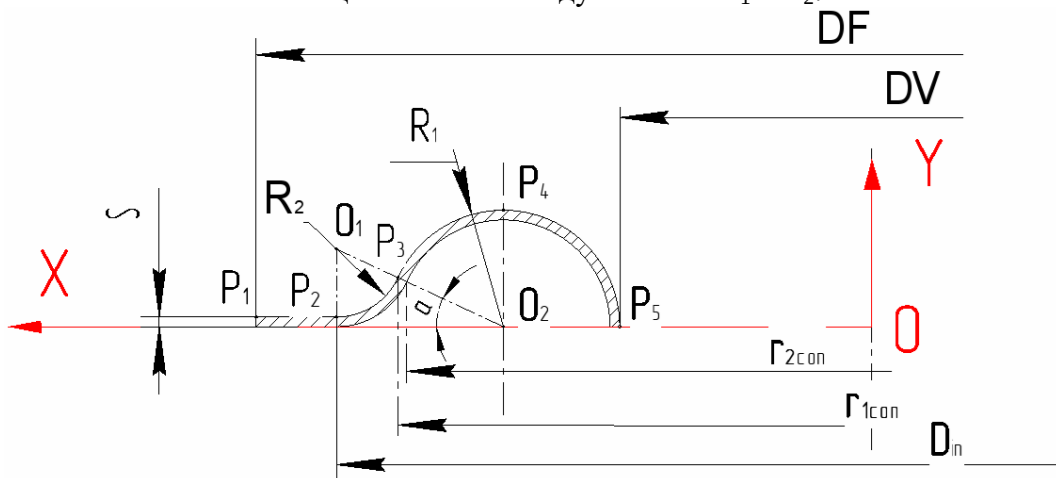


Рис.2. Верхний участок детали

Наружный диаметр кольца равен DF . Внутренний диаметр равен:

$$D_{in} = DV + 2 \cdot R_1 + 2 \cdot \sqrt{((R_1 + R_2)^2 - (R_2 + S)^2)}.$$

Объем кольцевого участка: $V_{12} = \frac{\pi}{4} \cdot (DF^2 - D_{in}^2) \cdot S$.

Определим объем V_{23} , образуемый вращением дугой, ограниченной точками P_2 и P_3 вокруг оси OY . С этой целью определим объем V_{23top} , образуемый вращением верхней части дуги.

Для этого воспользуемся формулой [1]

$$V = \pi \cdot \left\{ (y_1 - y_{ц}) \left[x_1 x_{ц} + R^2 - \frac{1}{3} (y_1 - y_{ц})^2 \right] - (y_2 - y_{ц}) \left[x_2 x_{ц} + R^2 - \frac{1}{3} (y_2 - y_{ц})^2 \right] + \varphi R^2 x_{ц} \right\}. \quad (1)$$

Здесь $x_{ц}$ и $y_{ц}$ – координаты точки центра дуги; x_1 и y_1 – координаты первой точки дуги; x_2 и y_2 – координаты второй точки дуги; R – радиус дуги; $\varphi (0 \leq \varphi \leq \pi)$ – величина дуги; V – объем, образуемый вращением дуги вокруг оси OY .

В нашем случае:

$$x_{ц} = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha; \quad y_{ц} = R_2 + S;$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 - (R_2 + s)^2}}{(R_1 + R_2)^2};$$

$$x_1 = \frac{DV}{2} + R_1 (1 + \cos \alpha); \quad y_1 = R_1 \sin \alpha;$$

$$x_2 = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha; \quad y_2 = S;$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2; \quad \varphi_1 = \alpha; \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}; \quad \varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}; \quad R = R_2;$$

где φ_1 и φ_2 – углы между осью OX и прямыми, проходящими через центр дуг и концами дуг.

Подставив полученные значения в формулу (1) получим V_{23top} .

Затем определим объем цилиндра V_{cyl} радиусом:

$$R_{cyl} = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha \text{ и высотой } H_{cyl} = S:$$

$$V_{cyl} = \pi \cdot R_{cyl}^2 \cdot S.$$

Для получения искомого объема нужно из объема, образуемого вращением верхней части дуги плюс объем цилиндра вычесть объем нижней части V_{23bot} и усеченного конуса V_{con} с радиусами:

$$\text{– верхним: } r_{1con} = \frac{DV}{2} + R_1 \cdot (1 + \cos \alpha);$$

– нижним: $r_{2con} = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 - S) \cdot \cos \alpha$;

– высотой $h_{con} = S \cdot \sin \alpha$;

$$V_{con} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{con} \cdot (r_{1con}^2 + r_{1con} \cdot r_{2con} + r_{2con}^2).$$

Объем, образуемый вращением нижней части дуги V_{23bot} получится подстановкой в формулу (1) следующих параметров:

$$x_{II} = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha; y_{II} = R_2 + S;$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 - (R_1 + S)^2}}{(R_1 + R_2)^2};$$

$$x_1 = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 - S) \cdot \cos \alpha; y_1 = (R_1 - S) \cdot \sin \alpha;$$

$$x_2 = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha; y_2 = 0;$$

$$R = R_2 + S; \varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}.$$

Объем части стакана V_{23} на участке между точками P_2 и P_3 :

$$V_{23} = V_{23top} + V_{cyl} - V_{23bot} - V_{con}.$$

Объем части стакана V_{13} на участке между точками P_1 и P_3 :

$$V_{13} = V_{12} + V_{23}.$$

Определим объем V_{34} , образуемый вращением дуги, ограниченной точками P_3 и P_4 вокруг оси OY .

Получим выражение для определения объема V_{34top} , полученного вращением верхней части дуги. Для этого воспользуемся также формулой (1).

В нашем случае: $x_{II} = \frac{DV}{2} + R_1; y_{II} = 0; x_1 = \frac{DV}{2} + R_1; y_1 = R_1;$

$$x_2 = \frac{DV}{2} + R_1 \cdot (1 + \cos \alpha); y_2 = R_1 \cdot \sin \alpha;$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2; \varphi_1 = \frac{\pi}{2}; \varphi_2 = \alpha; \varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha; R = R_1.$$

Подставив полученные значения в формулу (1), получим V_{34top} .

Для получения искомого объема нужно из объема, образуемого вращением верхней части дуги V_{34top} вычесть объем V_{34bot} , образуемый вращением нижней части дуги, который получится подстановкой в формулу (1) следующих параметров:

$$x_{II} = \frac{DV}{2} + R_1; y_{II} = 0; x_1 = \frac{DV}{2} + R_1; y_1 = R_1 - S;$$

$$x_2 = \frac{DV}{2} + R_1 + (R_1 - S) \cdot \cos \alpha; \quad y_2 = (R_1 - S) \cdot \sin \alpha;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha; \quad R = R_1 - S.$$

Подставив полученные значения в (1), получим V_{34bot} .

И к полученному объему прибавим объем цилиндра V_{cy34} радиусом $R_{cy34} = \frac{DV}{2} + R_1$ и высотой S : $V_{cy34} = \pi \cdot R_{cy34}^2 \cdot S$.

В итоге получим объем стакана на участке между точками P_3 и P_4 :

$$V_{34} = V_{34top} - V_{cy34} - V_{34bot} + V_{con}$$

Определим объем V_{45} , образуемый вращением дуги, ограниченной точками P_4 и P_5 вокруг оси OY .

Для расчета объема тела, образованного вращением такой дуги вокруг оси OY выведена формула

$$V' = \pi R(x_{II}^2 - \frac{\pi}{2} x_{II} R + \frac{2}{3} R^2). \quad (2)$$

Здесь x_{II} и y_{II} – координаты точки центра дуги; R – радиус дуги; V' – объем, образуемый вращением дуги вокруг оси OY . Получим значение объема V_{45top} , образуемого вращением верхней части дуги.

$$\text{В нашем случае: } x_{II} = \frac{DV}{2} + R_1; \quad R = R_1.$$

Подставив эти значения в (2), получим значение объема, образуемого вращением верхней части дуги V_{45top} .

Для получения искомого объема нужно из объема V_{45top} , образуемого вращением нижней части вычесть объем, образуемый вращением верхней части дуги V_{45top} и к полученному объему следует прибавить объем цилиндра $V_{cyl} = \pi \cdot s \cdot (DV/2 + R_1)^2$.

Получим значение объема V_{45bot} , образуемого вращением нижней части дуги. Имеем $x_{II} = \frac{DV}{2} + R_1; \quad R = R_1 - S$.

Подставив эти значения в (2), получим значение объема, образуемого вращением нижней части дуги V_{45bot} .

$$\text{В итоге получим объем } V_{45} = V_{45bot} + V_{cyl} - V_{45top}.$$

$$\text{В итоге объем первого участка: } V_1 = V_{13} + V_{34} + V_{45}.$$

Объем второго участка представляет цилиндр с внутренним диаметром DV и высотой H_1 с толщиной стенки s (рис. 1).

$$\text{Объем второго участка } V_2 = \pi s H_1 (DV + s).$$

Определение объема нижнего участка (рис. 3).

Определим координаты точек $P_1, P_2, O_1, O_2, P_3, O_3, P_4$.

$$P_1 : x = DV/2; \quad y = H - H_1; \quad O_1 : x = DV/2 - R_3; \quad y = H - H_1;$$

$$P_4 : x = D/2; \quad y = S; \quad O_3 : x = D/2; \quad y = R_5 + S.$$

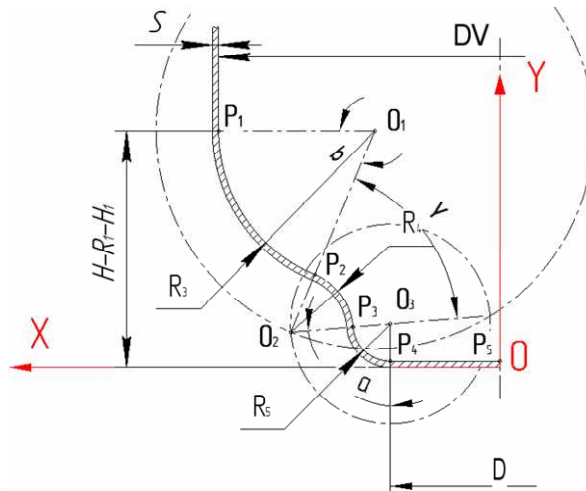


Рис. 3. Нижний участок стакана

Координаты точки O_2 находятся из совместного решения двух уравнений, как координаты точки пересечения двух окружностей с радиусами $(R_3 + R_4)$ и $(R_4 + R_5)$:

$$\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + [y - (R_5 + s)]^2 = (R_4 + R_5)^2,$$

$$\left[x - \left(\frac{DV}{2} - R_3\right)\right]^2 + [y - (H - H_1)]^2 = (R_3 + R_4)^2.$$

В нашем случае координаты точек O_1 и O_3 :

$$O_{1x} = P_{1x} = \frac{DV}{2} - R_3; O_{1y} = P_{1y} = H - R_1 - H_1,$$

$$O_{3x} = P_{3x} = \frac{D}{2}; O_{3y} = P_{3y} = R_5 + S.$$

Радиусы окружностей с центрами в точках O_1 и O_3 :

$$R_1 = R_3 + R_4; R_2 = R_5 + R_4.$$

Расстояние между точками O_1 и O_3 :

$$d_{13} = \sqrt{(O_{1x} - O_{3x})^2 + (O_{1y} - O_{3y})^2};$$

$$d_{13} = \sqrt{\left(\frac{DV - D}{2} - R_3\right)^2 + (H - R_1 - H_1 - R_5 - s)^2};$$

$$b = \frac{(R_4 + R_5)^2 - d_{13}^2}{2 \cdot d_{13}};$$

$$a = R_3 + R_4 - \left[\frac{(R_4 + R_5)^2 - d_{13}^2}{2 \cdot d_{13}} \right];$$

$$P_{0x} = O_{1x} + \frac{a}{R_3 + R_4} \cdot (O_{3x} - O_{1x});$$

$$P_{0y} = O_{1y} + \frac{a}{R_3 + R_4} \cdot (O_{3y} - O_{1y});$$

$$h = \sqrt{d_{13}^2 - a^2}.$$

Получаем координаты двух точек:

$$O_{2x} = P_{ox} + \frac{O_{3y} - O_{1y}}{R_3 + R_4} \cdot h; \quad O_{2y} = P_{oy} - \frac{O_{3x} - O_{1x}}{R_3 + R_4} \cdot h;$$

$$O'_{2x} = P_{ox} + \frac{O_{3y} - O_{1y}}{R_3 + R_4} \cdot h; \quad O'_{2y} = P_{oy} - \frac{O_{3x} - O_{1x}}{R_3 + R_4} \cdot h.$$

Выбираем ту точку, которая находится дальше от оси OY в положительном направлении оси OX чем точка O_3 .

Определим объем V_{in} тела вращения, образуемый внутренней дугой на участке P_3P_4 .

Зная координаты точек O_2 и O_3 можно определить угол α .

Сначала рассчитаем угол θ равный $\frac{\pi}{2} - \alpha$.

Его тангенс равен:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{O_{y3} - O_{y2}}{O_{x2} - O_{x3}}; \quad \theta = \arctg \theta;$$

Угол $\alpha = \frac{\pi}{2} - \arctg \theta = \frac{\pi}{2} - \theta$.

Координаты центра дуги:

$$x_{\Pi} = x_{03} = \frac{D}{2}; \quad y_{\Pi} = y_{03} = R_5 + S.$$

Здесь x_{03} и y_{03} – координаты точки O_3 .

Координаты первой точки дуги:

$$x_1 = x_{p3} = x_{03} + R_5 \cdot \cos(\theta) = \frac{D}{2} + R_5 \cdot \cos(\theta);$$

$$y_1 = y_{p3} = y_{03} - R_5 \cdot \sin(\theta) = (R_5 + S - R_5 \cdot \sin(\theta)) = S + R_5 \cdot (1 - \sin(\theta)),$$

где x_{p3} и y_{p3} – координаты точки P_3 .

Координаты второй точки дуги:

$$x_2 = x_{p4} = \frac{D}{2}; \quad y_2 = y_{p4} = S; \quad \varphi_1 = -\theta; \quad \varphi_2 = -\frac{\pi}{2};$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \theta = \alpha;$$

где x_{p3} и y_{p3} – координаты точки P_3 .

Здесь x_{p4} и y_{p4} – координаты точки P_4 .

Подставив полученные значения в формулу (1), получим объем V_{in} .

Определим объем тела вращения, образуемый наружной дугой на участке P_3P_4 .

Координаты центра дуги:

$$x_{\mathcal{U}} = x_{o3} = \frac{D}{2}; y_{\mathcal{U}} = y_{o3} = R_5 + S.$$

Координаты первой точки дуги:

$$x_1 = x_{o3} + (R_5 + S) \cdot \cos \theta = \frac{D}{2} + (R_5 + S) \cdot \cos \theta.$$

$$y_1 = y_{P3} = y_{o3} - (R_5 + S) \cdot \sin(\theta) = R_5 + S - (R_5 + S) \cdot \sin(\theta) = (R_5 + S) \cdot (1 - \sin \theta).$$

Координаты второй точки дуги:

$$x_2 = x_{P4} = \frac{D}{2}; y_2 = 0; \varphi_1 = -\theta; \varphi_2 = -\frac{\pi}{2};$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \theta = \alpha.$$

Подставив полученные значения в (1), получим объем V_{out} .

Объем усеченного конуса V_{con} на участке P_3P_4 , будет равен:

$$V_{con} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{con} (r_{1con}^2 + r_{1con} \cdot r_{2con} + r_{2con}^2),$$

$$\text{где } r_{1con} = D/2 + R_5 \cdot \cos \theta; \quad r_{2con} = \frac{D}{2} + (R_5 + S) \cdot \cos \theta; \quad h_{con} = S \cdot \sin(\pi/2 - \alpha);$$

$$\alpha = \pi/2 - \theta.$$

В итоге получим объем тонкостенного элемента $V_{P_3P_4}$ на участке P_3P_4 :

$$V_{P_3P_4} = V_{out} - V_{in} + V_{con}.$$

Определим объем тела вращения на участке дуги между точками P_2P_3 .

Для решения этой задачи получено следующее уравнение для определения объема V'' , образуемого вращением дуги, ограниченной точками P_2 и P_3 вокруг оси OY :

$$\begin{aligned} V'' = \pi \cdot R \cdot \left\{ x_{\mathcal{U}}^2 \cdot (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) + x_{\mathcal{U}} \cdot R \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + x_{\mathcal{U}} \cdot R \times \right. \\ \times [\sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_1 - \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_2] + R^2 \cdot [\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1] - \\ \left. - \frac{R^2}{3} - [\sin^3 \varphi_2 - \sin^3 \varphi_1] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $x_{\mathcal{U}}$ – координата центра дуги; R – радиус дуги; φ_1 и φ_2 – углы между векторами, соединяющими концы дуги с центром и осью x .

Для определения объема тела вращения V_{in} , образуемого вращением внутренней дуги выполним следующие подстановки в уравнение (3):

$$\varphi_1 = \theta; \varphi_2 = \gamma + \theta; R = R_4; x_{\mathcal{U}} = x_{O2}.$$

Здесь x_{O2} – координата x точки O_2 .

Здесь все параметры известны, кроме угла γ , который определится:

$$\tan(\gamma + \theta) = \frac{y_{01} - y_{02}}{x_{01} - x_{02}}; \quad \gamma = \arctan(\gamma + \theta) - \theta.$$

Объем тела вращения V_{out} , образуемого вращением наружной дуги получим, выполнив следующие подстановки в уравнение (3):

$$\varphi_1 = \theta; \quad \varphi_2 = \gamma + \theta; \quad R = R_4 - S; \quad x_{II} = x_{02}.$$

В итоге объем тела вращения на этом участке

$$V_{P_2P_3} = V_{out} - V_{in} - V_{1con} - V_{con}.$$

$$\text{Здесь } V_{1con} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{con} (r_{1con}^2 + r_{1con} \cdot r_{2con} + r_{2con}^2),$$

где $r_{1con} = O_{2x} - R_4 \cos \beta$; $r_{2con} = O_{2x} - (R_4 - S) \cos \beta$; $h_{con} = S \cdot \sin \beta$; V_{1con} – объем усеченного конуса.

$$\text{Здесь } V_{con} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{con} (r_{1con}^2 + r_{1con} \cdot r_{2con} + r_{2con}^2),$$

где $r_{1con} = D/2 + R_5 \cdot \cos \theta$; $r_{2con} = D/2 + (R_5 + S) \cdot \cos \theta$; $h_{con} = S \cdot \sin(\pi/2 - \alpha)$.

Определим объем тела вращения, образуемый внутренней дугой на участке P_1P_2 .

Имеем $\beta = \gamma + \theta$.

Координаты центра дуги:

$$x_{II} = x_{o1} = \frac{DV}{2} - R_3; \quad y_{II} = y_{o1} = H - R_1 - H_1.$$

Здесь x_{o1} и y_{o1} – координаты х точки O_1 .

Координаты первой точки дуги:

$$x_1 = x_{p1} = \frac{DV}{2}; \quad y_1 = y_{p1} = H - R_1 - H_1.$$

Здесь x_{p1} и y_{p1} – координаты точки P_1 .

Координаты второй точки дуги:

$$x_2 = x_{p2} = x_{o1} + R_3 \cdot \cos \beta = \frac{DV}{2} + R_3 \cdot (\cos \beta - 1);$$

$$y_2 = y_{o1} - R_3 \cdot \sin \beta.$$

Здесь x_{p2} и y_{p2} – координаты точки P_2 .

$$\varphi_1 = 0; \quad \varphi_2 = -\beta; \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \beta.$$

Подставив полученные значения в формулу (1), получим объем V_{in} .

Определим объем тела вращения, образуемый наружной дугой на участке P_1P_2 .

$$\text{Координаты центра дуги: } x_{II} = x_{o1} = \frac{DV}{2} - R_3; \quad y_{II} = y_{o1} = H - R_1 - H_1.$$

Координаты первой точки дуги:

$$x_1 = x_{p1} = \frac{DV}{2} + S; \quad y_1 = y_{p1} = H - R_1 - H_1.$$

Координаты второй точки дуги:

$$x_2 = x_{p2} = x_{o1} + (R_3 + S) \cdot \cos \beta = \frac{DV}{2} - R_3 + (R_3 + S) \cdot \cos \beta;$$

$$r_{2con} = x_2; y_2 = y_{o1} - (R_3 + S) \cdot \operatorname{tg} \beta;$$

$$\varphi_1 = 0; \varphi_2 = -\beta; \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \beta.$$

Подставив полученные значения в формулу (1), получим объем V_{out} .

Рассчитаем объем усеченного конуса:

$$V_{con} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{con} (r_{1con}^2 + r_{1con} \cdot r_{2con} + r_{2con}^2),$$

где $r_{1con} = O_{2x} - R_4 \cos \beta$; $r_{2con} = O_{2x} - (R_4 - S) \cos \beta$; $h_{con} = S \cdot \sin \beta$.

Объем тонкостенного элемента на участке P_1P_2 , будет равен:

$$V_{P_1P_2} = V_{out} - V_{in} - V_{con}.$$

Объем третьего участка будет равен $V_3 = V_{P_1P_2} + V_{P_2P_3} + V_{P_3P_4}$.

Объем всего стакана $V_{CT} = V_1 + V_2 + V_3$.

$$\text{Диаметр заготовки } D_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{CT}}{\pi \cdot S}}.$$

Так как такие детали подобно деталям со сферическим дном вытягиваются за два перехода, решим задачу определения параметров перехода.

Переходом в этом случае является заготовка, у которой верхняя часть такая же, как верхний участок готовой детали, а нижней частью является цилиндр, объем которого равен сумме объемов второй и третьей частей готовой детали (рис. 4).

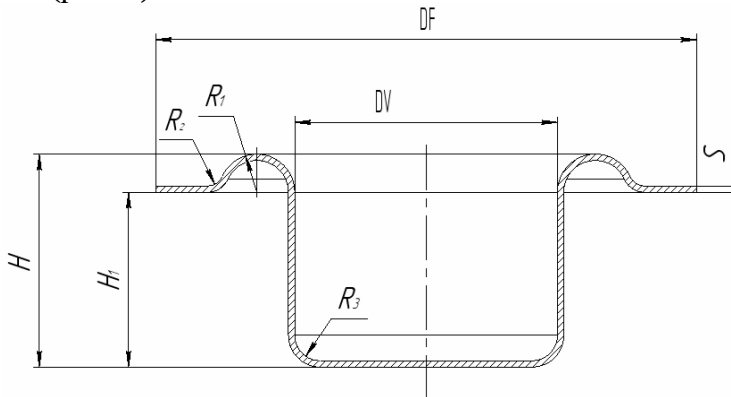


Рис. 4. Эскиз перехода

На рисунке 4 обозначено H – высота перехода; H_1 – высота цилиндрической части; R_1 и R_2 – наружные радиусы скруглений; R_3 – внутренний радиус скругления; DV – внутренний диаметр цилиндрической части; S – толщина стенки; DF – диаметр фланца.

В нашем случае требуется найти высоту H_1 цилиндрической части перехода при заданном радиусе скругления R_3 таким образом, чтобы объем цилиндрической части и сумма объемов $V_2 + V_3$ были равными. Получены зависимости для определения высоты перехода.

$$H_1 = \frac{V_2 + V_3 - V_{arc}}{\pi \cdot S \cdot (DV + S)}.$$

Здесь $(V_2 + V_3)$ – сумма объемов двух нижних частей стакана;

$$V_{arc} = \pi \cdot \left\{ \left(\frac{DV}{2} - R_3 \right)^2 \cdot S + \frac{2}{3} \cdot [(R_3 + S)^3 - R_3^3] + \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{DV}{2} - R_3 \right) \cdot [(R_3 + S)^2 - R_3^2] \right\}.$$

Результаты и выводы

В результате работы получены зависимости для расчета объема стакана сложной формы и его отдельных частей, что позволило практически точно определять параметры заготовки и рассчитывать параметры переходов. Для определения параметров переходов получена математическая модель перехода с верхней частью равной верхней части стакана и нижней частью в форме цилиндра с учетом равенства объема стакана и перехода. Эти зависимости по существу являются алгоритмами и позволяют получить с использованием программных средств чертежи детали и заготовки и карту эскизов и могут применяться для конструирования других деталей.

Список литературы

1. Тарновский И.Я., Вайсбурд Г.А., Еремеев Г.А. Автоматизация проектирования технологии горячей штамповки. – М.: Машиностроение, 1969. – 238с
2. Кондратьев В.И. Разработка алгоритмов и программного модуля проектирования технологии изготовления низких коробок сложной формы без фланца методами листовой штамповки // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №29. – С. 47-54. – doi.org/10.26160/2658-3305-2024-29-47-54.
3. Ильин Л.Н. Технология листовой штамповки. – М.: Дрофа, 2009. – 475 с.
4. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
6. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
7. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. – Л.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
8. Аведьян А. SolidWorks – САПР промышленного масштаба // САПР и графика. – 2005. – №1. – URL: <https://sapr.ru/article/6786>.
9. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2011 на примерах. – СПб.: БХВ – Петербург, 2011. – 496 с.
10. Кондратьев В.И. Разработка VBA приложений в среде “AutoCAD”: Учебно-методическое пособие по дисциплине “Инженерная графика”. Часть 1. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 68 с.

References

1. Tarnovsky I.Ya., Vaisburd G.A., Eremeyev G.A. Automation of designing of technology of hot punching. – M.: Mechanical engineering, 1969. – 238 p.
2. Kondratyev V.I. Working out of algorithms and the program module of designing of manufacturing techniques of low boxes of the difficult form without the flange methods sheet punching // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 29, pp. 47-54. doi.org/10.26160/2658-3305-2024-29-47-54.
3. Ilyin L.N. Sheet stamping technology. – M.: Drofa, 2009. – 475 p.
4. Zubtsov M.E. Sheet stamping. – L.: Mechanical engineering, 1980. – 432 p.
5. Romanovsky V.P. Handbook of Cold stamping. – L.: Mechanical engineering, 1979. – 520 p.
6. Averkiev Yu.A., Averkiev A.Yu. Cold stamping technology. – M.: Mechanical engineering, 1989. – 304 p.
7. Skvortsov G.D. Starlings of designing of stamps for cold sheet punching. – L.: Mechanical engineering, 1970. – 320 p.
8. Avedyan A. SolidWorks – industrial scale CAD // CAD and graphics. 2005, no. 1, URL: <https://sapr.ru/article/6786>.
9. Dudareva N.Yu., Zagayko S.A. SolidWorks 2011: Examples. – SPb.: BHV – Petersburg, 2011. – 496 p.
10. Kondratiev V.I. Development of VBA applications in the AutoCAD environment: A teaching aid in the discipline "Engineering graphics". Part 1. – Ekaterinburg, USTU-UI, 2006. – 68 p.

Кондратьев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент vlad_ivan_kon@mail.ru	Kondratyev Vladimir Ivanovich – candidate of technical sciences, associate professor
---	--

Received 15.04.2026