

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКИХ КВАДРАТНЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КОРОБОК С ФЛАНЦЕМ МЕТОДАМИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Кондратьев В.И.

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

Ключевые слова: высокая коробка с фланцем, листовая штамповка, технология изготовления, вытяжка, методика расчета заготовки, методика расчета переходов.

Аннотация. Тема работы посвящена совершенствованию проектирования технологии изготовления деталей способами листовой штамповки. Предложены ряд формул для расчета параметров заготовок и алгоритмы для получения карты раскроя для вытяжки высоких квадратных и прямоугольных коробок с фланцем и разработан программный модуль формирования чертежей детали и заготовки и карты эскизов и раскроя, который включен в состав САПР.

WORKING OUT OF ALGORITHMS AND THE PROGRAM MODULE OF DESIGNING OF MANUFACTURING TECHNIQUES OF HIGH SQUARE AND RECTANGULAR BOXES C THE FLANGE METHODS OF SHEET PUNCHING

Kondratyev V.I.

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

Keywords: a high box with a flange, sheet punching, a manufacturing techniques, an extract, a preparation design procedure, a design procedure of transitions.

Abstract. The work theme is devoted perfection of designing of technology manufacturing of details by ways of sheet punching. Are offered a number of formulas for calculation Parametres of preparations and algorithms for card reception opening for an extract of the high square and rectangular boxes with a flange the program module of formation of drawings of a detail and preparation and a card sketches and opening, which insert in structure SAPR also is developed.

Процесс листовой штамповки относится к одному из широко используемых в машиностроении. Он 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. Например, при определении формы и размеров заготовок и решении задач раскроя листового металла на заготовки, 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.

В связи с этим в Уральском федеральном университете на кафедре «Информационные технологии и автоматизация проектирования» ведутся работы по созданию алгоритмов и программных модулей для расчета технологических параметров при различных процессах листовой штамповки, которые объединяются в САПР листовой штамповки.

Рассмотрим процесс вытяжки высоких квадратных и прямоугольных коробок с фланцем (рис. 1).

Высокими прямоугольными коробками обычно считают такие, которые вытягивают более, чем за одну операцию (приближенно при $H > 0,3 B$) [1].

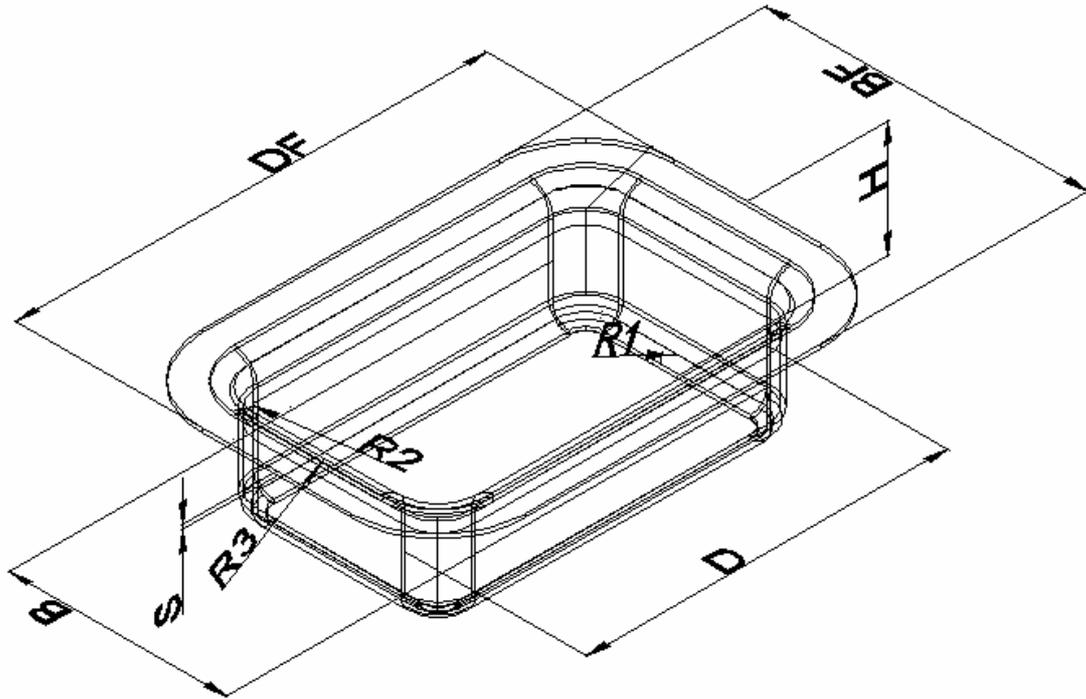


Рис. 1. Параметры коробки с фланцем

Расчет параметров заготовок реализован с учетом равенства объемов готовой коробки и заготовки. Для определения объема прямоугольной коробки с фланцем получена формула

$$\begin{aligned}
 V_{кор.фл.} = & \pi \left\{ (R_2 - R_1)^2 s + \frac{2}{3} [(R_2 - s)^3 - R_1^3] + \frac{\pi}{2} (R_2 - R_1) [(R_2 + s)^2 - R_1^2] \right\} \\
 & + \pi H s (2R_2 + s) + \pi s \left[\left(\frac{2(R_2 + s) + BF - B}{2} \right)^2 - (R_2 + R_3 + s)^2 \right] + \\
 & \frac{\pi^2}{2} (R_2 + R_3 + s) [(R_3 + s)^2 - R_3^2] + \frac{2}{3} \pi [R_3^2 - (R_3 + s)^3] + \\
 & 2s(B - 2R_2 - 2s) \cdot (H - R_1 - R_2 - 2s) + 2s(D - 2R_2 - 2s) \cdot \\
 & (H - R_1 - R_3 - 2s) + \frac{\pi s}{2} (2R_3 + s)(D - 2R_2 - 2s) + \frac{\pi s}{2} (2R_3 + s)(B - 2R_2 - 2s) + \\
 & s(D - 2R_2 - 2s)(BF - B - 2R_3) + s(B - 2R_2 - 2s)(DF - D - 2R_3). \quad (1)
 \end{aligned}$$

При определении размеров заготовки следует учитывать также и соотношение размеров детали: относительной высоты H/B , относительного радиуса закругления в углах $\frac{B_2}{B}$ и у дна $\frac{R_1}{B}$ и относительной толщины $\left(\frac{s}{D}\right) \cdot 100$.

Процесс вытяжки высоких квадратных и прямоугольных коробок, получаемых за несколько последовательных операций, является более сложным чем низких, так как в нем участвуют не только углы, но и боковые стенки и поэтому схема перераспределения металла будет иная.

Заготовкой при вытяжке высоких квадратных коробок с длиной стороны B и $H > 0,6B$ будет круг, диаметр которого определяется из равенства суммарного объема элементов готового изделия V' и объема заготовки V . Для определения диаметра заготовки получена формула.

$$D_3 = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{кк.фл.}}}{\pi s}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{кк.фл.}}$ – объем квадратной коробки с длиной стороны B ,

$$\begin{aligned} V_{\text{кк.фл.}} = & \pi \left\{ (R_2 - R_1)^2 s + \frac{2}{3} [(R_2 - s)^3 - R_1^3] + \frac{\pi}{2} (R_2 - R_1) [(R_2 + s)^2 - R_1^2] \right\} + \\ & + \pi H s (2R_2 + s) + \pi s \left[\left(\frac{2(R_2 + s) + BF - B}{2} \right)^2 - (R_2 + R_3 + s)^2 \right] + \\ & + \frac{\pi^2}{2} (R_2 + R_3 + s) [(R_3 + s)^2 - R_3^2] + \frac{2}{3} \pi [R_3^2 - (R_3 + s)^3] + \\ & + 2s(B - 2R_2 - 2s) \cdot (H - R_1 - R_2 - 2s) + 2s(B - 2R_2 - 2s) \cdot \\ & \cdot (H - R_1 - R_3 - 2s) + \frac{\pi s}{2} (2R_3 + s)(B - 2R_2 - 2s) + \frac{\pi s}{2} (2R_3 + s)(B - 2R_2 - 2s) + \\ & + s(B - 2R_2 - 2s)(BF - B - 2R_3) + s(B - 2R_2 - 2s)(DF - B - 2R_3). \quad (3) \end{aligned}$$

При вытяжке прямоугольных коробок с фланцем, для определения формы и размеров заготовки также исходят из условия равенства объема заготовки и изделия. При этом производят следующие подсчеты: определяют длину выпрямленной стенки (рис. 2), затем определяют радиус заготовки в углах, как и для цилиндрической детали с фланцем по формуле (3), после чего производят развертку на плоскость и полученную ступенчатость контура ЗАГОТОВКИ в углах выравнивают, создавая плавный переход к прямым стенкам. Выравнивание контура заготовки делают таким образом, чтобы прибавляемые и убавляемые площади были равны между собой.

Определены параметры заготовки

$$R_3 = \frac{D_3}{2} = \sqrt{\frac{V_{\text{кк.фл.}}}{\pi s}}, \quad (4)$$

$$K = 2 \cdot (H - 2s - R_1 - R_3) + \pi \cdot (R_1 + R_3 + s) + BF - 2 \cdot R_3, \quad (4)$$

$$L = D - B - D_3. \quad (5)$$

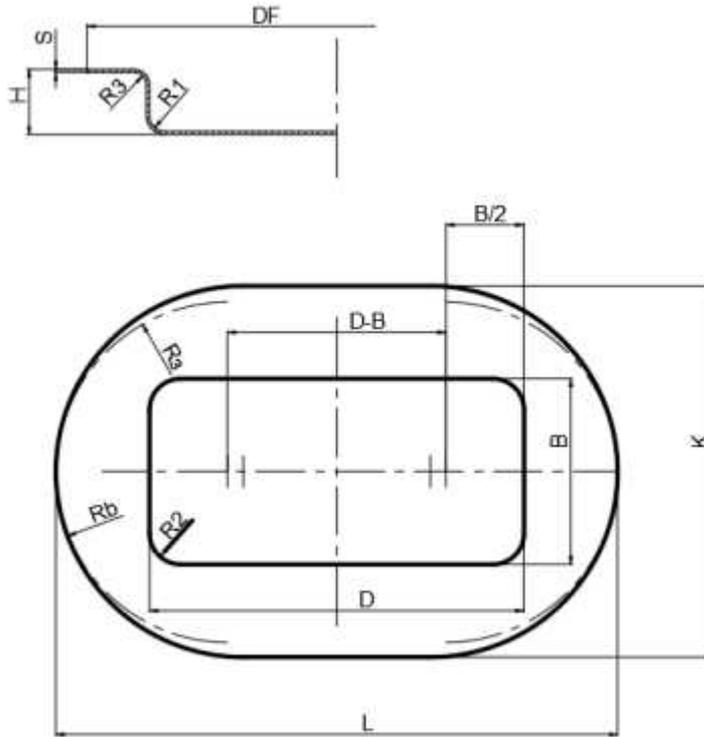


Рис. 2. Параметры заготовки прямоугольной коробки

Определен откорректированный радиус

$$R_b = \frac{V_{db}}{2 \cdot (D - B) \cdot s} \quad (6)$$

Объем заготовки на участке $(D - B)$

$$V_{db} = V_{кор.фл.} - V_{кк.фл.}$$

Определены откорректированные радиус R_{bk} и ширина заготовки L (рис. 2.) из условия постоянства объема

$$V_{кор.фл.} = s \cdot \left[\pi \cdot R_{bk}^2 + (D - B) \cdot 2 \cdot R_{bk} \right],$$

$$R_{bk} = \frac{-2 \cdot s \cdot (D - B) + \sqrt{4 \cdot s^2 \cdot (D - B)^2 + 4 \cdot s \cdot \pi \cdot V_{кор.фл.}}}{2 \cdot s \cdot \pi} \quad (7)$$

Второй вариант применяется для деталей с относительно большими радиусами скругления углов $R_2/B > 0,2$.

В этом случае заготовка имеет овальную форму (рис.3), контур которой можно построить двумя радиусами R_a и R_b . Радиус R_b определяется по формуле (10) или (11), а радиус R_a определяется из такого расчета, чтобы дуга соприкасалась с окружностями R_b и обеспечивалось равенство прибавляемых и вычитаемых площадей.

Выполнен расчет параметров овальной заготовки

$$\beta = \pi - \beta. \quad (8)$$

Площадь заготовки

$$S_z = 2 \cdot S_\alpha + 2 \cdot S_b - S_{O_1O_2O_1'O_2'},$$

$$S_z = \left[(\pi - \alpha) \cdot R_\alpha^2 + \alpha \cdot R_b^2 \right] - (R_\alpha - R_b)^2 \cdot \sin \alpha.$$

Значение R_b согласно [1] определяется по формуле

$$R_b = b \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{H'}{B} + \frac{R_{30}^2}{b^2}}. \quad (9)$$

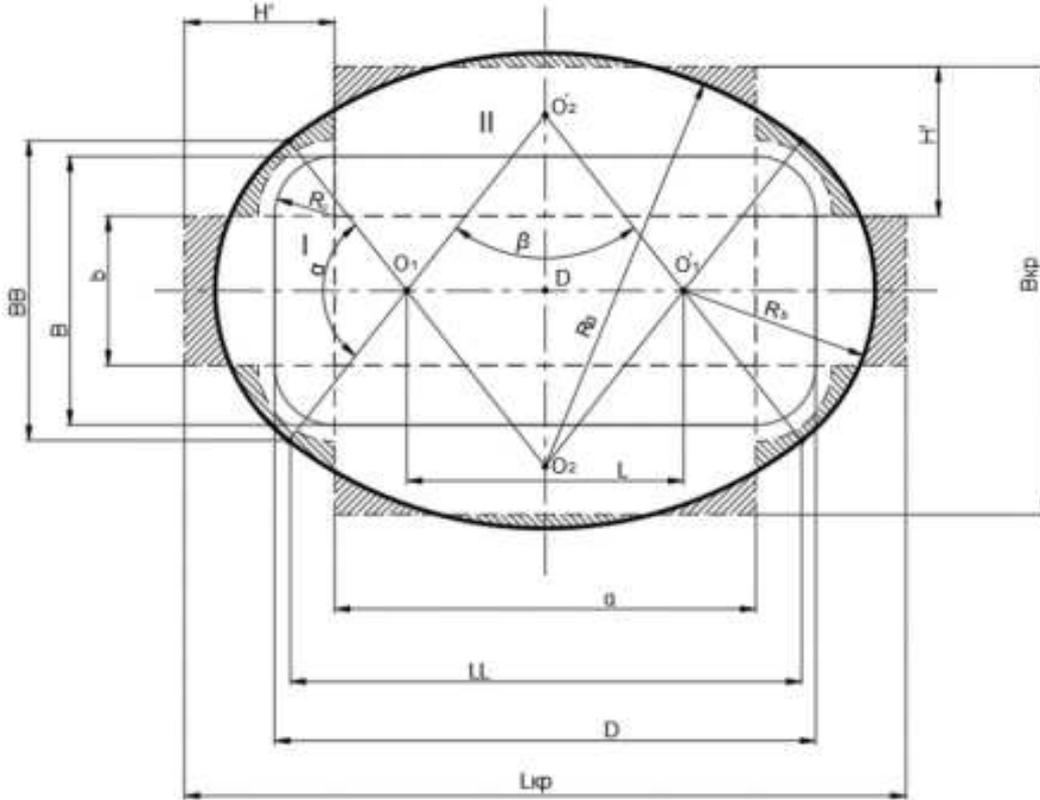


Рис. 3. Параметры заготовки

Здесь $H' = H + 0.57 \cdot (R_1 + R_2) + (BF - B - 2 \cdot R_3) / 2$; $b = B - 2 \cdot R_1$;

$$R_{30} = \sqrt{2 \cdot R_2 \cdot H}.$$

Можно также определить

$$R_b = \frac{D_3}{2}. \quad (10)$$

Очевидно $2 \cdot R_b + L_{кр} \leq L$,

$$L_{кр} = 2 \cdot H - 4 \cdot s + R_1 \cdot (\pi - 2) + R_3 \cdot (\pi - 4) + DF, \quad (11)$$

$$L \leq L_{кр} - 2 \cdot R_b,$$

$$R_a = R_b + \frac{L}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (12)$$

С учетом полученных зависимостей

$$S_z = \left[\alpha \cdot R_b^2 + \left(R_b + \frac{L}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)^2 \right] - \left(\frac{L}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)^2 \cdot \sin(\alpha).$$

Определены при каком α выполняется соотношении $\frac{BB}{LL} = \frac{B}{D}$

$$LL = 2 \cdot R_\alpha \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right); \frac{BB}{2 \cdot R_\alpha \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{B}{D}; \sin \frac{\beta}{2} = \frac{BB \cdot D}{2 \cdot R_\alpha \cdot B}.$$

Принимая во внимание (12)

$$\sin\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right) = \frac{BB \cdot D}{2 \cdot \left(R_b + \frac{L}{2 \cdot \cos}\right) \cdot B}.$$

С учетом $BB = 2 \cdot R_b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ получена выражение

$$1 = \frac{D \cdot R_b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\left(R_b \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{L}{2}\right) \cdot B}. \quad (13)$$

С учетом полученных зависимостей разработан алгоритм расчета параметров овальной заготовки для высоких прямоугольных коробок.

1. Используя (9) или (10), рассчитываем R_b .
2. Определяем параметр $L_{кр}$ по выражению (11).
3. Рассчитываем $V_{кло.фл.}$ по выражению (1).
4. Определяем L численным методом из $V_z = s \cdot S_z = V_{кор.фл.}$, принимая во внимание $0 < L \leq L_{кр} - 2 \cdot R_b$.
5. Используя (8), (12), (13) определяем α, β, R_α .

Вытяжка высоких прямоугольных коробок [2] $\left(\frac{H}{B} \geq 2,7\right)$ (рис. 1)

выполняется с применением промежуточных переходов. Количество операций, при многооперационной вытяжке коробчатых деталей определяется в зависимости от общего коэффициента вытяжки $m_{об}$ и относительной толщины заготовки. После определения количества операций производится расчет операционных размеров, начиная с предпоследнего перехода. Применяются два основных способа многооперационной вытяжки прямоугольных коробок в зависимости от отношений s/B .

Согласно первому способу вытяжки форма заготовки и промежуточных переходов имеют форму овала из двух полуокружностей и параллельных сторон. В случае большой относительной высоты коробки или малой разности размеров сторон заготовка берется круглой формы. Этот способ применяется при относительно большой толщине материала $((s/B)100) \geq 2$ и малом расстоянии между стенками ($b_n \leq 10s$). Этот способ можно применять при меньшей относительной толщине для прямоугольных коробок с весьма большими радиусами угловых закруглений ($r = (0,2 - 0,4)B$).

Второй способ может применяться и при меньшей относительной толщине материала ($(s/B)100 < 2$). Это определяется облегченными условиями вытяжки на последней операции, так как $(n-1)$ -й, переход имеет форму прямоугольника с большими угловыми закруглениями [2]. С этой целью вводится расчетный размер B_y .

$$B_y = (b_n + 0,43r) / 0,207 \approx 50s,$$

где B_y – полуразность ширины двух соседних переходов; r – угловой радиус закругления.

Согласно приведенным способам расчет переходов начинается с определения размеров предпоследнего перехода. Последовательность расчета и зависимости сведены в таблицу 1.

Табл. 1. Зависимости и последовательность расчета при многооперационной вытяжке высоких прямоугольных коробок с фланцем

Определяемые величины	Формулы и способы расчета	
	первый	второй
Относительная величина	$(s/B) \geq 2$	$(s/B) < 2$
Диаметр условной заготовки	$D_3 = 2 \cdot \sqrt{V_{кк.фл.} / (\pi s)}$	
Длина заготовки	$L = D_3 + (A - B)$	
Ширина заготовки	$K = D_3$	
Радиусы заготовки	$R = 0,5K$	
Коэффициент пропорциональности переходов	$x_1 = (K - B) / (L - A)$	
Расстояние между переходами	$b_n = a_n \leq 10s$ (a_n – полуразность длин соседних переходов)	
Угловой расчетный размер	-	$B_y \approx 50s$
Радиусы $n-1$ перехода	$R_{bn-1} = 0,5B + b_n$	$R_{yn-1} = 0,5B_y + b_n$
Угловой зазор (включая S)	$x = b_n + 0,41B - 0,207B$	$x = b_n + 0,41R_2 - 0,207B_y$
Размеры $n-1$ перехода	$B_{n-1} = 2R_{bn-1},$ $A_{n-1} = A + 2 \cdot b_n$	$B_{n-1} = B + 2 \cdot a_n,$ $A_{n-1} = A + 2 \cdot b_n$
Радиус $n-2$ перехода	$R_{bn-2} = R_{bn-1} / m_{n-1}$	$R_{yn-2} = R_{yn-1} / m_{n-1}$
Расстояние между переходами	$b_{n-1} = \frac{R_{bn-2} - R_{bn-1}}{x_1},$ $a_{n-1} = R_{bn-2} - R_{bn-1}$	$B_{n-1} = R_{yn-2} - R_{yn-1},$ $a_{n-1} = x \cdot b_{n-1}$
Размеры $n-2$ перехода	$B_{n-2} = 2R_{bn-2},$ $A_{n-2} = A + 2 \cdot (b_n + b_{n-1})$	$B_{n-2} = B + (a_n + a_{n-1}),$ $A_{n-2} = A + 2 \cdot (b_n + b_{n-1})$
Высота коробки	По чертежу	По чертежу
Высота переходов	Определяется по формуле (14)	Определяется по формуле (14)

Согласно изложенной методике для второй схемы размеры предпоследнего перехода определяются следующим образом.

$$\begin{aligned}
 B_{n-1} &= B + 2 \cdot a_n; \quad D_{n-1} = D + 2 \cdot b_n; \quad R_{yn-1} = 0.5B_y + b_n; \\
 BF_{n-1} &= B_{n-1} + BF - B; \quad DF_{n-1} = D_{n-1} + DF - D; \\
 H_1 &= \frac{A}{C} + R_1 + R_3 + 2 \cdot s,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

где H_1 – высота перехода;

$$\begin{aligned}
 A &= V_{кор.фл.} - \pi s \left[\left(\frac{2(R_{yn-1} + s) + BF - B}{2} \right)^2 - (R_{yn-1} + R_3 + s)^2 \right] - \\
 &- \pi \left\{ (R_{yn-1} - R_1)^2 s + \frac{2}{3} [(R_{yn-1} - s)^3 - R_1^3] + \frac{\pi}{2} (R_{yn-1} - R_1) [(R_{yn-1} + s)^2 - R_1^2] \right\} - \\
 &- \frac{\pi^2}{2} (R_{yn-1} + R_3 + s) [(R_3 + s)^2 - R_3^2] - \frac{2}{3} \pi [R_3^2 - (R_3 + s)^3] - \\
 &- \frac{\pi s}{2} (2R_3 + s)(D - 2R_2 - 2s) - \frac{\pi s}{2} (2R_3 + s)(B - 2R_{yn-1} - 2s) - \\
 &- s(D_{n-1} - 2R_{yn-1} - 2s)(BF_{n-1} - B_{n-1} - 2R_3) - s(B_{n-1} - 2R_{yn-1} - 2s) \times \\
 &\times (DF_{n-1} - D_{n-1} - 2R_3), \\
 C &= [\pi s(2R_{yn-1} + s) + 2s(B_{n-1} - 2 \cdot R_{yn-1} - 2 \cdot s) + 2s \cdot (D_{n-1} - 2 \cdot R_{yn-1} - 2 \cdot s)].
 \end{aligned}$$

Решение задачи раскроя листов на круглые заготовки выполняется с использованием алгоритмов, предложенных в [3]. Задача раскроя листового материала на овальные заготовки решается с учетом рекомендаций [6] по следующему алгоритму. Овал вписывается в заготовку прямоугольной формы с учетом перемычек, необходимых для вырубki развертки в штампе (рис. 4).

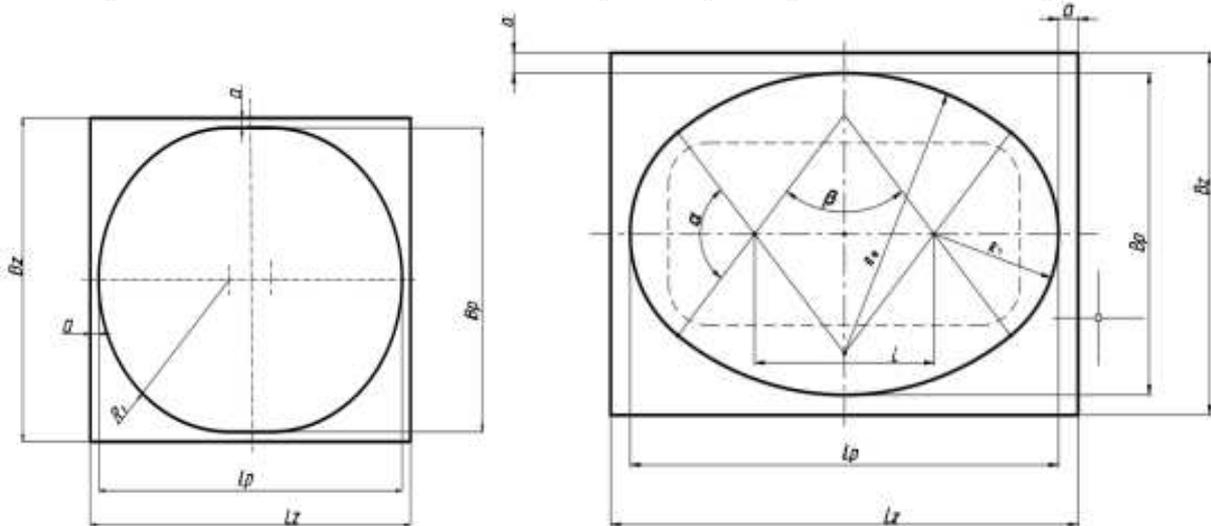


Рис. 4. Заготовки для раскроя

В данной работе вид раскроя будет смешанным. При неизменных размерах заготовки варьируемые параметры: размеры листа, вид раскроя листа на полосы и вид раскроя заготовок в полосе. При данном раскрое часть полос располагается вдоль листа, а часть – поперек, его выполняют методом наилучшего заполнения

короткой стороны листа. Для решения этой задачи применяется метод динамического программирования. Полученные алгоритмы использованы для разработки программного модуля, который позволяет получить чертеж детали и заготовки, карт эскизов и раскроя и включен в состав САПР автоматизированного проектирования технологических процессов холодной листовой штамповки.

Список литературы

1. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1980. – 432 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1979. – 520 с.
3. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1989. – 304 с.
4. SolidWorks – САПР промышленного масштаба [Электронный ресурс] // САПР и Графика. – URL: <https://sapr.ru/article/6786>.
5. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2011 на примерах. – СПб.: БХВ – Петербург, 2011. – 496 с.
6. Канторович Л.В., Залгаллер В.А. Рациональный раскрой промышленных материалов. – М.: Изд-во «Наука», 1971. – 298 с.

Сведения об авторе:

Кондратьев Владимир Иванович – к.т.н., доцент.