

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

*Кондратьев В.И.*

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

**Ключевые слова:** штамповка, методика, САПР, модуль, заготовка, технология, параметры, деталь, объем, раскрой, проектирование, коробка, алгоритм, совершенствование, карта раскроя.  
**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 и разработан программный модуль формирования чертежей детали и заготовки и карты раскроя, который включен в состав САПР.

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

*Kondratyev V.I.*

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg*

**Keywords:** punching, technique, CAD, module, preparation, technology, parameters, detail, volume, open, designing, box, algorithm, perfection, card opening.

**Abstract.** The work theme is devoted perfection of designing of manufacturing techniques of details by ways of sheet punching. Are offered a number of formulas for calculation of parameters of preparations and algorithms for card reception opening for an extract of high square and rectangular boxes and the program module of formation of drawings of a detail and preparation and a card opening, which insert in structure CAD system.

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 (рис. 1).

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

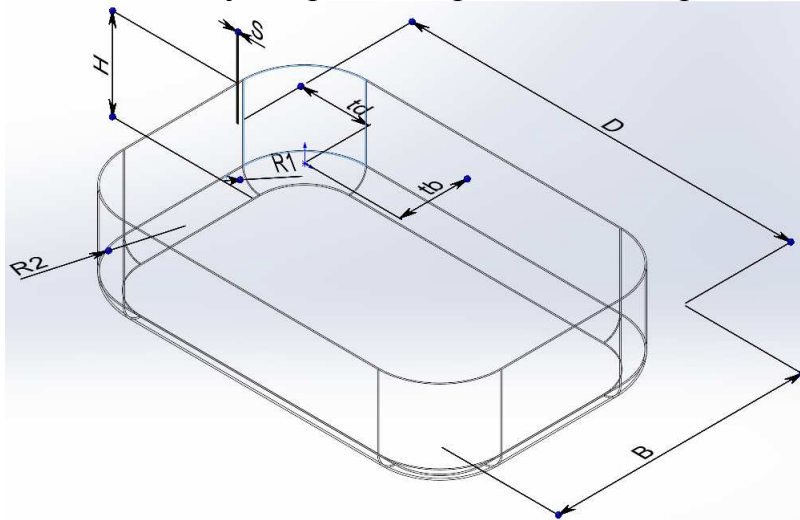


Рис. 1. Параметры коробки

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

$$\begin{aligned}
 V_{нк} = & \left\{ (R_2 - R_1)^2 \cdot S + \frac{2}{3} \cdot [(R_1 + S)^3 - R_1^3] + \frac{\pi}{2} \cdot (R_2 - R_1) \cdot [(R_1 + S)^2 - R_1^2] \right\} + \\
 & + \pi \cdot S \cdot (H - R_1 - S) \cdot (2 \cdot R_2 + S) + 2 \cdot S \cdot (H - R_1 - S) \cdot [B + D - 4 \cdot (R_2 + S)] + \\
 & + S \cdot [2 \cdot B \cdot (R_1 + S)] \cdot [D - 2 \cdot (R_1 + S)] - S \cdot (4 - \pi) \cdot (R_2 - R_1)^2 + \\
 & + \pi \cdot S \cdot (2 \cdot R_1 + S) \cdot \frac{[2 \cdot (B + D - 8 \cdot (R_2 + S))]}{4} - \pi \cdot S \cdot (R_2 - R_1)^2. \quad (1)
 \end{aligned}$$

При определении размеров заготовки следует учитывать также и соотношение размеров детали: относительной высоты  $\frac{H}{B}$ , относительного радиуса закругления в углах  $\frac{R_2}{B}$  и у дна  $\frac{R_1}{B}$  и относительной толщины  $\frac{S}{D} \cdot 100$ .

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

$$D_3 = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{кк}}{\pi \cdot S}}, \quad (2)$$

где  $V_{кк}$  – объем квадратной коробки с длиной стороны  $B$ ,

$$\begin{aligned}
 V_{\text{кк}} = & \left\{ (R_2 - R_1)^2 \cdot S + \frac{2}{3} \cdot [(R_1 + S)^3 - R_1^3] + \frac{\pi}{2} \cdot (R_2 - R_1) \cdot [(R_1 + S)^2 - R_1^2] \right\} + \\
 & + \pi \cdot S \cdot (H - R_1 - S) \cdot (2 \cdot R_2 + S) + 4 \cdot S \cdot (B - 2 \cdot R_2 - 2 \cdot S) \cdot (H - R_1 - S) + \\
 & + S \cdot (B - 2 \cdot R_1 - 2 \cdot S)^2 - S \cdot (R_2 - R_1)^2 \cdot (4 - \pi) + \pi \cdot S \cdot (2 \cdot R_1 + S) \times \\
 & \times (B - 2 \cdot R_2 - 2 \cdot S) - \pi \cdot S \cdot (R_2 - R_1)^2. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Согласно [1] для весьма высоких прямоугольных коробок также может быть выбрана круглая заготовка.

Для случая высоких прямоугольных коробок заготовка имеет овальную форму. При этом различают два случая [2].

Суть первого варианта согласно [1, 2] (рис. 2) заключается в построении овала с помощью двух полуокружностей и двух касательных к ним.

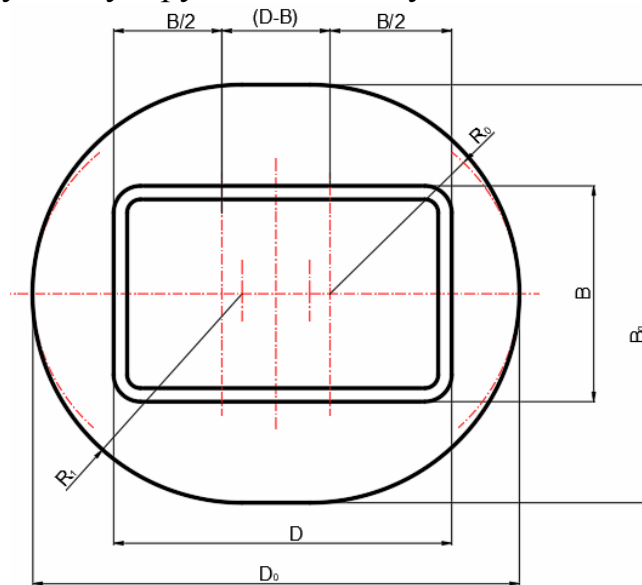


Рис. 2. Параметры овальной заготовки

В работе [3] для ориентировочных расчетов приводится выражение для

$$R_o = (1,13 \cdot \sqrt{B \cdot (B + 4 \cdot H)}) / 2.$$

А для более точных расчетов в [3], когда  $R_1 = R_2 = R$  для  $R_o$  предлагается выражение

$$R_o = \left( 1,13 \cdot \sqrt{B^2 \cdot 4 \cdot B \cdot (H - 0,43 \cdot R) - 1,72 \cdot (H + 0,33 \cdot R)} \right) / 2.$$

Согласно методике расчета заготовок, приведенной в [1], предлагается формула для расчета параметра  $R_o$  “выведенная из условия равномерного увеличения высоты коробки со всех сторон”:

$$R_o = \frac{D_3 \cdot (B - 2 \cdot R_1) + [B + 2 \cdot (H + 0,43 \cdot R_1)] \cdot (D - B)}{2 \cdot (D - 2 \cdot R_1)}.$$

Применение этих зависимостей связано с повышенным расходом металла.

В настоящей работе приводится уточненный алгоритм построения заготовки по этой схеме, который сводится к следующему.

1. Из условия постоянства объема по формуле (1) рассчитывается объем коробки.

2. Из условия постоянства объема для случая вытяжки квадратной коробки, полученной соединением двух боковых частей детали шириной  $B/2$  с использованием формул (1) и (2) определяем радиус  $R_o$ .

3. С учетом постоянства объема определяем ширину заготовки  $B_p$  и длину

$$D_p = D - B + 2 \cdot R_o.$$

4. Выполняется корректировка радиуса заготовки  $R_o$  до  $R_o = B_p / 2$ .

В этом случае также не выполняется условие сохранения постоянства объема.

5. Поэтому может проводиться корректировка  $B_p$  и соответственно  $R_o$  с учетом постоянства объема заготовки, а именно:

$$B_p = \frac{-2 \cdot (D - B) + \sqrt{4 \cdot (D - B)^2 + 4 \cdot \pi \cdot \frac{V_{KK}}{S}}}{\pi}$$

и

$$B_p = \frac{-2 \cdot (D - B) + \sqrt{4 \cdot (D - B)^2 + 4 \cdot \pi \cdot \frac{V_{KK}}{S}}}{2 \cdot \pi}.$$

Согласно рекомендациям [1], когда разность габаритных размеров заготовки  $D_p$  и  $B_p$  не больше 3% для небольших коробок и 5% для деталей средней величины, в качестве заготовки можно брать круг диаметром  $D_p$ .

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  $R_b$  определяем по формуле (2), а радиус  $R_a$  определим из такого расчета, чтобы дуга соприкасалась с окружностями  $R_b$  и обеспечивалось равенство прибавляемых и вычитаемых площадей

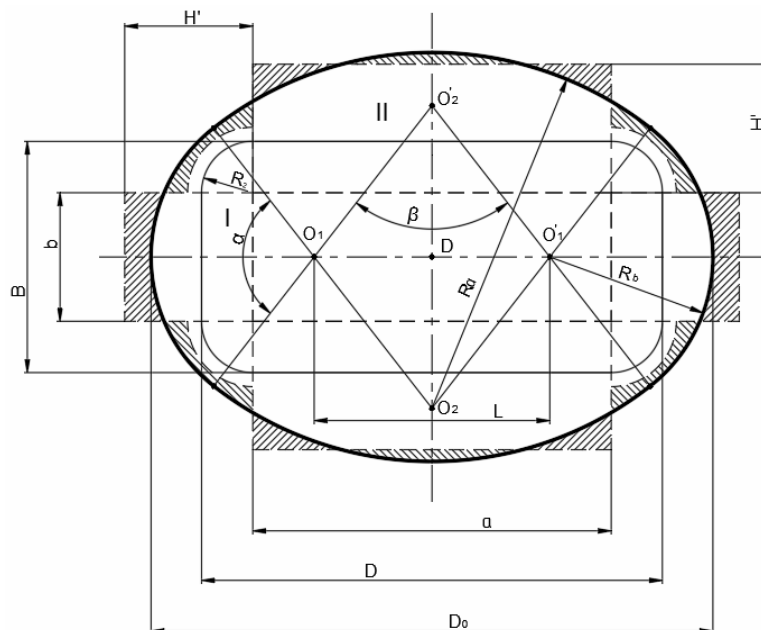


Рис. 3. Параметры заготовки

Выполним расчет параметров овальной заготовки.

$$\beta = \pi - \alpha. \quad (4)$$

Площадь сектора I

$$S_{\beta} = \frac{\alpha \cdot R_b^2}{2} - (\alpha - \text{в радианах}).$$

Площадь сектора II

$$S_{\alpha} = \frac{\beta \cdot R_a^2}{2} - (\beta - \text{в радианах}).$$

Площадь прямоугольника  $O_1O_2O_1'O_2'$

$$S_{O_1O_2O_1'O_2'} = (R_a - R_b)^2 \cdot \sin \alpha$$

Площадь заготовки

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

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

Значение  $R_b$  согласно [2] определяется по формуле

$$R_b = b \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{H'}{B} + \frac{R^2}{B^2}}. \quad (5)$$

Здесь  $H' = H + 0,57 \cdot R_1$ ;  $b = B - 2 \cdot R_1$

Можно также определить

$$R_b = \frac{D_3}{2}, \quad (6)$$

$$R_a = R_b + \frac{L}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (7)$$

С учетом полученных зависимостей

$$S_z = \left[ \alpha \cdot R_b^2 + (\pi - \alpha) \cdot \left( R_b + \frac{L}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)^2 \right] - \left( \frac{L}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right)^2 \cdot \sin \alpha. \quad (8)$$

Анализ конструкции овала согласно рисунку 3, показывает, что при определении параметра  $R_b$  по формуле (6) и параметра  $L$  аналогично первому методу по выражению  $(D - B)$  изменение угла  $\alpha$  до значения  $\pi$  приведет к геометрии заготовки овала, получаемой по первому методу, а при уменьшении значения разности параметров  $(D - B)$  форма заготовки приближается к круглой.

С учетом полученных зависимостей разработан алгоритм расчета параметров овальной заготовки для высоких прямоугольных коробок при  $R_2 / B > 2$ .

1. Используя (6), рассчитываем  $R_b$ .
2. Определяем параметр  $L = (D - B)$ .

3. Определяем  $\alpha$  и корректируем  $R_b$  таким образом, чтобы обеспечивалось равенство объемов детали и заготовки  $S \cdot S_z = V_{нк}$  и отклонение значения  $R_b$  было минимальным от значения, определяемого по выражению (5).

Решение задачи раскроя листов на круглые заготовки выполняется с использованием алгоритмов, предложенных в [3], где рассматриваются варианты параллельного, шахматного и косоугольного раскроя.

Задача раскроя листового материала на овальные заготовки решается с учетом рекомендаций [5] по следующему алгоритму.

Овал вписывается в заготовку прямоугольной формы с учетом перемычек, необходимых для вырубki развертки в штампе (рис. 4).

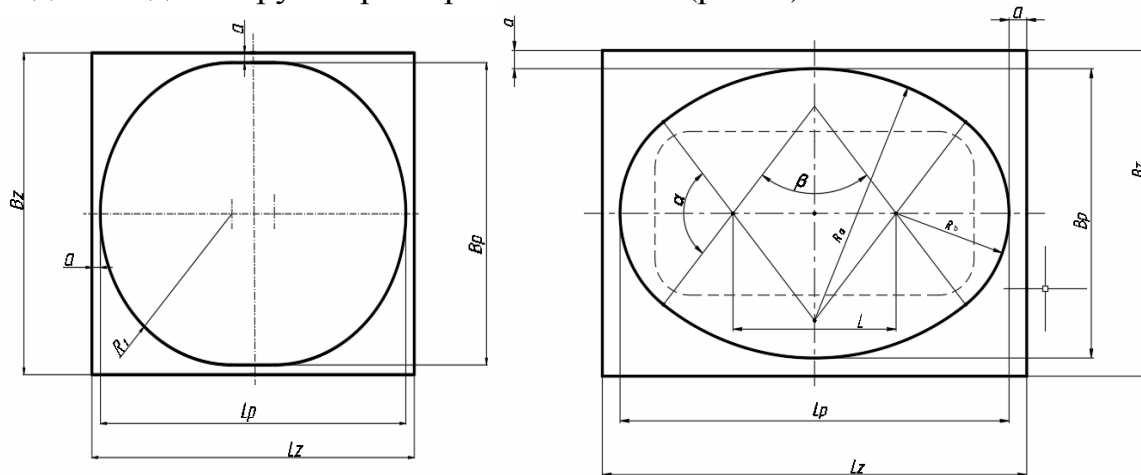


Рис. 4. Заготовки для раскроя

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.

*Исходные данные:*

$B$  – ширина листа;  $L$  – длина листа;

$B_z$  – ширина заготовки;  $L_z$  – длина заготовки.

Требуется определить оптимальное число заготовок, которые можно разместить вдоль ширины листа [5].

*Решение*

А. Определяется число шагов итерации:  $n = 2$ .

Б. Рассчитывается максимальное число заготовок размером  $B_z$ , уместяющихся вдоль ширины листа:  $m = \text{int}(B / B_z)$ .

С. Определяется длина остатка листа после размещения  $m$  заготовок вдоль ширины листа:  $DLT = B - m \cdot B_z$ .

Д. Определяется максимальное число заготовок размером  $L_z$ , уместяющихся вдоль ширины листа:  $q = \text{int}(B / L_z)$ .

Е. Определяется значение функции цели на этапе 1, которая имеет вид:

$$f_1(x_1) = \max_{k_1} \{B_z \cdot k_1\},$$

где  $\max\{k_1\} = m$ ,  $x_1 = (DLT + 0 \cdot B_z, DLT + 1 \cdot B_z, \dots, DLT + m \cdot B_z)$ .

Помещаются в таблицу сравниваемые допустимые решения для каждого значения  $x_1$ .

Табл. 1

$x_1$	$B_z \cdot k_1$				Оптимальное решение	
	$k_1 = 0$	$k_1 = 1$	...	$k_1 = m$	$f_1(x_1)$	$k_1'$
$DLT + 0 \cdot B_z$	0	–	–	–	0	0
$DLT + 1 \cdot B_z$	0	$B_z$	–	–	$B_z$	1
...	...	...	...	...	$2 \cdot B_z$	2
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
$DLT + m \cdot B_z$	0	$B_z$	$2 \cdot B_z$	$m \cdot B_z$	$m \cdot B_z$	$m$

Ж. Определяется значения функции цели на этапе 2, которая имеет вид:

$$f_2(x_2) = \max_{k_1} \{L_z \cdot k_2 + f_2(x_2 - L_z \cdot k_2)\}.$$

Помещаются в таблицу 2 сравниваемые допустимые решения для каждого значения  $x_2$ .

Табл. 2

$x_2$	$L_z \cdot k_2 + f_2(x_2 - L_z \cdot k_2)$						Оптимальное решение	
	$k_2 = 0$	$k_2 = 1$	...	$k_2 = \gamma$	.....	$k_2 = q$	$f_2(x_2)$	$k_2^{i\gamma}$
$DLT + 0 \cdot B_z$	0	–	–	–	–	–	0	0
$DLT + 1 \cdot B_z$	$F_{10}$	–	–	–	–	–	$\max F_{1\lambda}$	$k_2^{1\gamma}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$DLT + i \cdot B_z$	$F_{i0}$	$F_{i1}$	...	$F_{i\gamma}$	...	$F_{ip}$	$\max F_{i\lambda}$	$k_2^{i\gamma}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$DLT + m \cdot B_z$	$F_{m0}$	$F_{m1}$	.....	$F_{m\gamma}$	.....	$F_{mp}$	$\max F_{m\lambda}$	$k_2^{m\gamma}$

Здесь  $i = (0, 1, 2, \dots, m)$ ;  $\gamma = (0, 1, 2, \dots, q)$  и если

$$(DLT - L_z \cdot k_{2\gamma}) \geq L_z \cdot k_{2\gamma} \Rightarrow F_{i\gamma} = L_z \cdot k_{2\gamma} + \text{int} \left\{ \frac{DLT + i \cdot B_z - L_z \cdot k_{2\gamma}}{B_z} \right\} \cdot B_z,$$

иначе  $F_{i\gamma} = i \cdot B_z$ .

Одинаково ориентированные заготовки группируются по ширине листа, что позволяет в ряде случаев, когда разность длины листа и суммарной длины

заготовок, размещенных вдоль листа больше ширины заготовки, а суммарная ширина этих заготовок больше длины заготовки, разместить дополнительные заготовки.

Из имеющихся листов выбирается лист с наибольшим коэффициентом использования металла.

С применением полученных зависимостей разработан программный модуль и включен в состав САПР для автоматизированного проектирования технологии изготовления деталей, изготавливаемых методами листовой штамповки.

#### **Список литературы**

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. 782с.
2. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 303с.
3. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1967. 504с.
4. Тарновский И.Я., Вайсбурд Р.А., Еремеев Г.А. Автоматизация проектирования технологии горячей штамповки. М.: Машиностроение, 1969. 208с.
5. Канторович Л.В., Залгаллер В.А. Рациональный раскрой промышленных материалов. М.: Наука, 1971. 298с.

#### Сведения об авторе:

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