

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ, РАЗМЕРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗКИ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ПАРАМИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОПРАВОК

*Розглянуто другу стадію процесу розрізування тонкостінних трубчатих заготовок при одночасному поперечному зсуві і скручуванні. Встановлені форма та розміри осередку деформації а також розміри зон контакту трубчастої заготовки з елементами технологічного оснащення. Визначені основні залежності, які характеризують процес розрізування тонкостінних трубчатих заготовок даним способом. Підготовлені всі необхідні дані для побудови, програмними методами, діаграм  $P(\varphi)$  та  $M(\varphi)$ , які необхідні для визначення енергосилових параметрів різання.*

*The second stage of the process non-polluting cutting thin tubular preparations at simultaneous cross shift and torsion are considered. The shape and sizes of the deformation zone, and also the sizes of zones of contact tubular preparation with elements of technological equipment are fixed. Main relations, which describe cutting tubular preparations, are established. All necessary data for create, by program methods, the diagrams  $P(\varphi)$  and  $M(\varphi)$ , that are needed for determine the energy-force parameters of a cutting is prepared.*

## Введение

Способы отрезки труб на короткие заготовки делятся исходя из различных технологических параметров производства изделия, а также параметров самого процесса отрезки [1]. Эффективность производства деталей из сортового проката существенно зависит от заготовок, экономичность и качество которых должны быть достигнуты при минимальных затратах. Таким образом, можно выделить две группы способов отрезки труб на короткие заготовки: резку с отходами при образовании поверхности среза и безотходную резку сдвигом. К недостаткам методов безотходной резки сдвигом (поперечным или кручением) следует отнести невысокое качество отрезанных заготовок. Для получения трубчатых тонкостенных заготовок (ТТЗ) с торцевой поверхностью максимально приближенной к плоскости, перпендикулярной ее оси, был предложен способ резки при одновременном действии крутящего момента и поперечного сдвига [2]. Сдвиг с одновременным кручением позволяет улучшить поверхность среза, повысить точность и производительность отрезки. Последовательность первой стадии процесса резки ТТЗ парами вращающихся оправок детально рассмотрена в [3], где приведены формулы для определения формы, размеров очага деформации и энергосиловых параметров данного процесса резки ТТЗ парами вращающихся оправок.

**Целью данной статьи** является рассмотрение второй стадии процесса резки ТТЗ парами вращающихся оправок, которая начинается при условии:

$$f_{\max} \geq R_{\text{нар}} - R_{\text{вн}} \quad (1)$$

На рис. 1 показаны характерные зоны среза при угле поворота  $\varphi/2$ .

На участке границы внутренней поверхности заготовки  $A_2KA'_2$  и участке границы наружной поверхности заготовки  $B'_2KB_2$  режущая кромка втулки и оправки перерезали стенку заготовки. Сегменты  $A_2KA'_2L$  и  $B'_2LB_2K'$  лежат вне пределов поперечного сечения. Текущая площадь среза ограничена четырьмя криволинейными треугольниками  $A'_2A_1B_1$  и  $B'_2B_1A_1$  с одной стороны,  $A_2A_1B_1$  и  $B_2B_1A_1$  – с диаметрально противоположной стороны. Для определения площади среза достаточно определить площадь криволинейного треугольника  $A'_2A_1B_1$ , т.к. площади остальных криволинейных треугольников в пределах погрешностей вычислений равны. Координаты точек  $A_1B_1$  и  $A'_1B'_1$  определяются проекцией отрезка  $O_2A'_1$  и  $O_2B'_1$  на ось  $OX$ , то из

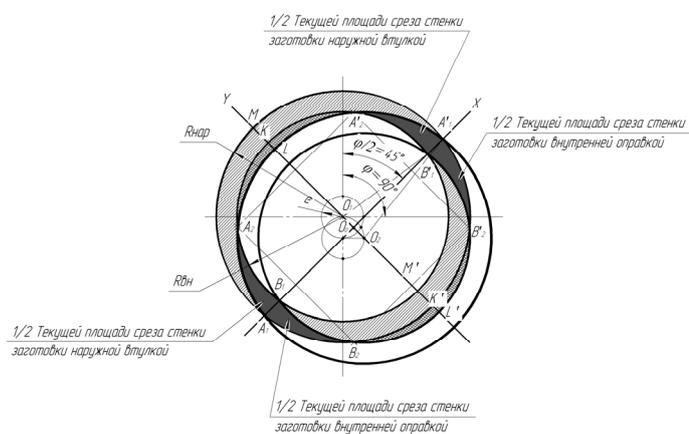


Рис. 1. Характерные зоны среза ТТЗ при угле поворота оправок, равному  $\pi/2$

прямоугольных треугольников  $O_2O_0A'_1$  и  $O_2O_0B'_1$  находим:

$$X_{A'_1} = \left( \sqrt{R_{нар}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}, Y_{A'_1} = 0 \right); X_{B'_1} = \left( -\sqrt{R_{вн}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}, Y_{B'_1} = 0 \right) \quad (2)$$

Координаты точки  $A'_2$  находим как точку пересечения границы правой втулки при повороте эксцентрика на угол  $\varphi$  с границей внутренней поверхности заготовки. Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} x^2 + (y + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2})^2 = R_{нар}^2 \\ x^2 + (y - e \cdot \sin \frac{\varphi}{2})^2 = R_{вн}^2 \end{cases} \quad (3)$$

Откуда, отняв от первого уравнения второе, получим:

$$2ye \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = R_{нар}^2 - R_{вн}^2 \quad (4)$$

Следовательно:

$$y = \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (5)$$

Подставляя это значение  $y$  в одно из уравнений системы (3), получим:

$$x^2 + \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 = R_{нар}^2, \quad x_{1,2} = \pm \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \quad (6)$$

Следовательно:

$$\left( X_{A'_2} = \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}; Y_{A'_2} = \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \right) \quad (7)$$

$$\left( X_{A_2} = -\sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}; Y_{A_2} = \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \right) \quad (8)$$

Площадь внедрения правой втулки в стенку заготовки найдем как разность площадей криволинейных трапеций:

$$S(\varphi)_{A_1MA'_1A'_2K} = \begin{pmatrix} X_{A'_1} & X_{A'_1} \\ \int y_1(x)dx & \int y_2(x)dx \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_{A'_2} & X_{A'_2} \\ \int y_3(x)dx & \int y_2(x)dx \end{pmatrix} \quad (9)$$

В этом уравнении:

$y_1(x)$  – уравнение дуги внешней поверхности заготовки;

$y_2(x)$  – уравнение дуги внутренней поверхности заготовки;

$y_3(x)$  – уравнение дуги правой втулки.

Разница первых двух интегралов дает площадь, которую описал контур наружной втулки с точки касания до момента выхода со стенки (т.  $A_1, A'_1$ ).

Разница двух других интегралов дает площадь, которую описывает контур наружной втулки после пересечения внутреннего контура заготовки (т.  $A_2, A'_2$ ).

Разница между ними дает текущее значение площади, на которую внедрилась наружная втулка в заготовку, т.е. абсолютный сдвиг:

$$\Delta F(\varphi) = S(\varphi)_{A_1MA'_1A'_2K} \quad (10)$$

и соответствующий ему относительный сдвиг:

$$\psi(\varphi) = \frac{S(\varphi)}{F_0} \quad (11)$$

Текущая площадь среза, которая определяется через площадь криволинейного треугольника  $A'_1A'_2B'_1$  равна:

$$F_{ср}(\varphi) = 4 \cdot \begin{pmatrix} X_{A'_1} & X_{B'_1} \\ \int y_3(x)dx & \int y_2(x)dx \\ X_{A'_2} & X_{A'_2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Подставляя в интегралы выражение для  $y_2(x)$  и  $y_3(x)$  (см. [1]) получим:

$$F_{cp}(\varphi) = 4 \cdot \left[ \int_{X_{A_2}'}^{X_{A_1}'} (-e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{R_{нар}^2 - x^2}) dx - \int_{X_{A_2}'}^{X_{B_1}'} (e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{R_{вн}^2 - x^2}) dx \right] \quad (13)$$

После интегрирования, подстановки пределов интегрирования, а также значений координат точек  $X_{A_1}'$ ,  $X_{B_1}'$ ,  $X_{A_2}'$ , получим окончательное выражение для вычисления текущей площади среза на второй стадии разделения ТТЗ:

$$S_{cp}(\varphi) = 4 \cdot \left\{ \left[ -e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sqrt{R_{нар}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} + \sqrt{R_{вн}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} - 2 \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{4e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \right] + \right. \\ \left. \left[ \sqrt{R_{нар}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \times \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right) + R_{нар}^2 \cdot \arcsin \frac{\sqrt{R_{нар}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}}{R_{нар}} - \right. \right. \\ \left. \left[ \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{4e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} + R_{нар}^2 \cdot \arcsin \frac{\sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{4e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}}{R_{нар}} \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left[ \sqrt{R_{вн}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \times \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right) + R_{вн}^2 \cdot \arcsin \frac{\sqrt{R_{вн}^2 - \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}}{R_{вн}} \right] - \right. \\ \left. \left[ \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{4e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \times \sqrt{R_{вн}^2 - R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{4e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + R_{вн}^2 \cdot \arcsin \frac{\sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{4e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}}{R_{вн}} \right] \right\} \quad (14)$$

Площадь каждого из треугольников найдем как разницу интегралов:

$$F_{cp}'(\varphi) = \left[ \int_{X_{A_2}'}^{X_{A_1}'} y_3(x) dx - \int_{X_{A_2}'}^{X_{B_1}'} y_2(x) dx \right] \quad (15)$$

Общая текущая площадь среза наружной оправкой равна удвоенной разнице приведенных выше интегралов.

Уравнение дуги наружного периметра заготовки найдем из уравнения круга с центром в точке  $O_1$ :

$$x^2 + (y_1 + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2})^2 = R_{нар}^2 \quad (16)$$

Откуда:

$$y_1 = e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{R_{нар}^2 - x^2} \quad (17)$$

Аналогичное уравнение дуги контура наружной втулки после поворота эксцентрика на угол  $\varphi$ , будет:

$$y_2 = -e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{R_{нар}^2 - x^2} \quad (18)$$

И наконец, уравнение дуги внутреннего контура заготовки:

$$y_3 = e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{R_{нар}^2 - x^2} \quad (19)$$

Подставляя  $y_2$ ,  $y_3$ , из уравнений (18), (19) в интегралы выражения (15) найдем текущую площадь одного криволинейного треугольника.

Найдем площадь среза ТТЗ внутренней оправкой. Она ограничена площадью криволинейных треугольников  $A_1'A_3'B_1'$  и  $A_1A_3B_1$ . Координаты точек  $A_1'$ ,  $A_1$ ,  $B_1'$ ,  $B_1$  известны, а координаты точек  $A_3'$ ,  $A_3$  можно найти с общей связи уравнений наружного контура заготовки и контура внутренней оправки, которая сместилась на величину  $2e \cdot \sin \varphi / 2$ :

$$\begin{cases} x^2 + (y_3 + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2})^2 = R_{нар}^2 \\ x^2 + (y_3 - e \cdot \sin \frac{\varphi}{2})^2 = R_{вн}^2 \end{cases} \quad (20)$$

Откуда:

$$y_3 = -\frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (21)$$

Подставив выражение (20) в первое уравнение системы (19), получим:

$$x_3 = \pm \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \quad (22)$$

То есть, координаты точек  $A'_3, A_3$  следующие:

$$\left( X_{A'_3} = \sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}; Y_{A'_3} = -\frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \right) \quad (23)$$

$$\left( X_{A_3} = -\sqrt{R_{нар}^2 - \left( \frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} + e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}; Y_{A_3} = -\frac{R_{нар}^2 - R_{вн}^2}{2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \right) \quad (24)$$

Уравнение дуги  $A'_3B'_1$  находим из уравнений круга внутренней оправки с центром  $O_2$ :

$$y^2 + 2e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} y + \left( e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 - R_{вн}^2 + x^2 = 0; y_4 = -e \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \pm \sqrt{R_{вн}^2 - x^2} \quad (25)$$

Тогда площадь криволинейного треугольника  $B'_1A'_1A'_3$ , что составляет половину площади среза ТТЗ внутренней оправкой, найдем из уравнений:

$$S_{B'_1A'_1A'_3} = \int_{X_{A'_3}}^{X_{A'_1}} y_1(x) dx - \int_{X_{B'_3}}^{X_{B'_1}} y_4(x) dx \quad (26)$$

Площадь, которую опишет контур внутренней оправки найдем из уравнения:

$$S_{A_3A'A'_3} = \int_{X_B}^{X_{B_1}} y_4(x) dx - \int_{X_{B'_1}}^{X_{B'_3}} y_3(x) dx \quad (27)$$

Наконец, площадь, которую описала внутренняя оправка после того как перерезала часть стенки заготовки найдем из уравнения:

$$S_{A_3M'A_3} = \int_{X_{A'_3}}^{X_A} y_4(x) dx - \int_{X_{A'_3}}^{X_{A'_1}} y_1(x) dx \quad (28)$$

Усилие и крутящий момент определяются по формулам, выведенным для первой стадии.

#### Выводы.

1. Приведены формулы для определения формы, размеров очага деформации и энергосиловых параметров процесса резки тонкостенной трубчатой заготовки парами вращающихся оправок на второй стадии.

2. Пользуясь приведенными выше зависимостями можно программным методом построить диаграммы  $P_{ср}(\varphi)$  и  $M(\varphi)$  необходимые для определения энергосиловых параметров резки. Также эти диаграммы можно построить путем численного эксперимента пользуясь средствами графического пакета "Компас-График".

#### Список литературы

1. С.С. Соловцев. Безотходная резка сортового проката в штампах. - М.: Машиностроение, 1985.-176 с.
2. №50653 А В23D21/00 Спосіб різання труб на короткі заготовки; Автори: Розов Юрій Георгійович, Савченко Дмитро Миколайович Херсонський державний технічний університет, 15.10.2002р. Бюл.№10.
3. В.И. Стеблюк, Д.Н. Савченко, Д.Б. Шкарлута. Последовательность резки тонкостенной трубчатой заготовки сдвигом вращающихся оправок. // Вестник "ХПИ" – 2010. - №43 – С. 141-146.
4. В.И. Стеблюк, Д.Н. Савченко, Ю.Г. Розов. Способ резки труб на короткие заготовки и перспективы их усовершенствования. // Вестник НТУУ "КПИ" – 2008. - №53. – С. 199-201.