УДК 624.041

# ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОСТЕННОГО Z-ОБРАЗНОГО СТЕРЖНЯ ПРИ НАЛИЧИИ НАРУЖНОЙ ОТБОРТОВКИ С УСИЛЕНИЯМИ

***Волков Владимир Павлович,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».*

***Амузу Коку Бонавентюр,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,*

*студент.*

**Аннотация**

Статья посвящена определению геометрических характеристик гнутого тонкостенного стержня Z-образного профиля с закруглением при наличии наружной отбортовки с усилениями при расчете его на растяжение и изгиб с кручением. Приведены расчетные формулы для определения относительных значений длины контура, главных осевых моментов инерции и главных осевых моментов сопротивления, главных секториальных координат.

**Ключевые слова:** гнутый тонкостенный стержень, Z-образный профиль, главные центральные оси сечения, главные осевые моменты инерции, главные осевые моменты сопротивления, главные секториальные координаты.

# GEOMETRIC CHARACTERITICS THIN-WALLED Z-SHAPED ROD WITH OUT EDGE WITH REINFORCEMENTS

***Volkov Vladimir Pavlovich,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department «Mechanics».*

***Amuzu Koku Bonaventure***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*student.*

**Abstract**

Article is devoted to definition of the geometric characteristics of a buckler thin-walled rod Z-shaped profile with out edge with reinforcements for calculation this on tension, curve, turn. To deduce a formula of calculation dimensions length of contours, main axes moments of inertia and main axes moments of resistance, main sector coordinates.

**Keywords:** buckler thin-walled rod, Z-shaped profile, the main central axes section, main axes moments of inertia, main axes moments of resistance, main sector coordinates.

Условные обозначения (рис.1):

*XY* – главные центральные оси сечения;

*B=2b* – габаритная ширина срединной линии профиля сечения;

*H=2h* – габаритная высота срединной линии профиля сечения;

$\delta \ll h, b -$ постоянная толщина срединной линии профиля сечения;

$\delta_s$ – толщина наружной отбортовки;

$A_s$ – площадь сечения усиления наружной отбортовки;

*L* – полная длина срединной линии профиля сечения;

*r* – радиус закругления срединной линии профиля сечения станком;

*s* – длина наружной отбортовки;

$\gamma -$ угол между наклонной стенкой профиля и осью $X$;

$b_h = b/h -$ относительная ширина профиля сечения;

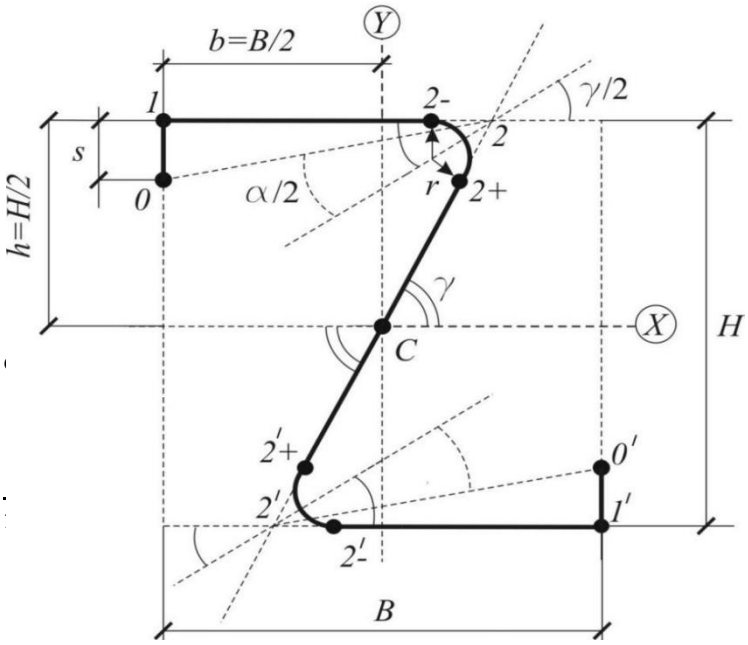
$s_h = s/h -$ относительная длина наружной отбортовки;

$r_h = r/h -$ относительный радиус закругления профиля сечения.

В статье рассматривается задача определения геометрических

размеров и геометрических характеристик сечения гнутого тонкостенного стержня

Z-образного сечения с закруглением $r$, толщиной $\delta$, с обратной отбортовкой толщиной $\delta_s$ длиной $s$ , которая усилена на конце стержнем, типа стрингера, сечением $A_s$ в точке 0 (рис.1), т.е. определяется относительная ширина сечения $b_h$, при заданных значениях угла $\gamma$ и величине $r$ Z-образного стержня, когда одна из главных центральных осей сечения параллельна полкам.




Дано: $0 < \boldsymbol{\gamma} < \frac{\pi}{2}$;

$0 \leq \boldsymbol{r_h} \leq$

Найти: $\boldsymbol{b_h}-$ ?

Рисунок 1 – Z-образный профиль с обычной отбортовкой

Случай, когда тонкостенный Z-образный стержень с закруглением *r,* толщиной $\delta$, с полками параллельными главной центральной оси, с обратной отбортовкой толщиной $\delta_s$ длиной $s$ без усиления этой наружной отбортовки на конце стержнем площадью сечения $A_s$, рассмотрен в [1].

Итак, учитывая центральную симметрию, рассмотрим верхнюю половину сечения (рисунок 2), причём, центр тяжести, центр изгиба или центр кручения всего сечения совпадают с центром симметрии, т.е. с точкой $\boldsymbol{C}$ (рисунок 1).

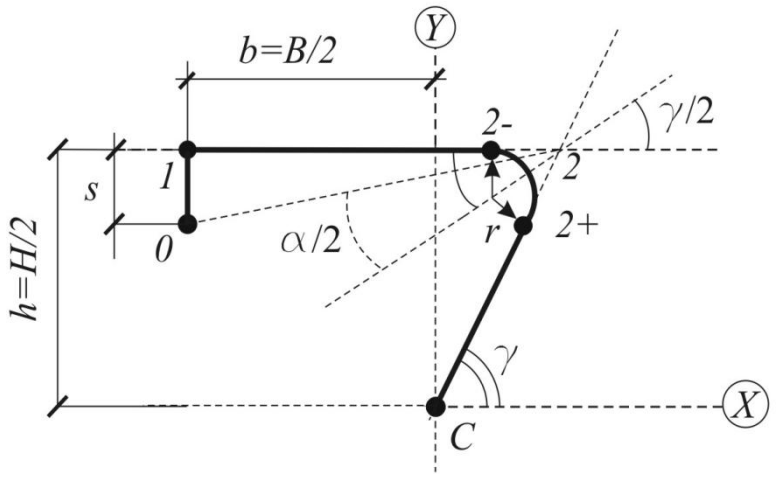



Рисунок 2 – Верхняя половина сечения с обычной отбортовкой $s$.

С - центр симметрии.

Декартовые координаты $x, y$ характерных точек и длины соответствующих участков $l$ (рисунок 2):

Для обратной отбортовки $s$:

$\boldsymbol{x_0 = -b}$, $y_0 = h + s$, $l_0 = s$;

$\boldsymbol{x_1 = -b}$, $y_1 = h$, $\boldsymbol{l_1 = b}$;

$x_{2-} = \frac{h}{\tan\gamma} - \frac{r}{\tan\frac{\gamma}{2}}$, $y_{2-} = h$, $l_{2-} = \frac{h}{\tan\gamma} - \frac{r}{\tan\frac{\gamma}{2}}$;

$x_{2+} = x_{2-} + r \cdot \sin\gamma$, $y_{2+} = h - r - r \cdot \cos\gamma$, $l_{2+} = \frac{h}{\sin\gamma} - \frac{r}{\tan\frac{\gamma}{2}}$.

Центральные оси $XY$ (рисунок 5) являются главными [7], если

$$I_{XY} = \int_0^{L/2} \delta(s) \cdot x(s) \cdot y(s) \cdot ds \Rightarrow 0,$$

$$\left(\frac{A_s}{\delta}\right) \cdot \boldsymbol{b} \cdot (h + s) + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot s \cdot \boldsymbol{b} \cdot \left(h + \frac{s}{2}\right) + \frac{h \cdot \boldsymbol{b^2}}{2} = \frac{l_{2-} \cdot x_{2-} \cdot y_{2-}}{2} + \frac{l_{2+} \cdot x_{2+} \cdot y_{2+}}{3} +$$

$$+ \int_0^{\pi-\gamma} (x_{2-} + r \cdot \sin\varphi) \cdot (h - r + r \cdot \cos\varphi) \cdot r \cdot d\varphi,$$

$$\left(\frac{A_s}{\delta}\right) \cdot \boldsymbol{b} \cdot (h + s) + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot s \cdot \boldsymbol{b} \cdot \left(h + \frac{s}{2}\right) + \frac{h \cdot \boldsymbol{b^2}}{2} = \frac{l_{2-} \cdot x_{2-} \cdot y_{2-}}{2} + \frac{l_{2+} \cdot x_{2+} \cdot y_{2+}}{3} +$$

$$+ r \cdot \left( \left(x_{2-} \cdot (\pi - \gamma) + r \cdot (1 + \cos\gamma)\right) \cdot (h - r) + \left(x_{2-} + \frac{r \cdot \sin\gamma}{2}\right) \cdot r \cdot \sin\gamma \right),$$

где, вводя обозначения

$$x_h = \frac{x_{2-}}{h} = \frac{1}{\tan\gamma} - \frac{r_h}{\tan{}^{\gamma}/_{2}}, \qquad \beta = \pi - \gamma,$$

относительное значение $\boldsymbol{b_h} > 0$ найдем из решения квадратного уравнения:

$$\boldsymbol{b_h^2} + \boldsymbol{b_h} \cdot \left(\left(\frac{A_s}{\delta}\right) \cdot (1 + s_h) + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot s_h \cdot (2 + s_h)\right) -$$

$$-x_h^2 - \frac{2}{3} \cdot (x_h + r_h \cdot \sin\gamma) \cdot \left(1 - r_h \cdot (1 + \cos\gamma)\right) \cdot \left(\frac{1}{\sin\gamma} - \frac{r_h}{\tan{}^{\gamma}/_{2}}\right) -$$

$$-2 \cdot r_h \cdot \left(\left(x_h \cdot \beta + r_h \cdot (1 + \cos\gamma)\right) \cdot (1 - r_h) + \left(x_h + \frac{r_h \cdot \sin\gamma}{2}\right) \cdot r_h \cdot \right.$$

$$\left. \sin\gamma \right) =$$

$$= 0. \qquad (1)$$

Введем обозначения для относительных координат точек и относительных длин участков:

$\boldsymbol{x_{0h}} = -\boldsymbol{b_h}, \quad y_{0h} = 1 + s_h, \qquad l_{01h} = s_h;$

$\boldsymbol{x_{1h}} = -\boldsymbol{b_h}, \quad y_{1h} = 1, \qquad \boldsymbol{l_{12-h}} \Rightarrow \boldsymbol{b_h} + \frac{1}{\tan\gamma} - \frac{r_h}{\tan{}^{\gamma}/_{2}}.$

$x_{2+h} = x_h + r_h \cdot \sin\gamma, \qquad y_{2+h} = 1 - r_h - r_h \cdot \cos\gamma, \qquad l_{2+h} = \frac{1}{\sin\gamma} - \frac{r_h}{\tan{}^{\gamma}/_{2}}.$

Относительная длина контура гнутого Z-образного профиля $L/H$:

$$\boldsymbol{l_h} = \frac{\boldsymbol{L}}{H} = \frac{{}^{\boldsymbol{L}}/_{2}}{h} \Rightarrow \cdot (s_h + \boldsymbol{b_h} + x_h) + r_h \cdot \beta + \left(\frac{1}{\sin\gamma} - \frac{r_h}{\tan{}^{\gamma}/_{2}}\right), \qquad (2)$$

$$\text{где } {}^{\boldsymbol{L}}/_{2} = s + \boldsymbol{b} + x_{2-} + r \cdot \beta + l_{2+},$$

Относительная площадь гнутого Z-образного профиля $A/(\delta \cdot H)$:

$$\boldsymbol{A_{\delta h}} = \frac{\boldsymbol{A}}{\delta \cdot H} = \frac{\boldsymbol{A}}{2 \cdot \delta \cdot h} \Rightarrow \left(\frac{A_s}{\delta \cdot h}\right) + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot s_h + \boldsymbol{b_h} + x_h + r_h \cdot \beta + l_{2+h}, \qquad (3)$$

$$\text{где } \boldsymbol{A} = 2 \cdot \delta \cdot \left(\left(\frac{A_s}{\delta}\right) + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot s + \boldsymbol{b} + x_{2-} + r \cdot \beta + l_{2+}\right).$$

Главные осевые моменты инерции (рисунок 2) определяются по формулам:

$$\boldsymbol{I_X} = \int_A y^2(s)\cdot dA \Rightarrow 2\cdot \int_{L/2} \delta(s)\cdot y^2(s)\cdot ds \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2\cdot\delta\cdot$$

$$\left\{\begin{array}{c}\left(\frac{A_s}{\delta}\right)\cdot y_0^2 + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right)\cdot\frac{l_{01}}{3}\cdot(y_0^2 + y_1^2 + y_0\cdot y_1) + \boldsymbol{l_{12-}}\cdot h^2 + \frac{l_{2+}}{3}\cdot y_{2+}^2 + \\ + \int_0^{\beta}(h - r + r\cdot\cos\varphi)^2\cdot r\cdot d\varphi\end{array}\right\},$$

$$\boldsymbol{I_x}\cdot\frac{1}{2\cdot\delta\cdot h^3} \Rightarrow \left(\frac{A_s}{\delta\cdot h}\right)\cdot y_{0h}^2 + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right)\cdot\frac{l_{01h}}{3}\cdot(y_{0h}^2 + y_{1h}^2 + y_{0h}\cdot y_{1h}) + \boldsymbol{l_{12-h}} +$$

$$\frac{l_{2+h}}{3}\cdot y_{2+h}^2 +$$

$$+r_h\cdot\left[(1-r_h)^2\cdot\beta + 2\cdot r_h\cdot(1-r_h)\cdot\sin\gamma + r_h^2\cdot\frac{\beta-\sin\gamma\cdot\cos\gamma}{2}\right]; \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{I_Y} = \int_A x^2(s)\cdot dA \Rightarrow 2\cdot \int_{L/2} \delta(s)\cdot x^2(s)\cdot ds \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2\cdot\delta\cdot$$

$$\left\{\begin{array}{c}\left(\frac{A_s}{\delta}\right)\cdot \boldsymbol{b^2} + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right)\cdot l_{01}\cdot \boldsymbol{b^2} + \frac{\boldsymbol{l_{12-}}}{3}\cdot\left(\boldsymbol{x_1^2} + x_{2-}^2 + \boldsymbol{x_1}\cdot x_{2-}\right) + \frac{l_{2+}}{3}\cdot x_{2+}^2 + \\ + \int_0^{\beta}(x_{2-} + r\cdot\sin\varphi)^2\cdot r\cdot d\varphi\end{array}\right\},$$

$$\boldsymbol{I_y}\cdot\frac{1}{2\cdot\delta\cdot h^3} \Rightarrow \left(\left(\frac{A_s}{\delta\cdot h}\right) + \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right)\cdot l_{01h}\right)\cdot \boldsymbol{b_h^2} + \frac{\boldsymbol{l_{12-h}}}{3}\cdot\left(\boldsymbol{x_{1h}^2} + x_h^2 + \boldsymbol{x_{1h}}\cdot x_h\right) +$$

$$+\frac{l_{2+h}}{3}\cdot x_{2+h}^2 +$$

$$+r_h\cdot\left[x_h^2\cdot\beta + 2\cdot r_h\cdot x_h\cdot(1+\cos\gamma) + r_h^2\cdot\frac{\beta+\sin\gamma\cdot\cos\gamma}{2}\right]. \qquad (5)$$

Главные осевые моменты сопротивления определяются по формулам:

$$\boldsymbol{W_x} = \frac{\boldsymbol{I_x}}{y_{max}} \Rightarrow \frac{\boldsymbol{I_x}}{h},$$

$$\boldsymbol{W_x}\cdot\frac{1}{2\cdot\delta\cdot h^2} \Rightarrow \boldsymbol{I_x}\cdot\frac{1}{2\cdot\delta\cdot h^3}; \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{W_y} = \frac{\boldsymbol{I_y}}{x_{max}} \Rightarrow \frac{\boldsymbol{I_y}}{\boldsymbol{b}},$$

$$\boldsymbol{W_y}\cdot\frac{1}{2\cdot\delta\cdot h^2} \Rightarrow \frac{1}{\boldsymbol{b_h}}\cdot\boldsymbol{I_y}\cdot\frac{1}{2\cdot\delta\cdot h^3}. \qquad (7)$$

Для нахождения главного секториального момента инерции

$\boldsymbol{I_\omega} = \int_A \bar{\boldsymbol{\omega}}^2(s)\cdot dA$ введем секториальные координаты $\boldsymbol{\omega}$ (удвоенная площадь сектора между полюсом, начальной и текущей точками на профиле сечения стержня), где полюс и начальная точка отсчета выбраны

в точке $\boldsymbol{C}$:

$$\omega_C = 0; \qquad \omega_{2+} = 0;$$

$$\omega(\varphi) = l_{2+} \cdot r \cdot (1 - \cos\varphi) + r^2 \cdot (\varphi - \sin\varphi), \qquad 0 \le \varphi \le \beta;$$

$$\omega_{2-} = l_{2+} \cdot r \cdot (1 - \cos\beta) + r^2 \cdot (\beta - \sin\beta);$$

$$\boldsymbol{\omega_1} = \omega_{2-} + h \cdot \boldsymbol{l_{12-}}; \qquad \boldsymbol{\omega_0} = \boldsymbol{\omega_1} - s \cdot \boldsymbol{b}; \qquad \boldsymbol{\omega_{0A_s}} = \boldsymbol{\omega_0} - A_s.$$

Относительные секториальные координаты $\boldsymbol{\omega}/h^2$:

$$\omega_{2-h} = l_{2+h} \cdot r_h \cdot (1 - \cos\beta) + r_h^2 \cdot (\beta - \sin\beta);$$

$$\boldsymbol{\omega_{1h}} = \omega_{2-h} + \boldsymbol{l_{12-h}}; \qquad \boldsymbol{\omega_{0h}} = \boldsymbol{\omega_{1h}} - s_h \cdot \boldsymbol{b_h}; \qquad \boldsymbol{\omega_{0hA_s}} = \boldsymbol{\omega_{0h}} - \frac{A_S}{h^2}.$$

Секториальный статический момент:

$$\boldsymbol{S} = \int_A \omega \cdot dA \Rightarrow 2 \cdot \int_0^{L/2} \delta(s) \cdot \omega(s) \cdot ds = 2 \cdot \boldsymbol{S_{0A_s}} = 2 \cdot (\delta \cdot h^3) \cdot \boldsymbol{S_{0hA_s}},$$

$$S_C = 0; \qquad S_{2+} = 0;$$

$$S_{2-} = \delta \cdot \int_0^{\beta} \omega(\varphi) \cdot r \cdot d\varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \delta \cdot r^2 \cdot \left( l_{2+} \cdot (\beta - \sin\beta) + r \cdot \left( \frac{\beta^2}{2} - (1 - \cos\beta) \right) \right) = (\delta \cdot h^3) \cdot S_{2-h};$$

$$\boldsymbol{S_1} = S_{2-} + \delta \cdot \frac{\boldsymbol{\omega_1} + \omega_{2-}}{2} \cdot \boldsymbol{l_{12-}}; \quad \boldsymbol{S_0} = \boldsymbol{S_1} + \delta_s \cdot \frac{\boldsymbol{\omega_1} + \boldsymbol{\omega_0}}{2} \cdot s;$$

$$\boldsymbol{S_{0A_s}} = \boldsymbol{S_0} + \boldsymbol{\omega_{0A_s}} \cdot A_s.$$

Относительные секториальные статические моменты $\boldsymbol{S}/(\delta \cdot h^3)$:

$$S_{2-h} = r_h^2 \cdot \left( l_{2+h} \cdot (\beta - \sin\beta) + r_h \cdot \left( \frac{\beta^2}{2} - (1 - \cos\beta) \right) \right);$$

$$\boldsymbol{S_{1h}} = S_{2-h} + \frac{\boldsymbol{\omega_{1h}} + \omega_{2-h}}{2} \cdot \boldsymbol{l_{12-h}}; \qquad \boldsymbol{S_{0h}} = \boldsymbol{S_{1h}} + \left( \frac{\delta_s}{\delta} \right) \cdot \frac{\boldsymbol{\omega_{1h}} + \boldsymbol{\omega_{0h}}}{2} \cdot \boldsymbol{s_h};$$

$$\boldsymbol{S_{0hA_s}} = \boldsymbol{S_{0h}} + \boldsymbol{\omega_{0hA_s}} \cdot \frac{A_S}{h^2}.$$

Постоянная $\boldsymbol{D}$, определяющая главную начальную точку отсчета $\boldsymbol{M_0}$ (рис.9),

где $\boldsymbol{s_0}$ – расстояние от т. $(2-)$ до точки, где $\overline{\boldsymbol{\omega}} = 0$:

$$\boldsymbol{D} = \frac{\boldsymbol{S}}{\int_A dA} \Rightarrow \frac{\boldsymbol{S_{0A_S}}}{\boldsymbol{A}/2} = h^2 \cdot \frac{\boldsymbol{S_{0hA_S}}}{\boldsymbol{A_{\delta h}}}; \tag{8}$$

$$\boldsymbol{s_0} = \frac{\boldsymbol{D} - \omega_{2-}}{h} \Rightarrow h \cdot \left( \frac{\boldsymbol{S_{0hA_S}}}{\boldsymbol{A_{\delta h}}} - \omega_{2-h} \right). \tag{9}$$

Главные секториальные координаты $\overline{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{D}$ (рис.3):

$$\bar{\omega}_C = \bar{\omega}_{2+} \Rightarrow h^2 \cdot \left(-\frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right) = -D; \qquad \bar{\omega}_{2-} \Rightarrow h^2 \cdot \left(\omega_{2-h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right);$$

$$\bar{\omega}_1 \Rightarrow h^2 \cdot \left(\omega_{1h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right); \qquad \bar{\omega}_0 \Rightarrow h^2 \cdot \left(\omega_{0h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right);$$

$$\bar{\omega}_{0A_s} \Rightarrow h^2 \cdot \left(\omega_{0hA_s} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right).$$

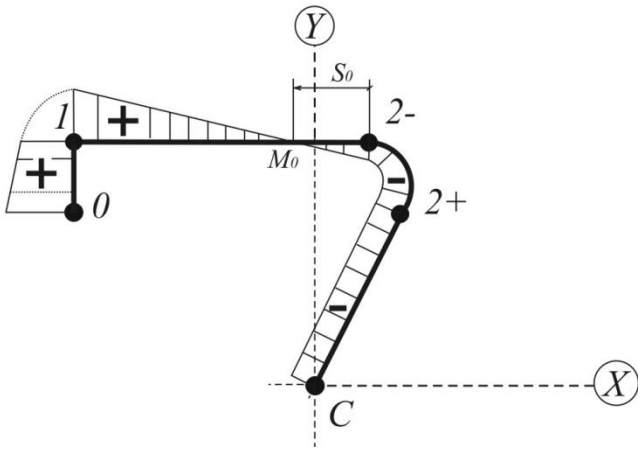



Рисунок 3 – Эпюра главных $\overline{\boldsymbol{\omega}}(s)$ для профиля с обычной отбортовкой

с полюсом в $C$ и начальной точкой отсчета в $M_0$.

Относительные главные секториальные координаты $\bar{\omega}/h^2$:

$$\bar{\omega}_{Ch} = \bar{\omega}_{2+h} \Rightarrow \left(-\frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right); \qquad \bar{\omega}_{2-h} \Rightarrow \left(\omega_{2-h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right);$$

$$\bar{\omega}_{1h} \Rightarrow \left(\omega_{1h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right); \qquad \bar{\omega}_{0h} \Rightarrow \left(\omega_{0h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right);$$

$$\bar{\omega}_{0hA_s} \Rightarrow \left(\omega_{0h} - \frac{S_{0hA_s}}{A_{\delta h}}\right).$$

Главный секториальный момент инерции определяется по формуле:

$$I_\omega = \int_A \bar{\omega}^2(s) \cdot dA \Rightarrow 2 \cdot \delta \cdot \int_0^{L/2} \bar{\omega}^2(s) \cdot ds \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 \cdot \delta \cdot$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot \frac{l_{01}}{3} \cdot \left(\bar{\omega}_0^2 + \bar{\omega}_1^2 + \bar{\omega}_0 \cdot \bar{\omega}_1\right) + \frac{l_{12-}}{3} \cdot \left(\bar{\omega}_1^2 + \bar{\omega}_{2-}^2 + \bar{\omega}_1 \cdot \bar{\omega}_{2-}\right) + \\ + l_{2+} \cdot \bar{\omega}_{2+}^2 \quad + \quad \int_0^\beta (\omega(\varphi) - D)^2 \cdot r \cdot d\varphi \end{array} \right\},$$

$$I_\omega \cdot \frac{1}{2 \cdot \delta \cdot h^5} \Rightarrow \left(\frac{\delta_s}{\delta}\right) \cdot \frac{l_{01h}}{3} \cdot \left(\bar{\omega}_{0h}^2 + \bar{\omega}_{1h}^2 + \bar{\omega}_{0h} \cdot \bar{\omega}_{1h}\right) + l_{2+h} \cdot \left(-\frac{S_{0h}}{A_{\delta h}}\right)^2 +$$

$$+\frac{l_{12-h}}{3}\cdot\left(\bar{\omega}_{1h}^{2}+\bar{\omega}_{2-h}^{2}+\bar{\omega}_{1h}\cdot\bar{\omega}_{2-h}\right)+$$

$$+r_h^3\cdot\left(\begin{array}{c} l_{2+h}^2\cdot\left(\frac{3\cdot\beta}{2}+\frac{\sin 2\beta}{4}-2\cdot\sin\beta\right)+l_{2+h}\cdot r_h\cdot(\beta-\sin\beta)^2+ \\ +r_h^2\cdot\left(\frac{\beta^2}{2}+\frac{\beta}{2}-\frac{\sin 2\beta}{4}-2\cdot(\sin\beta-\beta\cdot\cos\beta)\right) \end{array}\right)-$$

$$-2\cdot S_{2-h}\cdot\frac{S_{0h}}{A_{\delta h}}+r_h\cdot\beta\cdot\left(\frac{S_{0h}}{A_{\delta h}}\right)^2. \qquad (10)$$

После определения геометрических характеристик, по принципу независимости действия сил, полные нормальные напряжения в произвольной точке поперечного сечения жесткого тонкостенного Z-образного стержня (с учетом знака) определяются по формуле [2]:

$$\boldsymbol{\sigma}=\frac{N}{A}+\frac{M_x}{I_x}\cdot\boldsymbol{Y}(s)+\frac{M_y}{I_y}\cdot\boldsymbol{X}(s)+\frac{B_\omega}{I_\omega}\cdot\overline{\boldsymbol{\omega}}(s), \qquad (11)$$

где внутренние усилия:

$\boldsymbol{N, M_x, M_y}-$ соответственно продольная сила и изгибающие моменты относительно главных центральных осей, определяемые методом сечения,

$\boldsymbol{B_\omega}-$ бимомент в рассматриваемом поперечном сечении, определяемый из решения дифференциального уравнения для углов закручивания при стесненном кручении тонкостенного стержня открытого профиля.

**Библиографический список:**

1. Волков В.П. Геометрические характеристики тонкостенного Z-образного стержня с закруглением и с усиленной наружной отбортовкой. [Электронный ресурс] //Моделирование и механика конструкций. 2026. №16.

2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. - М: Высш. шк., 1995. - 560 с.; ил.