

Расчет машиностроительных конструкций

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ

Л.С. КОХАН, *д-р техн. наук, профессор,*
 Ю.А. МОРОЗОВ, *канд. техн. наук, доцент*
 Московский государственный вечерний металлургический институт
 111250, Москва, Лефортовский вал, дом 26; 8(495)361-14-80; akafest@mail.ru

Определение толщины стенки трубы при безоправочном волочении происходит в основном с использованием эмпирических и полуэмпирических зависимостей. Предлагаемая теория позволяет определить уровень деформаций, действующих при формоизменении, и математически обосновать изменение толщины деформируемой заготовки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безоправочное волочение, деформация, стенка трубы, утолщение.

В процессах волочения полых профилей, помимо исследования энергосиловых параметров процесса, особое внимание уделяется вопросу изменения толщины стенки, что находит отражение в работах отечественных и зарубежных исследователей [1].

Рассмотрим формообразование трубы при безоправочном волочении, характеризующееся многократным подгибом стенок полый заготовки по образующей поверхности волоки (рис. 1) [2].

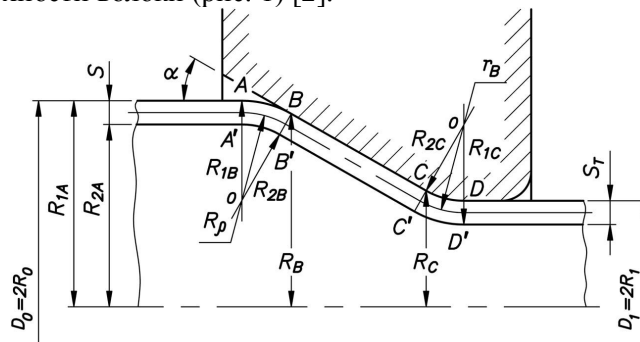


Рис. 1. Схема безоправочного волочения

Совокупное действие радиальных и тангенциальных деформаций приводит к изменению наружного и внутреннего радиусов изогнутых элементов в очаге деформации $R_{нар}/R_{вн}$, оцениваемых первоначальным отношением R_1/R_2 .

Подобный механизм формоизменения обуславливает изменение исходной толщины заготовки в соответствующих зонах растяжения и сжатия, разделяемых общим радиусом нейтральной поверхности ρ_n

$$\left(\frac{R_{нар}}{\rho_n}\right)^2 \left(\frac{R_{нар}}{\rho_n} - 1\right) = \frac{R_1}{R_2} Z - 1; \tag{1,а}$$

$$\frac{R_{вн}}{\rho_n} \left(\frac{R_{вн}}{\rho_n} + 1 - 2Z\right) \left(2 - \frac{R_{вн}}{\rho_n}\right) = 1 - Z, \tag{1,б}$$

где $R_{нар}/\rho_n$, $R_{вн}/\rho_n$ – относительные величины наружного и внутреннего радиусов; $Z = R_2/\rho_n$ – коэффициент, определяющий положение нейтральной поверхности.

Неизвестный коэффициент Z вычисляется из условия равновесия изгибающих моментов в растянутых и сжатых слоях заготовки, возникающих под действием тангенциальных напряжений относительно нейтральной поверхности

$$M_{\text{нар}} = M_{\text{вн}}.$$

Относительные величины изгибающих моментов без учета упрочнения металла

$$\bar{M}_{\text{нар}} = \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} - 1 \right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} + 1 \right); \quad (2,a)$$

$$\bar{M}_{\text{вн}} = \left(1 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} \right)^2 \left(1 + \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} \right). \quad (2,b)$$

Наличие контактного трения (с допущением его линейного распределения) на какой либо поверхности изгиба – наружной или внутренней, корректирует схему деформации

$$\bar{M}_{\text{нар}} = \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} - 1 \right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар}}}{\rho_{\text{н}}} + 1 \right) \left[1 + \frac{f}{3} \right]; \quad (3,a)$$

$$\bar{M}_{\text{вн}} = \left(1 - \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} \right)^2 \left(1 + \frac{R_{\text{вн}}}{\rho_{\text{н}}} \right) \left[1 - \frac{f}{3} \right]. \quad (3,b)$$

Проиллюстрируем вышеизложенное примером волочения трубной заготовки размерами $\varnothing 51,0 \times 3,8$ мм ($D_0 \times S$) в твердосплавной волоке с углом рабочего конуса $\alpha = 8$ градусов и коэффициентом контактного трения $f = 0,1$.

В соответствии с требованиями обеспечения запаса прочности выходящего конца трубы, и ее устойчивости в очаге деформации при безоправочном волочении [3], назначается окончательный размер $\varnothing 40,0 \times S_T$ мм.

Для первого сечения AA' , характеризуемого свободным изгибом стенки трубы перед входом в волоку, отношение наружного и внутреннего радиусов

$$\frac{R_{1A}}{R_{2A}} = \frac{R_0}{R_0 - S} = \frac{25,5}{25,5 - 3,8} = \frac{25,5}{21,7} = 1,175.$$

Из условия равенства изгибающих моментов определяется $Z = 0,9232$, что позволяет установить деформационное изменение в зонах растяжения и сжатия

$$\left(\frac{R_{\text{нар } A}}{\rho_{\text{н } A}} \right)^2 \left(\frac{R_{\text{нар } A}}{\rho_{\text{н } A}} - 1 \right) = \frac{R_{1A}}{R_{2A}} Z - 1 = 1,175 \cdot 0,9232 - 1 = 0,08476;$$

$$\frac{R_{\text{вн } A}}{\rho_{\text{н } A}} \left(\frac{R_{\text{вн } A}}{\rho_{\text{н } A}} + 1 - 2Z \right) \left(2 - \frac{R_{\text{вн } A}}{\rho_{\text{н } A}} \right) = 1 - Z = 1 - 0,9232 = 0,0768.$$

Методом итерации определяются относительные величины наружного и внутреннего радиусов

$$R_{\text{нар } A} / \rho_{\text{н } A} = 1,0735 \quad \text{и} \quad R_{\text{вн } A} / \rho_{\text{н } A} = 0,9237.$$

Полученные решения проверяются обязательным условием равенства изгибающих моментов в растянутой и сжатой зонах (2)

$$\bar{M}_{\text{нар } A} = (1,0735 - 1)^2 (1,0735 + 1) = 0,011202;$$

$$\bar{M}_{\text{вн } A} = (1 - 0,9237)^2 (1 + 0,9237) = 0,011199.$$

Отличие моментов менее 1%, что позволяет перейти к дальнейшему определению кинематических параметров гибки.

Нейтральный радиус $\rho_{нА} = R_{2А}/Z = 21,7/0,9232 = 23,51$ мм.

Протяженности растянутой и сжатой зон

$$S_{\text{раст } А} = \frac{R_{\text{нар } А}}{\rho_{нА}} \rho_{нА} - \rho_{нА} = 1,0735 \cdot 23,51 - 23,51 = 1,73 \text{ мм};$$

$$S_{\text{сж } А} = \rho_{нА} - \frac{R_{\text{вн } А}}{\rho_{нА}} \rho_{нА} = 23,51 - 0,9237 \cdot 23,51 = 1,79 \text{ мм}.$$

В результате толщина изделия в сечении AA'

$$S_A = S_{\text{раст } А} + S_{\text{сж } А} = 1,73 + 1,79 = 3,52 \text{ мм}.$$

Обязательным условием для перехода к сечению BB' является определение радиуса свободного изгиба

$$R_p = \frac{\sqrt{(R_0 - 0,5 S_A) S_A}}{\sqrt{2} \sin \alpha} = \frac{\sqrt{(25,5 - 0,5 \cdot 3,52) 3,52}}{\sqrt{2} \sin 8} = 46,45 \text{ мм},$$

что позволяет установить соответствующее отношение наружного и внутреннего радиусов в данном сечении

$$\frac{R_{1B}}{R_{2B}} = \frac{R_p + S_{\text{раст } А}}{R_p - S_{\text{сж } А}} = \frac{46,45 + 1,73}{46,45 - 1,79} = \frac{48,18}{44,66} = 1,079.$$

С условием того, что процесс формообразования протекает с наличием контактного трения по наружной поверхности изгиба, устанавливается

$$Z = 0,9626, \text{ откуда } R_{\text{нар } B}/\rho_{нB} = 1,036 \text{ и } R_{\text{вн } B}/\rho_{нB} = 0,9627.$$

Значения относительных изгибающих моментов в растянутой и сжатой зонах при коэффициенте трения $f = 0,1$ ($3,a$; $2,b$)

$$\bar{M}_{\text{нар } B} = (1,036 - 1)^2 (1,036 + 1) \left[1 + \frac{0,1}{3} \right] = 0,002727;$$

$$\bar{M}_{\text{вн } B} = (1 - 0,9627)^2 (1 + 0,9627) = 0,002731.$$

С отличием менее 1% расчет можно считать окончанным.

Принимая во внимание, что в данном сечении труба входит в контакт с деформирующим инструментом, ее наружный радиус будет определяться конструктивным исполнением волокна $R_{\text{нар } B} = R_{1B} = 48,18$ мм (рис. 1).

Расчеты, аналогичные приведенным выше, позволяют установить протяженности растянутой и сжатой зон, и толщину изделия в сечении BB'

$$S'_{\text{раст } B} = 1,78 \text{ мм}; \quad S'_{\text{сж } B} = 1,73 \text{ мм}; \quad S'_B = 3,51 \text{ мм}.$$

С помощью радиуса полуфабриката относительно точки B

$$R_B = R_0 - R_{\text{нар } B} (1 - \cos \alpha) = 51,0/2 - 48,18 (1 - \cos 8) = 25,03 \text{ мм},$$

устанавливается величина вытяжки в исследуемом сечении

$$\lambda_B = \frac{(R_0 - S) S}{(R_B - S'_B) S'_B} = \frac{(25,5 - 3,8) 3,8}{(25,2 - 3,51) 3,51} = 1,092.$$

Продольная деформация, определяемая вытяжкой:

$$\epsilon_l = \frac{1}{\lambda_B} - 1 = \frac{1}{1,092} - 1 = -0,084.$$

Следует отметить, что в процессе своего обжатия заготовка будет испытывать деформацию осадки, следствием чего будет ее утолщение. Соответствующее увеличение толщины стенки оценивается относительными радиальными и

тангенциальными деформациями, действующими в середине каждого слоя в процессе изменения его толщины

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r \text{ нар}} &= \frac{S'_{\text{раст } B} - 0,5S}{0,5S} = \frac{1,78 - 0,5 \cdot 3,8}{0,5 \cdot 3,8} = -0,063 ; \\ \varepsilon_{r \text{ вн}} &= \frac{S'_{\text{сж } B} - 0,5S}{0,5S} = \frac{1,73 - 0,5 \cdot 3,8}{0,5 \cdot 3,8} = -0,089 ; \\ \varepsilon_{\theta \text{ нар}} &= \frac{[R_B + (R_B - S'_{\text{раст } B})] - [(R_0 - 0,5S) + R_0]}{(R_0 - 0,5S) + R_0} = \\ &= \frac{[25,03 + (25,03 - 1,78)] - [(25,5 - 0,5 \cdot 3,8) + 25,5]}{(25,5 - 0,5 \cdot 3,8) + 25,5} = -0,017 ; \\ \varepsilon_{\theta \text{ вн}} &= \frac{[(R_B - S'_{\text{раст } B}) + (R_B - S'_B)] - [(R_0 - 0,5S) + (R_0 - S)]}{(R_0 - 0,5S) + (R_0 - S)} = \\ &= \frac{[(25,03 - 1,78) + (25,03 - 3,51)] - [(25,5 - 0,5 \cdot 3,8) + (25,5 - 3,8)]}{(25,5 - 0,5 \cdot 3,8) + (25,5 - 3,8)} = -0,012 .\end{aligned}$$

На основании условия постоянства объема определяется продольная деформация

$$\begin{aligned}\varepsilon_{l \text{ нар}} &= \frac{1}{(1 + \varepsilon_{r \text{ нар}})(1 + \varepsilon_{\theta \text{ нар}})} - 1 = \frac{1}{(1 - 0,063)(1 - 0,017)} - 1 = 0,086 ; \\ \varepsilon_{l \text{ вн}} &= \frac{1}{(1 + \varepsilon_{r \text{ вн}})(1 + \varepsilon_{\theta \text{ вн}})} - 1 = \frac{1}{(1 - 0,089)(1 - 0,012)} - 1 = 0,111 .\end{aligned}$$

Общая деформация от процессов волочения и осадки:

$$\varepsilon_{\text{нар}} = \varepsilon_l + \varepsilon_{l \text{ нар}} = -0,084 + 0,086 = -0,002 ; \quad \varepsilon_{\text{вн}} = \varepsilon_l + \varepsilon_{l \text{ вн}} = -0,084 + 0,111 = 0,027 .$$

Перемещения металла при совместном воздействии изгиба и осадки:

$$\begin{aligned}U_{\text{нар}} &= \frac{|\varepsilon_{\text{нар}}|}{1 + |\varepsilon_{\text{нар}}|} S'_{\text{раст } B} = \frac{0,002}{1 + 0,002} 1,78 = 0,004 \text{ мм} ; \\ U_{\text{вн}} &= \frac{|\varepsilon_{\text{вн}}|}{1 + |\varepsilon_{\text{вн}}|} S'_{\text{сж } B} = \frac{0,027}{1 + 0,027} 1,73 = 0,045 \text{ мм} .\end{aligned}$$

Таким образом, окончательная толщина материала в сечении BB' :

$$\begin{aligned}S_{\text{раст } B} &= S'_{\text{раст } B} + U_{\text{нар}} = 1,78 + 0,004 = 1,784 \text{ мм} ; \\ S_{\text{сж } B} &= S'_{\text{сж } B} + U_{\text{вн}} = 1,73 + 0,045 = 1,775 \text{ мм} ; \\ S_B &= S_{\text{раст } B} + S_{\text{сж } B} = 1,784 + 1,775 = 3,559 \text{ мм} .\end{aligned}$$

Аналогичным образом, рассчитывается изменение толщины стенки трубы по остальным сечениям. Так, в сечении CC' деформация будет проводиться по радиусу волокна. Согласно стандартам изготовления твердосплавных волок при $\alpha = 8$ градусов принимается $r_b = 30,0$ мм, что определяет отношение наружного и внутреннего радиусов

$$\frac{R_{1C}}{R_{2C}} = \frac{r_b + S_B}{r_b} = \frac{30,0 + 3,559}{30,0} = 1,119 .$$

Согласно схеме протекания деформационного процесса, формоизменение здесь будет протекать с наличием контактного трения по внутренней поверхности

сти изгиба. Соответственно кромка скругления волокна будет определять внутренний радиус изгиба трубы $R_{вн C} = r_b = 30,0$ мм.

Радиус полуфабриката относительно точки C (с учетом заданного диаметра трубы после волочения)

$$R_C = R_1 + r_b (1 - \cos \alpha) = \frac{40,0}{2} + 30,0(1 - \cos 8) = 20,29 \text{ мм.}$$

После проведения всех необходимых расчетов, связанных с волочением и осаживанием трубы, окончательная толщина материала в сечении CC'

$$S_C = 3,744 \text{ мм.}$$

В последнем сечении DD' , наружный радиус трубы приобретет свою заданную величину, определяемую диаметром калибрующего участка волокна $R_{нар D} = R_1 = 20,0$ мм. Действие контактного трения по наружной поверхности трубы, устанавливает окончательную толщину ее стенки в результате совместного действия волочения и осаживания (табл. 1):

$$S_D = S_T = 4,016 \text{ мм.}$$

Таблица 1

Изменение толщины трубной заготовки размерами $\varnothing 51,0 \times 3,8$ мм при безправочном волочении на размер $\varnothing 40,0 \times S_T$ мм

Параметр	Изменение толщины стенки			
	AA'	BB'	CC'	DD'
R_1/R_2	1,175	1,079	1,119	1,23
$Z = R_2/\rho_i$	0,9232	0,9626	0,9453	0,9016
$R_{нар}/\rho_n$	1,0735	1,036	1,0522	1,0915
$R_{вн}/\rho_n$	0,9237	0,9627	0,9455	0,9025
Формулы нахождения изгибающих моментов (номер формулы)	(2,а) (2,б)	(3,а) (2,б)	(2,а) (3,б)	(3,а) (2,б)
ρ_i , мм	23,51	46,4	31,74	18,03
$S_{раст}$, мм	1,73	1,784	1,863	2,009
$S_{сж}$, мм	1,79	1,775	1,881	2,007
S_i , мм	3,52	3,559	3,774	4,016

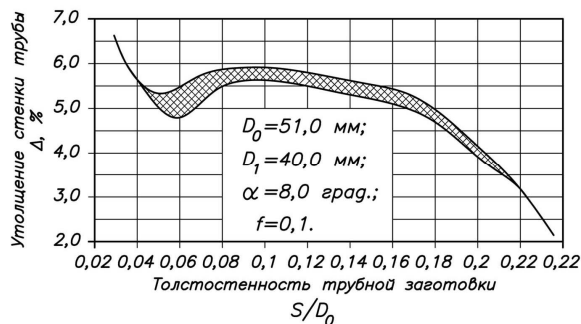


Рис. 2. Утолщение стенки при волочении в зависимости от величины толстостенности трубной заготовки

Таким образом, утолщение стенки трубы составит

$$\Delta = \frac{S_D - S}{S} = \frac{4,016 - 3,8}{3,8} 100\% = 5,68\%$$

$$\text{при } \frac{S}{D_0} = \frac{3,8}{51,0} = 0,0745.$$

В соответствии с вышеизложенной методикой, для рассматриваемых параметров волочения, ниже приводится график утолщения стенки трубной заготовки

товки в зависимости от величины ее толстостенности – отношения толщины стенки к наружному диаметру трубы (рис. 2).

Заштрихованное поле графика устанавливает допустимое поле рассеивания утолщения стенки при некотором колебании его фактического расчетного значения, в зависимости от величины действующих деформаций.

Л и т е р а т у р а

1. *Z.T. Wang, S.H Zhang, Y Xu, G.F Luan, G.R Bai*. Experiment study on the variation of wall thickness during dieless drawing of stainless steel tube// *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 120, Issues 1–3, 15 January 2002, p. 90-93.

2. *Кохан Л.С., Лебедев Н.Н., Морозов Ю.А., Мочалов Н.А.* Проектирование калибров сортовых станов и операций листовой штамповки: Учебное пособие. – М.: МГВМИ, 2007. – 340 с.

3. *Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П.* Технология и оборудование трубного производства. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

References

1. *Z.T Wang, S.H Zhang, Y Xu, G.F Luan, G.R Bai* (2002). Experiment study on the variation of wall thickness during dieless drawing of stainless steel tube, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, Iss. 1–3, 15 January 2002, pp. 90-93.

2. *Kohun, L.S., Lebedev, N.N., Morozov, Yu .A., Mochalov, N.A.* (2007). *Proektirovanie kalibrov sortovykh stanov i operatsiy listovoy shtampovki*, Moscow: MGVMI, 340 p.

3. *Osadchiy V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P.* (2001). *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva*, M.: Internet Inzhiniring, 608 p.

RESEARCH KINEMATIC AND DEFORMATION PARAMETERS OF SINK RAWING

L.S. Kohun, Yu.A. Morozov.

Moskovskiy Gosudarstvenniy Vecherniy Metallurgicheskiy Institut, Moscow

Determination of thickness of a wall of a pipe at sink rowing happens generally to use of empirical and semi-empirical dependences. The offered theory allows to define level of the deformations operating at forming, and mathematically to prove change of thickness of deformable preparation.

KEY WORDS: sink rowing, deformation, pipe wall, thickening.

