

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАДИУСА ИЗГИБА ТРУБЧАТЫХ  
ЗАГОТОВОК ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРУЖИН

Трудности, возникающие при изгибе тонкостенных трубчатых заготовок для манометрических пружин, связаны с потерей устойчивости изгибаемых труб и искажением их поперечного сечения [1]. Для проектирования технологического процесса необходимо знать критический радиус их изгиба  $R_{кр}$  в зависимости от параметров изгибаемой трубчатой заготовки (диаметра  $d$ , толщины стенки  $s$ , свойства материала, в частности модулей упругости  $E$  и пластичности  $K$ ).

При принятой для изготовления манометрических пружин схеме гибки цилиндрической трубчатой заготовки (рис. 1) обеспечивается отсутствие искажения формы поперечного сечения трубы при гибке вплоть до появления вмятин на стенке. Это достигается тем, что трубка, закрепляемая одним концом в замке гибочного шаблона, гнется наматыванием на шаблон с помощью прижимного ролика. Шаблон и прижимной ролик имеют профильные рабочие канавки, в точке смыкания образующие сечение, соответствующее исходному круглому сечению изгибаемой трубы. Такая схема деформирования позволяет получить большую критическую кривизну трубы за счет заневоливания в профильных рабочих канавках поперечного сечения трубы в зоне изгиба, т. е. повысить критическую деформацию.

Рассматривая вмятины, появляющиеся на внутренней поверхности трубы при ее изгибе, можно прийти к выводу, что зона деформации последовательно перемещается, образуя вмятины — следы локальной потери устойчивости стенки на последовательно изгибаемых участках, и в деформировании участвуют короткие отрезки трубы, длину которых характеризует расстояние между вмятинами. Опыт показывает, что расстояние между вмятинами соизмеримо с диаметром трубы.

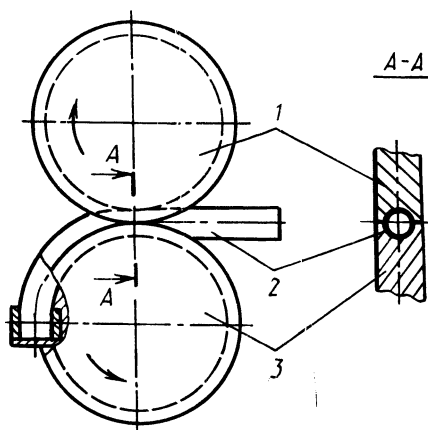


Рис. 1. Схема гибки цилиндрической трубчатой заготовки:

1 — прижимной ролик; 2 — труба; 3 — гибочный шаблон

Таким образом, существуют очень короткие участки труб, которые изгибаются без деформирования поперечных сечений вплоть до точки бифуркации. При этом изменение их кривизны в упругой зоне, как известно, пропорционально изгибающему моменту:

$$1/R = M/(EI), \quad (1)$$

где  $I$  — момент инерции сечения трубы относительно нейтральной оси.

Для тонкостенной трубы

$$M_{кр} = IE_s/(d/2)^2. \quad (2)$$

Гибка манометрических трубчатых заготовок происходит в упругопластической зоне, где зависимость между кривизной трубы и изгибающим моментом при линейно-степенном законе упрочнения имеет вид [2]

$$M_{кр} = \kappa_0 EI_{упр} + \kappa_0^n K_{п} I_{пл},$$

здесь  $\kappa_0$  — кривизна нейтрального слоя изогнутой трубы;  $E$  — модуль нормальной упругости;  $I_{упр}$  — момент инерции упругодеформированной зоны сечения относительно нейтральной оси;  $n$  — коэффициент упрочнения, выражаемый через основные механические характеристики материала;  $K_{п}$  — приведенный модуль пластичности;  $I_{пл}$  — приведенный момент инерции пластически деформированных зон поперечного сечения относительно нейтральной оси.

Рассматриваемые поперечные сечения трубы с погрешностью не более 10% деформируются пластически [3], следовательно,

$$I_{упр} = 0; \quad I_{пл} = c_n (r_n^{n+3} - r_v^{n+3}),$$

где  $c_n = \frac{4}{n+2} - \frac{2}{n+4} - \frac{1}{2(n+6)} - \frac{1}{4(n+8)}$ ;  $r_n, r_v$  — наружный и внутренний радиусы сечения трубы.

Отсюда кривизна пластически изогнутой трубы может быть представлена в виде

$$\kappa_0^n = M_{кр} / (K_{п} I_{пл}). \quad (3)$$

Выражение (3) может быть упрощено и приведено к виду, аналогичному (1), если степенной закон упрочнения с известными допущениями заменить математической моделью упругопластического тела с линейным упрочнением:

$$\frac{1}{R_{кр}} = \eta \frac{M_{кр}}{K_{п} I_{пл}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  — параметр, учитывающий выбранную модель и конкретные граничные условия принятой схемы деформирования.

Выражение (2) при пластическом изгибе всего сечения ( $I_{упр} = 0$ ) примет вид

$$M_{кр}^n = 2,5 I_{пл} s / (d/2)^2.$$

Подставляя полученное выражение в формулу (4), получаем

$$R_{кр} = \eta' \frac{d^2}{s}. \quad (5)$$

Табл. 1. Параметры изгибаемой трубчатой заготовки

Материал	$d$ , мм	$s$ , мм	$R_{кр}$ , мм	$\eta'$	Состояние материала
Сплав 156	6,6	0,15	65	0,22	Нагартованный
	8	0,2	70	0,23	
	10	0,25	90	0,22	Мягкий
	6,6	0,15	90	0,32	
	8	0,2	100	0,33	
36НХТЮ	10	0,25	120	0,34	Нагартованный
	7	0,15	65	0,2	
	7	0,2	50	0,21	
БРОФ	10	0,25	80	0,2	Мягкий
	8,68	0,34	70	0,34	

Формула (5) устанавливает зависимость между критическим радиусом кривизны и геометрическими параметрами изгибаемой трубчатой заготовки через некоторый параметр трубы  $\eta'$ , учитывающий механические свойства материала и условия деформирования. В табл. 1 приведены его значения, определенные опытным путем для различных материалов при вышеприведенной схеме деформирования.

Полученная формула (5) позволяет с достаточной для практических расчетов точностью определять критический радиус изгиба трубчатой заготовки и прогнозировать появление локальной потери устойчивости. Приведенные средние значения параметра  $\eta'$  получены в результате исследования процесса гибки опытных партий трубчатых заготовок для манометрических пружин. Количество трубок в каждой выборке составляло не менее 25 шт.

Параметр  $\eta'$ , определенный экспериментально, постоянен для каждого материала и схемы деформирования, что позволяет применить его в инженерных расчетах технологических процессов изготовления манометрических пружин для операции гибки тонкостенных цилиндрических трубчатых заготовок.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Добровольский И.Г., Задорожный В.И., Шляховой В.С. Определение пружинения и остаточной кривизны пластически изогнутой трубчатой заготовки // *Металлургия*. — Минск: Вышш. шк., 1987. — Вып. 21. — С. 6–10. 2. Лысов М.Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. — М.: Машиностроение, 1966. — 236 с. 3. Аксельрад Э.Л. Гибкие оболочки. — М.: Наука, 1976.

УДК 621.721

А.С. МАТУСЕВИЧ, И.Х. ЧУТАЕВ

#### ПРЕССОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИПОЕВ

В комбинированных припоях, сердцевина которых является флюсом, должно соблюдаться определенное соотношение компонентов по массе. Избы-