

Ю. И. БОЛОТИН, М. И. РАЗУМИХИН

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА СВОБОДНОГО ИЗГИБА ПРИ ВЫВОРОТЕ ТРУБ КОНИЧЕСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

При штамповке деталей из трубчатых заготовок путем обжима раздачи и последующей вытяжки зона очага деформации, не задаваемая формой инструмента (доконтактная зона), носит название участка свободного изгиба [1]. Этот участок возникает на переходе от очага деформаций (места контакта с инструментом) к недеформируемому участкам заготовки.

Проектируя подобные технологические процессы, необходимо знать величину и характер изменения радиуса кривизны участка свободного изгиба  $R_p$ . Это позволит правильно спроектировать штампованную оснастку, рассчитать геометрию готовой детали и определить с помощью имеющихся зависимостей долю усилий, затрачиваемую на свободный изгиб металла.

Величину радиуса участка свободного изгиба определяли различные исследователи. Так, например, в работах Е. А. Попова [1] и [2] приведены следующие формулы:

$$R_p = \frac{\sqrt{R\delta}}{\sin \alpha_k}; \quad (1)$$

$$R_p = \frac{\sqrt{R\delta}}{\sqrt{2} \sin \alpha_k}; \quad (2)$$

$$R_{p \min} = 0,95 \frac{\sqrt{R\delta}}{\alpha_k} \left( \alpha_k \leq \frac{\pi}{6} \right) \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  — угол между образующей конического инструмента и осью симметрии;

$R$  — радиус средней поверхности трубы;

$\delta$  — ее толщина.

Уравнение (3) получено на основании анализа характера изменения радиуса кривизны участка свободного изгиба при последующей вытяжке [2] и определяет его минимальное значение.

В таблице 1 приведено сравнение результатов просчета значений  $R_p$  по этим формулам с опытными данными Е. А. Попова [1] и М. Н. Горбунова [3].

Таблица 1

$D_{зд}$	$R_p$		$R_p^{оп}$ , мм	по (1)	по (2)	по (3)	по (4)
	$\alpha_k^0$						
60×61,6 мм	10	46	48,2	34,1	45,6	46,25	
	20	28	24,5	17,35	23,3	22,5	
	30	19	16,75	11,85	15,2	14,9	
	40	15	13	9,25	11,4	10,9	
50×45	10	45	45,2	32	42,7	43,5	
	20	24	23	16,3	21,4	21,2	
	30	16	15,7	11,1	14,25	13,95	
	40	9,5	12,2	8,66	10,65	10,2	
60×58	60	3,5	6,23	4,42	4,96	4,4	
	70	3,25	5,8	4,11	4,22	3,54	
	80	2,4	5,51	3,91	3,7	2,77	
38×36	60	3,5	5,1	3,61	4,0	3,57	
	70	2,85	4,71	3,34	3,44	2,87	
	80	2,0	4,5	3,19	3,01	2,25	

Из таблицы видно, что уравнения (1)–(3) в основном, правильно отражают влияние угла конусности инструмента. Наилучшее совпадение с опытными данными эти формулы дают в области малых  $\alpha_k$ , а из них — уравнение (1). В области больших углов конусности все формулы дают значительное расхождение с опытом.

Между тем, в работе [3] показано, что при обжиме или раздаче труб коническим инструментом с  $\alpha_k = 50 \div 55^\circ$  наблюдается явление выворота труб внутрь и наружу.

При этих углах направление и величина сил, действующих со стороны инструмента в точке контакта, становятся такими, что вызывают значительные пластические деформации от изгиба. В результате свободная, кромка заготовки отходит от инструмента по радиусу, сформированному в точке контакта.

В связи с этим большой практический интерес представляет получение теоретических зависимостей, дающих возможность достаточно точно определить характер и величину  $R_p$  при вывороте. Особенно это обстоятельство относится к диапазону больших

значений  $\alpha_k$ , так как уравнения (1—3) дают в этой области значительную погрешность, например, при  $\alpha_k = \frac{\pi}{2}$  выворот невозможен (сжатие трубы между плоскими плитами), согласно же уравнениям (1—3)  $R_p$  конечен.

Определение  $R_p$  при вывороте проведем по методике, предложенной в работе [2]. Будем считать, что радиус кривизны участка от точки контакта с инструментом (рис. 1) до свободной кромки постоянен и равен  $R_p$  в точке контакта. Схему деформирования будем считать сходной со схемой деформирования свободного торца кольцевой силой.

Дифференциальные уравнения равновесия и условия пластичности в безразмерной форме имеют вид [2]:

$$R \frac{dt_1}{d\alpha} + t_2 R \sin \alpha - R q_1 = 0; \quad (4)$$

$$R t_1 + t_2 R \cos \alpha + R \frac{dq_1}{d\alpha} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{dm_1}{d\alpha} + \frac{4R_p}{\delta} q_1 = 0; \quad (6)$$

$$t_2^2 + 0,75m_1^2 = 1; \quad (7),$$

где  $t_1$  и  $m_1$  — сила и момент, действующие в меридиональном сечении оболочки;

$t_2$  — сила, действующая в тангенциальном сечении;

$q_1$  — перерезывающая сила.

Решением уравнений (4) и (5), при допущении о малости значений  $\alpha$ , в работе [2] получено:

$$R_p = - \frac{AR}{t_2}, \quad (8)$$

где  $A$  — некоторая постоянная.

Как видно из таблицы 1, формула (3), полученная из этого условия совместным решением уравнений (6—8), дает наилучшую, по сравнению с другими, сходимость с опытными данными в области больших  $\alpha_k$ . Поэтому принимаем допущения, что уравнение (8) справедливо и для анализа выворота при больших углах конусности, а перерезывающую силу считаем изменяющейся по закону

$$q_1 = - \frac{A}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

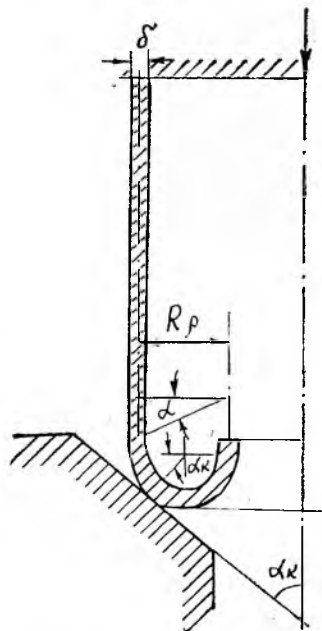


Рис. 1. К определению радиуса свободного изгиба при вывороте трубы

После совместного решения уравнения (6—8) приходим к дифференциальному уравнению

$$\sqrt{1 - \frac{3}{4}m_1^2} dm_1 = -\frac{2A^2 R}{\delta} \operatorname{tg} \alpha d\alpha. \quad (10)$$

Интегрируем это уравнение при граничных условиях

$$\alpha = 0 \quad m_1 = m_5 = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad \alpha = \alpha_k \quad m_1 = 0,$$

окончательно получим:

$$C = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}; \quad (11)$$

$$A = \sqrt{\frac{\pi}{4\sqrt{3}} \frac{\delta}{R \ln \frac{1}{\cos \alpha_k}}}; \quad (12)$$

$$\frac{\sqrt{3}}{4} \left( m_1 \sqrt{\frac{4}{3} - m_1^2} + \frac{4}{3} \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2} m_1 \right) = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{\ln \frac{1}{\cos \alpha}}{\ln \frac{1}{\cos \alpha_k}} \right). \quad (13)$$

Аппроксимируем последнее уравнение зависимостью

$$m_1 \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{\ln \frac{1}{\cos \alpha}}{\ln \frac{1}{\cos \alpha_k}} \right). \quad (14)$$

После подстановки (14) в уравнение (7) и последнего в выражение (8), используя при этом (12), получим:

$$R_p = 0.674 \sqrt{\frac{R\delta}{\ln \frac{1}{\cos \alpha_k}}} \sqrt{\frac{1}{2 \frac{\ln \frac{1}{\cos \alpha}}{\ln \frac{1}{\cos \alpha_k}} - \frac{\ln^2 \frac{1}{\cos \alpha}}{\ln^2 \frac{1}{\cos \alpha_k}}}}; \quad (15)$$

При  $\alpha=0$  получаем  $R_p = \infty$ , при  $\alpha = \alpha_k$   $R_p$  принимает минимальное значение

$$R_{p \min} = 0.674 \sqrt{\frac{R\delta}{\ln \frac{1}{\cos \alpha_k}}}. \quad (16)$$

Сравнение результатов расчета по этому уравнению с опытными данными (таблица 1) показывает хорошую сходимость при больших значениях  $\alpha_k$ , вплоть до  $\alpha_k = \frac{\pi}{2}$ . При малых значениях углов конусности уравнение (16) дает почти одинаковые результаты с формулой (3).

Уравнение (16) можно рекомендовать при проектировании технологических процессов выворота труб коническим инструментом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Губкин и др. Основы теории обработки металлов давлением. Машгиз, М., 1957.
  2. Е. А. Попов, В. И. Вершинин. Определение кривизны участка свободного изгиба при последующей вытяжке. Сб. «Машины и технология обработки металлов давлением». (Вып. МВТУ им. Баумана). Машиностроение, М, 1967.
  3. М. Н. Горбунов. Штамповка деталей из трубчатых заготовок. Машгиз, М, 1960.
-