

## ШТАМПОВКА ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

Опыт внедрения в производство, а также лабораторные исследования показали, что при помощи эластичной среды (полиуретана или резины) штампуются трубчатые заготовки из различных материалов, в том числе из алюминиевых сплавов, жаропрочных сталей и титана. Длина труб практически не ограничена диаметр — от нескольких миллиметров до 500 мм и более, толщина стенки до 3—5 мм (возможно 10—15 мм). Детали небольшой длины штампуются на гидравлических или механических прессах. Штамповка труб большой длины производится на простых гидравлических или пневмогидравлических установках. Штамповочная оснастка значительно упрощается, так как обычно необходима лишь матрица; пуансон заменяется эластичной средой.

При помощи эластичной среды штампуются на трубах рифты, зиги, конусы, переходники и различные фасонные поверхности производятся разделительные операции: поперечная и продольная резка труб, пробивка в трубах отверстий и пазов различной формы; осуществляется отбортовка отверстий и концов труб, а также калибровка труб по диаметру. Все эти операции можно выполнять комбинированно, например, отформовать рифт с одновременной калибровкой трубы по диаметру и отрезкой — торцовкой.

Штамповка трубчатых деталей осуществляется как на раздачу, когда эластичная среда действует внутри трубы, так и на обжим, если эластичная среда находится снаружи трубы. При штамповке труб небольшого диаметра, требующих высокого давления, в качестве эластичной среды применяется полиуретан, который обладает высокой износостойкостью и способностью работать при сверхвысоких давлениях (до 10000 кг/см<sup>2</sup>).

При штамповке тонкостенных труб большого диаметра, когда требуется невысокое давление, обычно используется резина. В табл. 1 приведены основные физико-механические свойства полиуретана отечественного производства и США. Для сравнения в таблице показаны свойства двух марок резины, которую обычно применяют для штамповки деталей.

Из табл. 1 видно, что прочность полиуретана в 5—8 раз выше прочности резины, а эластичность больше в 1,5—2 раза. Кроме того, полиуретан обладает высоким сопротивлением раздиру, небольшими остаточными деформациями и исключительно высокой маслостойкостью, что позволяет штамповать детали полиуретаном со смазкой.

Свойства	Отечественный полиуретан					Полиуретан США			Резина	
	СКУ-6	СКУ-7Л	СКУ-7-85	СКУ-7-100	СКУ-ПФЛ	L-100	L-167	L-213	56	3820
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,21	1,25			1,2				1,41	1,35
Модуль при 100% раст., кг/см <sup>2</sup>	40	40	90	150	140	127				
Модуль при 300% раст., кг/см <sup>2</sup>	40	100			300					
Прочность при разр., кг/см <sup>2</sup>	400	550	600	600	500	310	350	200	100	80
Относит. удлини., %	600	660	500	400	400	600	400	200	450	300
Остаточ. удлини., %	1	2			8				28	20
Остаточ. сжатие, %	2	4	6	18	12					
Сопротив. раздиру, кг/см <sup>2</sup>	30	60	70	100	110	107				
Твердость по ТМ-2	60	80	85	95	95	90	95	70Д	55	70
Властич. по отек., %	35	30	28	30	40	40				
Сопротив. истиран., см <sup>3</sup> /кат. ч.	50	50			50					

Давление эластичной среды (полиуретана или резины), необходимое для деформирования трубчатой заготовки, определяется по формуле Лапласа [1]

$$q_d = t \left( \frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — напряжения в тангенциальном и меридиональном направлениях;

$R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны в тангенциальном и меридиональном направлениях;

$t$  — толщина стенки детали.

Величины напряжений могут быть определены через соответствующие деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  с использованием степенной аппроксимации диаграмм истинных напряжений

$$\sigma = K\varepsilon^n, \quad (2)$$

где  $k$  и  $n$  — постоянные коэффициенты, определяемые через известные механические свойства материалов ( $\sigma_n$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $E$ ,  $\delta_p$ ). В работах [2, 3] коэффициенты  $k$  и  $n$  рассчитаны для многих марок алюминиевых сплавов, сталей, бронзы, латуни, титана и материалов.

Величина тангенциальной (окружной) деформации  $\epsilon_1$  легко определяется через наибольший диаметр отштампованной детали  $D_{max}$  и исходный диаметр трубчатой заготовки  $D_0$ .

$$\epsilon_1 = \frac{D_{max} - D_0}{D_0}, \quad (1)$$

При ориентировочных расчетах можно допустить, что

$$\begin{aligned} \epsilon_1 < 0,02 & \quad \sigma_1 = \sigma_{0,2}; \\ \epsilon_1 = 0,02 - 0,1 & \quad \sigma_1 = \frac{\sigma_{0,2} + \sigma_n}{2}; \\ \epsilon_1 > 0,1 & \quad \sigma_1 = \sigma_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Погрешность расчетов при этом обычно не превышает 10—15%.

Меридиональное (осевое) напряжение  $\sigma_2$  зависит в основном от схемы напряженно-деформированного состояния материала деформируемой заготовки.

При штамповке трубчатых деталей с плавными переходами ( $R_2 \gg t$ ) и при свободной подаче материала в осевом направлении схема напряженно-деформированного состояния будет близка к одноосному растяжению. В этом случае можно принять  $\sigma_2 = 0$ .

При штамповке на трубах рифтов, зигов, а также переходников с резкими переходами ( $R_2 \ll R_1$ ), когда схема близка к плоской деформации, для которой  $\epsilon_2 = 0$ , можно считать  $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$ . Более точный расчет напряжений и величины необходимого давления при деформировании различных оболочек можно провести по методике, разработанной Е. И. Исаченковым [1].

При штамповке трубчатых деталей, особенно большого диаметра, необходимо учитывать давление, требующееся для сжатия (деформирования) эластичной среды. Для определения напряжений сжатия резины удобно пользоваться диаграммами, помещенными, например, в справочнике по холодной штамповке В. П. Романовского [4]. Аналогичная диаграмма построена для полиуретана марки СКУ-7Л (твердость 76 единиц по твердомеру ТМ-2), который наиболее широко используется при штамповке (рис. 1). На этой диаграмме нанесены также кривая для полиуретана марки СКУ-7-85 (твердость 88 единиц). Из диаграммы видно, что полиуретан марки СКУ-7-85 имеет напряжение сжатия примерно в два раза выше, чем у полиуретана СКУ-7Л. Сравнение диаграммы для полиуретана СКУ-7Л с имеющимися диаграммами для резины [4] показывает, что напряжение сжатия полиуретана в 1,5—2 раза больше, чем для резины твердо-

ство 60 единиц и в 2,5—3 раза больше, чем для резины твердостью в 50 единиц.

Величину напряжения сжатия необходимо определять по диаграммам в зависимости от деформации сжатия эластичной среды, соответствующей наибольшей тангенциальной деформации трубы.

Деформация сжатия эластичной среды

$$\epsilon_{сж} = \frac{h_0 - h}{h_0} = 1 - \frac{h}{h_0}, \quad (5)$$

где  $h_0$  — высота эластичного пуансона в исходном состоянии;

$h$  — высота эластичного пуансона в сжатом состоянии. Для расчета  $\epsilon_{сж}$  высоты  $h_0$  и  $h$  необходимо заменить на диаметры пуансона и трубы, которые являются известными величинами.

Объем эластичного пуансона в зоне наибольшей тангенциальной деформации трубы

$$V = \frac{\pi(D_{max}^2 - d^2) \cdot h}{4}, \quad (6)$$

где  $D_{max}$  — внутренний диаметр трубы в зоне наибольшей тангенциальной деформации;

$d$  — внутренний диаметр эластичного пуансона (диаметр штока).

Объем эластичного пуансона в исходном состоянии

$$V_0 = \frac{\pi(D^2 - d^2) h_0}{4}, \quad (7)$$

где  $D$  — наружный диаметр эластичного пуансона в исходном состоянии.

Из равенства объемов  $V = V_0$  можно найти отношение

$$\frac{h}{h_0} = \frac{D^2 - d^2}{D_{max}^2 - d^2}, \quad (8)$$

подставив которое в формулу (5), получим

$$\epsilon_{сж} = \frac{D_{max}^2 - D^2}{D_{max}^2 - d^2}. \quad (9)$$

Таким образом, необходимая величина давления эластичного пуансона  $q$  должна слагаться из величины давления для деформирования трубы  $q_{\partial}$ , рассчитываемой по формуле (1), и из величины давления для сжатия эластичной среды  $q_3$ , определяемой по диаграммам, т. е.

$$q = q_{\partial} + q_3. \quad (10)$$

Однако величина давления эластичного пуансона будет уменьшаться по его высоте, начиная от торца, к которому приложена нагрузка за счет контактного трения между эластичной средой и трубой.

Величина давления эластичной среды на трубу на некотором расстоянии от торца (для эластичного пуансона без отверстия)

$$q = \frac{4(P - F_{\text{тр}})}{\pi D_{\text{в}}^2}, \quad (11)$$

где  $P$  — сила, действующая на торец эластичного пуансона;  
 $D_{\text{в}}$  — внутренний диаметр трубы.

Сила контактного трения

$$F_{\text{тр}} = f q \pi D_{\text{в}} h, \quad (12)$$

где  $f$  — коэффициент трения между эластичной средой и трубой;  
 $h$  — высота эластичного пуансона.

Подставляя в формулу (11) выражение (12), получим

$$q = \frac{4P}{\pi D_{\text{в}} (D_{\text{в}} + 4fh)}. \quad (13)$$

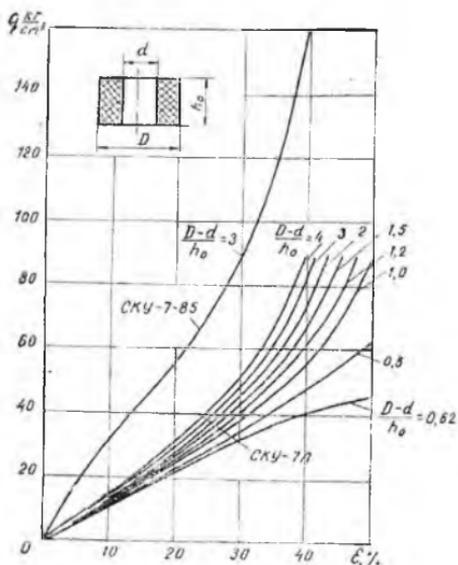


Рис. 1. Диаграмма для определения напряжений сжатия полиуретана марки СКУ-7П твердостью 76 единиц и полиуретана марки СКУ-7-85 твердостью 88 единиц

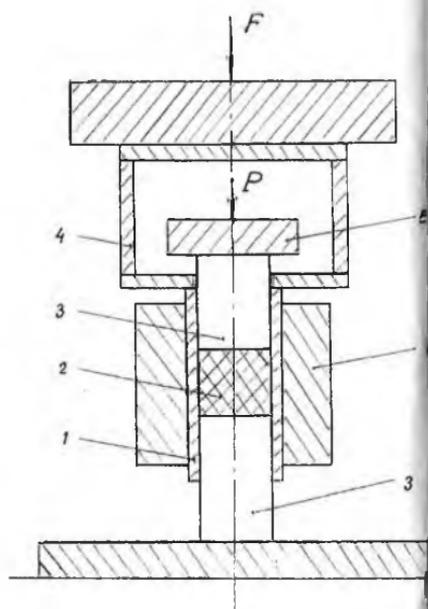


Рис. 2. Схема приспособления для определения коэффициентов трения эластичной среды в трубах при различном давлении

Величину силы  $P$  можно выразить через давление  $q_0$ , действующее на торец эластичного пуансона

$$P = \frac{\pi D_{\text{в}}^2}{4} q_0. \quad (14)$$

Тогда формула для определения величины давления эластичной среды на высоте  $h$  от торца, к которому приложена нагрузка, примет вид

$$q = \frac{1}{1 + 4f \frac{h}{D_a}} q_0, \quad (15)$$

Используя выражение (10), можно записать формулу для расчета величины давления, которое необходимо приложить к торцу эластичного пуансона

$$q_0 = \left(1 + 4f \frac{h}{D_a}\right) (q_1 + q_2). \quad (16)$$

Формулу для расчета силы контактного трения можно получить из выражений (12) и (15)

$$F_{\text{тр}} = \frac{\pi f h D_a}{1 + 4f \frac{h}{D_a}} \cdot q_0. \quad (17)$$

Входящий в формулы коэффициент трения зависит от многих факторов, основными из которых при холодной штамповке будут материалы трущихся тел, смазка, а также величина контактного давления [1,5]. Для определения значений коэффициентов трения полиуретана марки СКУ-7Л и резины марки 3826 с металлами при давлении 0,1 — 0,3 кг/см<sup>2</sup> были проведены экспериментальные исследования, результаты которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Эластичная среда	Наличие смазки	Металлы			
		Д16ЛТ АМцАМ	Ст. 3	X18H10T	OT4
Полиуретан СКУ-7Л	Без смазки	0,45	0,5	0,4	0,65
	Со смазкой	0,4	0,45	0,35	0,6
Резина 3826	Без смазки	0,7	0,65	0,75	0,8
	Со смазкой	0,35	0,4	0,3	0,5

Металлические пластины испытывались в состоянии поставки и имели чистоту поверхности от 5 до 7 класса чистоты. Для смазки применялось машинное масло. Из табл. 2 видно, что без смазки коэффициенты трения полиуретана на 25—40% меньше коэффициентов трения резины. Смазка снижает коэффициенты трения резины более интенсивно, чем полиуретана.

При штамповке трубчатых деталей величина давления эластичной среды обычно измеряется сотнями, а иногда и тысячами кг/см. Поэтому была исследована зависимость коэффициентов трения от величины давления. Эксперименты проводились на трубах из нержавеющей стали X18H10T и из титанового сплава OT4

в состоянии поставки. На рис. 2 показана схема приспособления для определения коэффициентов трения. В исследуемую трубу 1 помещалась эластичная среда 2, которая сжималась штоками 3 от гидравлического устройства 5. Сила сжатия эластичной среды  $P$  определялась при помощи манометра гидравлического устройства. Для предотвращения деформирования трубы на нее надевалась толстостенная обойма 6. Приспособление вместе с гидравлическим устройством устанавливалось на универсальную машину УММ-20. При заданной величине давления эластичной среды  $q$ , которое создавалось силой  $P$ , с помощью универсальной машины через рамку 4 производилось перемещение трубы 1 от-

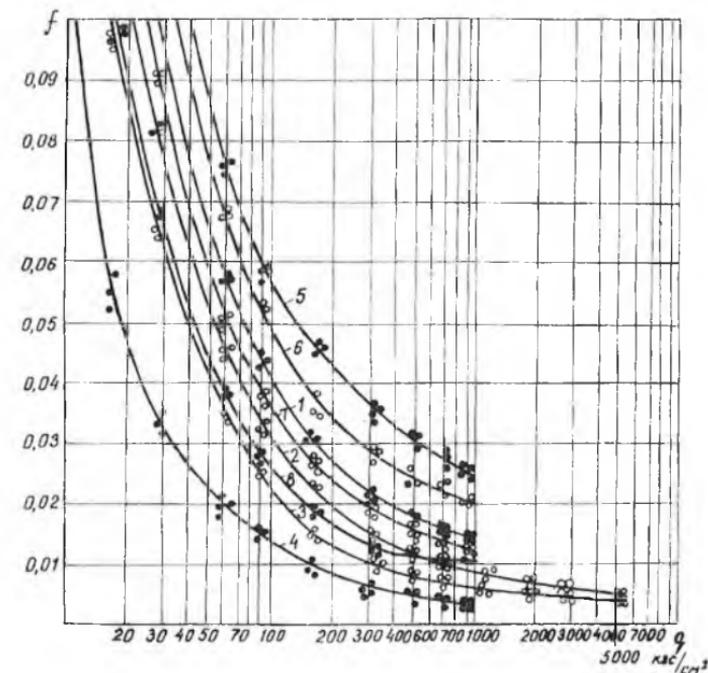


Рис. 3. Зависимость коэффициентов трения от величины давления для материалов:

1 — резина 3826 (без смазки); 2 — СКУ-7Л (без смазки); 3 — СКУ-7Л (со смазкой); 4 — резина 3826 (со смазкой) — для Х18Н10Т; 5 — резина 3826 (без смазки); 6 — СКУ-7Л (без смазки); 7 — СКУ-7Л (со смазкой); 8 — резина 3826 (со смазкой) — для ОТ4.

посительно эластичной среды 2. При этом измерялась сила контактного трения  $F_{тр}$ .

Коэффициент трения определяется по формуле

$$\hat{f} = \frac{F_{тр}}{N}, \quad (18)$$

Нормальная сила  $N$  создается давлением эластичной среды  $q$

$$N = q \pi D \delta h, \quad (19)$$

Выразив давление через силу сжатия эластичной среды  $P$

$$q = \frac{4P}{\pi D^2 \delta} \quad (20)$$

и подставив выражения (19) и (20) в формулу (18), получим

$$f = \frac{F_{\text{тр}} D \delta}{4P h} \quad (21)$$

На рис. 3 приведены экспериментальные графики зависимости коэффициентов трения полиуретана марки СКУ-7Л и резины марки 3826 от величины давления в трубах из материалов Х18Н10Т и ОТ-4. Трубы имели диаметр от 8 до 60 мм. Как показали эксперименты\*, величина коэффициента трения не зависит от диаметра труб. Значения коэффициентов трения при высоком давлении определялись на трубах меньшего диаметра.

Коэффициенты трения полиуретана в трубах Х18Н10Т удалось определить при давлении до 5350 кг/см<sup>2</sup>. Резину испытать при таких сверхвысоких давлениях не удалось, так как она крошилась и выходила из строя. Поэтому все остальные кривые построены до давления 1000 кг/см<sup>2</sup>, при котором результаты экспериментов были стабильными.

Для удобного изображения кривых в большом диапазоне величин давления (от 15 до 5350 кг/см<sup>2</sup>) по оси абсцисс принята логарифмическая шкала.

Из графиков видно, что без смазки при высоком давлении коэффициенты трения полиуретана также значительно меньше, чем для резины. Со смазкой коэффициенты трения резины несколько меньше, чем для полиуретана. Коэффициенты трения резины и полиуретана наиболее интенсивно уменьшаются при увеличении давления до 100—150 кг/см<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении давления коэффициенты трения уменьшаются в меньшей степени.

Проведенный математический анализ показал, что все экспериментальные кривые довольно точно аппроксимируются зависимостью

$$f = \frac{b}{q + a} + c \quad (22)$$

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, величины коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  зависят от материала трущихся тел и смазки, и эта зависимость имеет определенную закономерность.

\* В исследованиях принимали участие студенты В. С. Вакулюк, Е. А. Авдюков и О. А. Комарова.

Коэффициенты	Х18Н10Т				ОТ-4			
	без смазки		со смазкой		без смазки		со смазкой	
	3826	СКУ-7Л	СКУ-7Л	3826	3826	СКУ-7Л	СКУ-7Л	3826
	№ кривых							
	1	2	3	4	5	6	8	7
<i>a</i>	7,89	8,2	6,2	3,38	5,87	4,74	4,65	2,53
<i>b</i>	3,12	2,77	2,11	0,98	3,59	3,2	2,6	1,73
<i>c</i>	0,011105	0,0045	0,00364	0,00352	0,021	0,0175	0,0101	0,0081

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченков Е. П. Штамповка резиной и жидкостью. М., «Машиностроение», 1967.
2. Комаров А. Д. Упругая отдача листовых металлов при гибке в штампах. М., ж. «Кузнечно-штамповочное производство», 1965, № 11.
3. Санаровский С. В., Смеляков Е. П., Комаров А. Д. и др. В сб. «Новые способы холодной штамповки». Куйбышевское книжное издательство, 1969.
4. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. М., «Машиностроение», 1971.
5. Исаченков В. Е., Исаченков Е. П. Обобщение теории трения при обработке металлов давлением. М., ж. «Кузнечно-штамповочное производство», 1972, № 12.

А. Д. Комаров, В. В. Шалавин

## ГИБКА ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ БОРТОВ ПОЛИУРЕТАНОМ

Одной из распространенных операций при изготовлении деталей эластичной средой из листа является гибка бортов. Значительный интерес представляет гибка бортов небольшой высоты. При недостаточной высоте борта эластичная среда, обтекая борт, оставляет его недоформованным или борт формообразуется неполностью [1].

Ввиду большой неоднородности напряженно-деформированного состояния изгибаемого материала математический анализ упругопластического изгиба в общем виде очень сложен. Для упрощения решения задачи вводится ряд допущений. При анализе упругопластического изгиба принята гипотеза плоских сечений, согласно которой поперечные сечения, плоские и перпендикулярные к поверхности листа, до изгиба остаются плоскими и проходят через ось изогнутого листа после изгиба [2]. Эта гипотеза даст возможность выразить деформации растяжения и сжатия в тангенциальном направлении через радиус кривизны нейтрального слоя  $r$  и расстояние рассматриваемой точки до нейтрального слоя  $y$ .

$$\varepsilon = \frac{y}{r} \quad (1)$$