

Г.Л. ПЕТРОСЯН, М.Б. САФАРЯН, А.Ф. АМБАРЦУМЯН, В.Г. ПЕТРОСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ИХ ИСПЫТАНИЯ РАЗДАЧЕЙ

Освещен характер изменения толщины стенки по длине трубок после различных степеней их деформирования. Проведено приближенное исследование напряженно-деформированного состояния заготовок, подвергнутых малым (местным) пластическим деформациям, а также экспериментально исследованы механические свойства материала трубок до осуществления операции раздачи. Сопоставление упрочняющих характеристик плоских образцов с данными местной пластической деформации цельных трубок показывает сходимость результатов экспериментов в приемлемых диапазонах, следовательно, обосновывает использованный метод исследования местной пластической деформации.

Ключевые слова: пластическая деформация, раздача труб, оправка, диаграмма деформирования, механические свойства материала.

Экспериментальному исследованию процесса пластического деформирования тонкостенных латунных трубок различных размеров при их раздаче на конических оправках с применением разных значений коэффициента контактного трения f и пуансонов с разными углами конусности (посвящена работа [1]). Однако в ней не приведен полный анализ полученных результатов и закономерностей процесса.

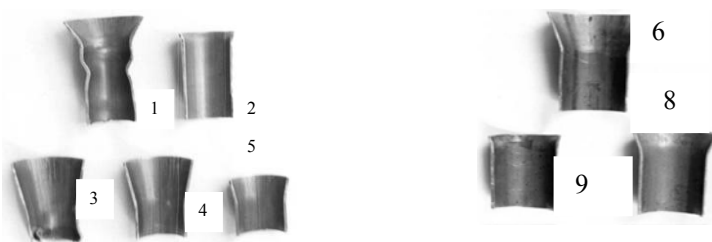


Рис. 1

Целью настоящей работы является освещение характера изменения толщины стенки по длине трубок после различных степеней их деформирования и приближенное исследование напряженно-деформированного состояния заготовок, подвергнутых малым (местным) пластическим деформациям, а также экспериментальное исследование механических свойств материала трубок до осуществления операции раздачи.

Для получения картины изменения толщины стенки (по длине трубок заранее деформированные образцы были разрезаны по диаметальному сечению на две части (рис. 1). В разных точках образцов (табл. 1 и 2) были произведены соответствующие замеры толщины стенки и диаметра трубок, на основании которых подсчитаны значения

относительной толщины стенки трубок $\bar{\delta} = \delta / \delta_0$ и текущего коэффициента раздачи $K_T = D / D_0$. Данные образцов с $D_0 = 25 \text{ мм}$ и $\delta_0 = 1,55 \text{ мм}$ приведены в табл. 1, а образцов с $D_0 = 37,7 \text{ мм}$ и $\delta_0 = 1,72 \text{ мм}$ - в табл. 2, где D_0 , δ_0 и D , δ – соответственно начальные и текущие значения диаметра и толщины стенки трубок. При этом раздача образцов 1 и 2 была осуществлена с применением пуансона с углом конусности $\gamma = 31^\circ$ и коэффициентом трения $f = 0,20$, образцов 3 – 5 - $\gamma = 12^\circ 30'$ и $f = 0,07$, а образцов 6 – 9 - $\gamma = 18^\circ$ и $f = 0,07$, причем образец 7т был испытан при температуре 200°C [1].

Таблица 1

δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,25	0,81	1,56	39,0
1,6	1,03	1,32	33,0
1,8	1,16	1,04	26,0
1,75	1,13	1,02	25,5
N°1			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,26	0,81	1,44	36,0
1,40	0,90	1,36	34,0
1,50	0,97	1,28	32,0
1,60	1,03	1,20	30,0
1,65	1,06	1,12	28,0
1,70	1,10	1,04	26,0
1,75	1,13	1,02	25,5
N° 3			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,53	0,99	1,1	28,5
1,55	1,0	1,0	25,0
N° 2			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,50	0,97	1,18	29,45
1,55	1,0	1,08	27,0
1,60	1,03	1,01	25,3
N° 5			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,33	0,86	1,37	34,15
1,43	0,92	1,26	31,5
1,53	0,9	1,18	29,5
1,60	1,03	1,10	27,5
1,65	1,06	1,02	25,5
N° 4			

Данные экспериментов табл. 1 и 2 свидетельствуют об уменьшении конечной толщины стенки трубок при их раздаче. Причем характер изменения толщины стенки трубок по их длине не однозначен и зависит от степени их деформирования.

На рис. 2 приведены зависимости изменения относительной толщины стенки трубок $\bar{\delta}$ от текущего коэффициента раздачи K_T .

При осуществлении операции раздачи с применением относительно больших степеней деформации на цилиндрической и начальных сечениях конической частей деформированных трубок наблюдается утолщение их стенки, а в сечениях, близких к выходному, - постепенное утонение (рис. 2).

Таблица 2

δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,3	0,7	1,4	54,0
1,55	0,87	1,3	51,0
1,65	0,9	1,2	47,0
1,70	0,9	1,1	44,0
1,80	1,0	1,0	40,0
1,80	1,0	1,0	38,5
N° 6			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,4	0,82	1,3	50,5
1,4	0,8	1,2	46,7
1,6	0,9	1,1	43,0
1,70	0,99	1,0	40,0
1,72	1,0	1,0	38,5
N° 7			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,4	0,86	1,25	47,0
1,6	0,93	1,14	43,0
1,70	0,9	1,06	40,0
1,75	1,02	1,00	38,0
N° 8			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K_T	D , мм
1,6	0,9	1,1	41,7
1,7	0,9	1,05	39,7
1,7	1,0	1,00	38,0
N° 9			
δ , мм	$\bar{\delta}$	K	D , мм
1,4	0,8	1,3	49,0
1,5	0,88	1,2	45,5
1,63	0,9	1,1	42,5
1,7	0,99	1,03	39,0
1,72	1,0	1,0	38,0
N° 7 _T			

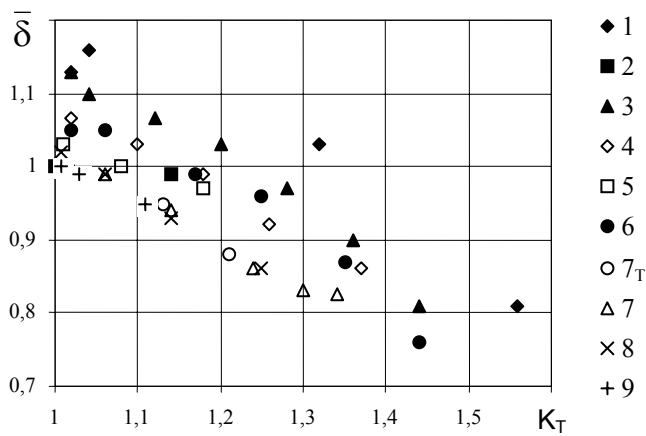


Рис. 2

Анализ напряженно-деформированного состояния материала тонкостенных труб при их раздате показал закономерность утолщения стенок труб при больших степенях деформации и последующего их утонения, причиной чего является соответственное изменение компонентов напряженно-деформированного состояния, описанного в [2]. При этом найден тот диапазон значений меридиональных

напряжений, при котором у входа конической оправки толщина стенки труб увеличивается. При раздаче трубок с относительно малыми предельными коэффициентами раздачи (образцы 2, 5 и 9) явления утолщения стенки трубок в основном не наблюдается, а пластические деформации носят местный характер. Сделав предположение, что зона пластической деформации образовавшегося конического кольца известна и участок свободного изгиба сравнительно мал [4], представляется возможным приближенно определить компоненты напряженно-деформированного состояния кольца в этой зоне. При этом после испытаний образцов устанавливаются высота конического кольца c , толщина ее стенки (δ) и средний диаметр D_{CP} (рис. 3 а).

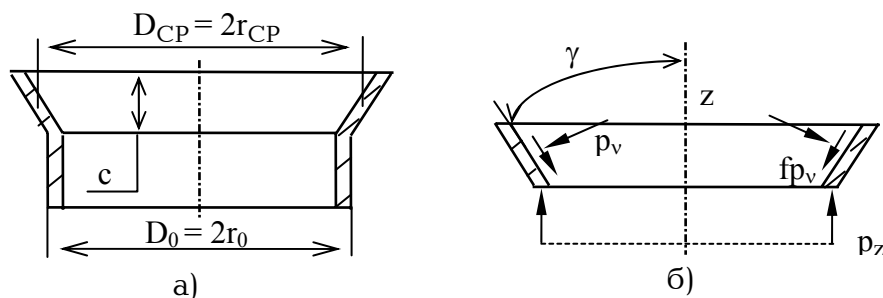


Рис. 3

На рис. 3б показан элемент пластически деформированной части трубки, нагруженный осевым давлением p_z и возникающим от него давлением оправки на трубку p_v , а также контактным касательным напряжением fp_v . Изгибающими моментами, возникающими при деформации трубы, пренебрегаем, т. е. задачу решаем на основании безмоментной теории оболочек вращения [3].

Рассмотрим уравнение равновесия элемента на рис. 3б. Проектируя все силы на ось z , имеем

$$p_v = \frac{p_z \delta r_{0c}}{c(f + \operatorname{tg} \gamma)r}. \quad (1)$$

Кроме напряжений, показанных на рис. 3 б, на элемент действуют также окружные напряжения σ_θ , для определения которых воспользуемся уравнением Лапласа [3]:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = \frac{p_v}{\delta}, \quad (2)$$

где σ_m - меридиональное напряжение; ρ_m и ρ_θ - соответственно радиусы кривизны меридионального сечения и нормального сечения оболочки, перпендикулярного к дуге меридиана.

Для конической оболочки справедливо

$$\rho_m = \infty, \quad \rho_\theta = r / \cos \gamma. \quad (3)$$

С учетом (3) перепишем формулу (2) в виде

$$\sigma_\theta = p_v r / \delta \cos \gamma. \quad (4)$$

Подставив значение p из (1) в (4), получим следующий вид функциональной зависимости между окружным и осевым напряжением:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_z r_{0cp}}{c(f + \operatorname{tg} \gamma) \cos \gamma}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что при $r \gg \delta$ и $r \gg c$ имеет место $\sigma_{\theta} \gg p_v$ и $\sigma_{\theta} \gg p_z$. Следовательно, можно предположить, что элемент трубки находится в одноосном напряженном состоянии с основным действующим напряжением σ_{θ} (5). При значениях c , близких к r , вторым по величине большим напряжением является p_z , которое по высоте c быстро убывает. На элементе конической части трубы вместо p_z действует меридиональное напряжение σ_m , которое связано с осевым давлением p_z и определяется следующей зависимостью: $\sigma_m = p_z / \cos \gamma$. Величина σ_m по высоте конического элемента также уменьшается, достигая значения нуля на выходном сечении трубки. Естественно, что для проведения числовых расчетов необходимо рассмотреть напряженно-деформированное состояние средней части деформированного элемента. Поэтому в расчетах использована величина среднего меридионального напряжения $\sigma_m = p_z / 2 \cos \gamma$.

Таким образом, под действием осевого напряжения p_z возникает контактное давление p_v (1), которое и является причиной большого окружного напряжения σ_{θ} (4) и (5). Что касается деформированного состояния конической части трубки, то основной деформацией также является положительная окружная деформация расширения ε_{θ} , которая в процентном соотношении определяется по формуле

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{r - r_0}{r_0} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Другие деформации - осевая ε_z и радиальная ε_v - являются отрицательными. Причем

$$\varepsilon_v = \frac{\delta - \delta_0}{\delta_0} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

а по условию несжимаемости

$$\varepsilon_z = -\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_v. \quad (8)$$

Так как образцы 2, 5 и 9 подвергались малым пластическим деформациям, то для них по (1), (5) - (8) можно определить как компоненты напряженно - деформированного состояния, так и соответствующие величины интенсивностей напряжений σ_i и деформаций ε_i , используя следующие формулы [3]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_v)^2 + (\sigma_v - \sigma_{\theta})^2}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_v)^2 + (\varepsilon_v - \varepsilon_{\theta})^2}. \quad (10)$$

Результаты расчетов (табл. 3) получены на основе данных о величинах p_z [1] с учетом следующей дополнительной информации об образцах 2, 5 и 9: образец 2 - $F_{\max} = 21,5 \text{ кН}$, $r_0 = 12,5 \text{ мм}$, $\delta_0 = 1,55 \text{ мм}$, $\gamma =$

$= 31^\circ$, $f = 0,2$, $c_2 = 4,7$ мм, $r_{CP} = 13,4$ мм, $\delta_{CP} = 1,54$ мм, $r_k = 14,25$ мм, $\delta_k = 1,53$ мм; образец 5 - $F_{max} = 23$ кН, $r_0 = 12,5$ мм, $\delta_0 = 1,55$ мм, $\gamma = 12^\circ 30'$, $f = 0,07$, $c_5 = 13,6$ мм, $r_{CP} = 13,5$ мм, $\delta_{CP} = 1,55$ мм, $\delta_k = 1,50$ мм, $r_k = 14,7$ мм; образец 9 - $F_{max} = 18,5$ кН, $r_0 = 18,85$ мм, $\delta_0 = 1,72$ мм, $\gamma = 18^\circ$, $f = 0,07$, $c_9 = 7$ мм, $r_{CP} = 19,85$ мм, $\delta_{CP} = 1,7$ мм, $\delta_k = 1,63$ мм, $r_k = 20,85$ мм.

Таблица 3

N ^о	p_z , МПа	$\sigma_{\mu CP}$, МПа	$\sigma_{\theta CP}$, МПа	$p_{V CP}$, МПа	$\sigma_{1 CP}$, МПа	$\varepsilon_{\theta CP}$	$\varepsilon_{\theta max}$	$\varepsilon_{1 CP}$
2	176,61	103,02	353,03	36,97	395,97	0,072	0,151	0,083
5	188,93	96,76	285,98	34,01	355,55	0,080	0,192	0,092
9	90,81	47,74	314,35	26,75	352,07	0,053	0,106	0,061

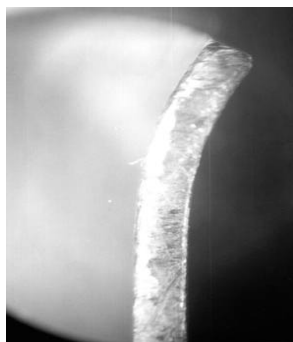


Рис. 4

Так как на приведенные данные большое влияние оказывает точное определение величины c , то измерения проводились с использованием микроскопа. На рис. 4 показана зона местного пластического деформирования образца 2, увеличенная в 10,784 раза. Исследования деформированной зоны показали, что при малых пластических деформациях радиальные деформации значительно меньше деформаций ε_{θ} и ε_z .

Что касается исследования механических свойств материала трубок до операции раздачи, то эксперименты были проведены по растяжению трех образцов, полученных из полос разрезанных недеформированных трубок диаметром $D_0 = 25$ мм. Образцы размерами $b_1 = 6,2$ мм, $b_2 = 6,1$ мм, $b_3 = 6,1$ мм, $l_1 = 34,6$ мм, $l_2 = l_3 = 35,15$ мм и $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1,55$ мм растягивались на разрывной испытательной машине "ИР 5046 - 5". Данные экспериментов для плоских образцов 1п, 2п и 3п приведены в виде диаграмм 1, 2 и 3 соответственно (рис. 5). Точками 4 и 5 также показаны расчетные данные $\sigma_i - \varepsilon_i$

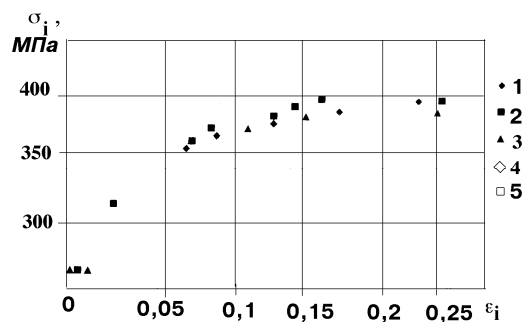


Рис. 5

малодеформированных образцов 2 и 5.

Данные образца 9 на рис. 5 не показаны, так как диаграмма деформирования материала этого образца не исследована.

Из приведенных выше технологических параметров местного пластического деформирования образцов 2 и 5 соответственно имеем: $\gamma_2 = 31^\circ$, $f_2 = 0,2$, $c_2/r_{CP2} = 0,35$, $\gamma_5 = 12^\circ 30'$, $f_5 = 0,07$, $c_5/r_{CP5} \approx 1$; согласно данным [4], для образца 2 при больших (γ и f фактор изгиба больше. Поэтому точка 4 (образец 2) лежит выше диаграммы деформи-

рования

материала. Что касается расположения точки 5 (образец 5) ниже диаграммы деформирования, то это, вероятно, можно объяснить большим значением контактирующей длины c_5 , в результате чего осреднение данных по длине контакта c_5 является грубым.

Таким образом, приведенный полный анализ экспериментальных данных процесса раздачи выявляет характер изменения толщины стенки по длине трубок при их пластическом деформировании, а результаты сопоставления упрочняющихся характеристик плоских образцов с данными местной пластической деформации цельных трубок объясняются анализом технологических параметров последних.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросян Г.Л., Сафарян М.Б., Амбарцумян А.Ф., Петросян В.Г.** Экспериментальное исследование процесса раздачи тонкостенных труб // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000. – Т. 53, ¹ 1. – С. 3 – 7.
 2. **Петросян Г.Л., Амбарцумян А.Ф.** Особенности исследования процесса раздачи тонкостенных труб на конических оправках // Сб. докл. годичн. науч. конф. ГИУА. – 1998. – С. 27 – 34.
 3. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести – М.: Машиностроение, 1975. – 339 с.
 4. **Попов Е.А.** Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
- Работа выполнена в рамках финансируемой госбюджетной научной темы РА N 98 – 847.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 18.06.1999.

**Գ. Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Մ.Բ. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ա.Ֆ. ՀԱՄԲԱՐԶՈՒՄՅԱՆ,
Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ**

**ԽՈՂՈՎԱԿՆԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆ ԻՐԱՎԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՆՐԱՆՑ
ԸՆԴԱՐՁԱՎԱՍՏԲ ՓՈՐՁԱՐՎԱՍՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ**

Լուսաբանված է խողովակների դեֆորմացիան տարբեր աստիճաններից հետո նրանց երկարությամբ պատի հաստության փոփոխման բնույթը, կատարված է փոքր (տեղային) պլաստիկ դեֆորմացիաների ենթարկված նախապատրաստվածքների լարվածա - դեֆորմացիոն վիճակի մոտավոր հետազոտություն, ինչպես նաև փորձնականապես ուսումնասիրված են խողովակների նյութի մեխանիկական հատկությունները ընդարձակման գործընթացի իրականացումից առաջ:

**G.L. PETROSSYAN, M.B. SAFARYAN, A.F. HAMBARDZUMYAN,
V.G. PETROSSYAN
INVESTIGATION OF REAL TUBE DEFORMATION PROCESSES
ON THE BASIS OF THEIR TESTING DATA BY EXPANSION**

The tube wall thickness alteration character by their length after various degrees of their deformation is elucidated. An approximation research on stress-strain state of specimens subjected to small (local) plastic deformations is carried out. Mechanical properties of tube material before their expansion process realizing are investigated. The comparison of flat specimen strengthening characteristics with local plastic deformation data of integral tubes shows the convergence of experimental results in acceptable ranges, thus grounding the local plastic deformation investigation method used.