

Л и т е р а т у р а

1. Gough H.J., Sopwith D.G., *J. Inst. Metals*, 1932, 49, p. 93.
2. Shahinian P., *Trans Am Soc. Metals*, 1956, 48, p.952.
3. Pickus M.R., Pazkev E.R., *Special Technical Publication* №108, 1951, p. 26.
4. Веркин Б.И., Любарский И.М., Бойчук Н.М., Трянберг Н.М., Алексеев А.И. Космические исследования на Украине, вып. I (Киев, "Наукова думка", 1973, с. 28.
5. Fogestiez H., Clauss A., *Revue de Metallurgie*, LII, 1956, № 12, p.961.
6. Крамер И., Демер Л. Влияние среды на механические свойства металлов. М., "Металлургия", 1964.
7. Kzamez J.R., Podlaseck S., *Acta metallurgica*, vol.11, №1, 1963, p.70-71.
8. Оно С., Кондо С. Молекулярная теория поверхностного натяжения жидкости. И., Л., 1963, с. 25.
9. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. М., Гостехиздат, 1948.
10. Feuzstein S., Rice S., Conrad H., *Appl. Physics Letters*, vol.4, 1964, № 8, p. 154.

УДК 669.715

Ю.С.Старостин, В.Р.Каргин,
Г.В.Чертков

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ

Для изготовления деталей, применяемых в технике, - шнеков, направляющих, завихрителей, теплообменников используются тонкостенные трубные полуфабрикаты из алюминиевых сплавов со спиральными внешними или внутренними ребрами. Изготавливают их в основном путем прокатки или прессования труб или профилей с прямыми продольными ребрами с последующим закручиванием ребер в холодном состоянии на растяжных машинах с вращающейся головкой [1], [2]. Однако в литературе методика расчета технологической операции пластического кручения не рассматривается, поэтому целью данной работы было устранение этих пробелов.

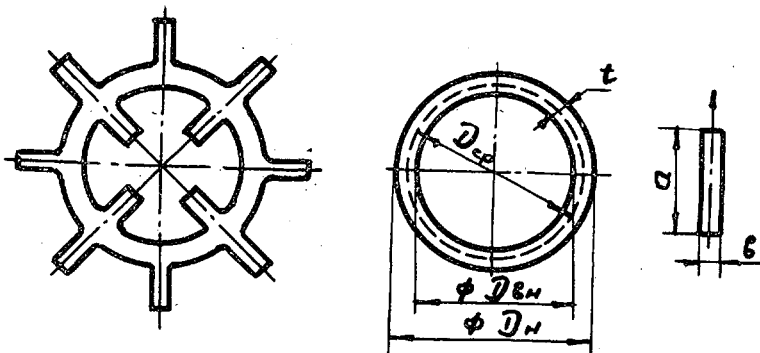
При назначении рациональных технологических режимов получения полуфабрикатов точных размеров необходимо знать два основных технологических параметра: крутящий момент и количество оборотов вращающейся головки.

Число оборотов

$$N = \frac{\theta l}{2\pi}, \quad (1)$$

где θ - угол закрутки на единицу длины, рад/м;
 l - длина скручиваемой трубы.

Рассчитывая эти величины при свободном кручении, представим ребристую трубу как состоящую из совокупности отдельных элементов с более простым поперечным сечением: в виде тонкостенной гладкой трубы внешних и внутренних ребер (рис. I). Допустим при этом, что все отдельные элементы поворачиваются при кручении на один и тот же угол



Р и с. I. Поперечное сечение ребристой трубы (а) и ее составные элементы: гладкая труба (б); ребра (в)

После операции закрутки и освобождения концов трубы от зажимов под действием сил упругой деформации происходит их раскручивание на некоторый угол α .

Согласно теореме Ильюшина об упругой разгрузке, угол кручения и угол упругой раскрутки связаны соотношением

$$\theta = \beta + \alpha, \quad (2)$$

где β - угол остаточного закручивания

Угол упругой раскрутки находится из уравнения равновесия после разгрузки $M + M_{упр} = 0$.

Откуда

$$\alpha = \frac{M}{D}, \quad (3)$$

где D - жесткость трубы при кручении [3],

$$D = \frac{S}{4F^2 G t}. \quad (4)$$

Здесь S - длина срединной линии кольцевого сечения трубы;
 F - усредненное значение площади, заключенной между внешними и внутренним контуром поперечного сечения;
 t - толщина стенки; G - модуль сдвига материала;

Для материала, упрочняемого по степенному закону; крутящий

момент

$$M = \int_0^{R_{вн}} \int_{2\pi}^{R_{н}} \tau r^2 dy dz = \frac{6FC(\gamma)^n t}{n+3}, \quad (5)$$

где C и n - константы, определяемые из диаграммы $\tau = f(\gamma)$, которую можно получить путем перестройки диаграммы растяжения $\sigma(\epsilon)$:

$$n = \frac{\epsilon_g \frac{\sigma_g}{\sigma_s}}{\epsilon_g \frac{\sigma_g}{\sigma_s}}, \quad C = (0,5 \div 0,58) \frac{\sigma_g}{\epsilon_g^n},$$

γ - деформация на сдвиг; $\gamma = R_{ср} \theta$.

При $n = 1$ формула (5) переходит в формулу для упругого кручения [4]:

$$M_{упр} = K \frac{\pi (D_{н}^2 - D_{вн}^2)}{16 D_{н}}, \quad (6)$$

а при $n = 0$ - в формулу для чисто пластического кручения [3]

$$M_{пл} = 2 F t_k, \quad (7)$$

где $K = \sigma_s / 2$ - по условию Треска-Сен-Венана или $K = \sigma_s / \sqrt{3}$ - по условию Мизеса.

Результаты исследования, приведенные в работе [3], показали, что для тонкостенных труб отношение $M_{упр} / M_{пл} \approx 1$, т.е. все сеченные трубы за пределом упругости переходят в пластическое состояние. Поэтому в дальнейших расчетах упруго-пластическое кручение не рассматривается.

Для упрощения расчетов внешние и внутренние ребра принимались в виде узкого прямоугольника размерами a и b (см.рис.) При этом влиянием узких сторон на распределение касательных напряжений можно пренебречь, если считать, что ребра, как и труба при кручении за пределом упругости находятся в пластическом состоянии. Далее показано, что такое допущение не вносит существенной погрешности, так как влияние ребер на момент кручения незначительно.

С учетом упрощения крутящий момент

$$M = a \int_{-b/2}^{b/2} \tau x dx = \frac{C (\theta/2)'' a b^2}{n+2} \quad (8)$$

При $n = 1$ формула (8) переходит в формулу для упругого кручения [5]:

$$M = \frac{1}{3} a b^2 k, \quad (9)$$

а при $n = 0$ - в формулу для чисто-пластического кручения [5]:

$$M = 1/2 a b^2 k.$$

Суммарный крутящий момент определяется по уравнению

$$M = M_{mp} + \sum_{i=1}^m M_i + \sum_{j=1}^L M_j, \quad (10)$$

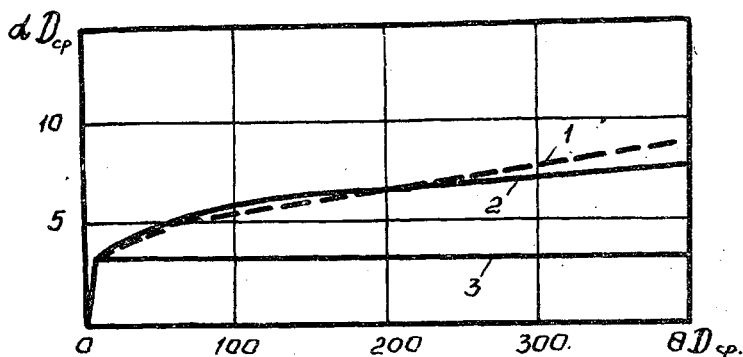
где m и L - количество внешних и внутренних ребер.

С целью проверки полученных аналитических зависимостей был проведен эксперимент по пластическому кручению моментом внутри-оробренных труб ($L = 8$) из АДЗПТ с наружным диаметром 26 мм, толщиной стенки и ребер 2 мм и высотой ребер 8 мм. Расчетный момент для указанных труб, закрученных на угол 360 град/м, был равен 23,1 кгм, фактический - 25 кгм. Отклонение составило около 8% что свидетельствует о достаточной точности определения крутящего момента. При этом момент кручения ребер оказался на порядок меньше расчетного момента, что подтверждает сделанное допущение.

Тогда уравнение (3) для угла упругой раскрутки с учетом крутящего момента (5) будет:

$$\alpha \approx \frac{C(R_{cp} \theta)''}{(n+3)R_{cp} b} \quad (11)$$

уравнение (II) проверялось на основе экспериментальных данных [I], полученных для гладких и ребристых труб из ОХ18Н12Т. Из сопоставления графиков, приведенных на рис. 2, следует,



Р и с. 2. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений угла упругого раскручивания α трубы: 1 - экспериментальная кривая; 2 - расчетные значения с учетом упрочнения; 3 - расчет без учета упрочнения

что теоретические и экспериментальные значения углов раскрутки очень близки друг к другу. Угол раскрутки практически не зависит от наличия ребер на трубе, а определяется размерами и механическими свойствами гладкой трубы. Неучет упрочнения материала при пластическом кручении приводит к большой погрешности в определении угла раскрутки.

Уменьшить влияние упругой раскрутки при разгрузке и тем самым повысить точность процесса можно путем пластического кручения с растяжением. При этом на трубу вначале оказывает влияние продольная сила N , вызывающая напряжения в поперечном сечении меньше σ_s , а затем подключается крутящий момент, доводящий трубу до пластического состояния.

Если считать, что под влиянием крутящего момента распределение нормальных напряжений, в сечении, вызванных продольной силой, не изменяется, то, согласно энергетической теории, получим

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sigma_s ;$$

$$\left(\frac{N}{N_{pd}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{pr}}\right)^2 = 1,$$

где $N_{np} = 2\pi R_{cp} t \sigma_s$; $M_{np} = 2\pi / \sqrt{3} R_{cp}^2 t \sigma_s$.

Откуда

$$M = \frac{R_{cp}}{\sqrt{3}} \sqrt{4\pi^2 R_{cp}^2 t^2 \sigma_s^2 - N^2}.$$

Следовательно, чем больше величина растягивающей силы N , тем меньший момент необходимо приложить к трубе, чтобы перевести ее в пластическое состояние. Меньший момент вызывает и меньший угол раскрутки. При таком подходе удалось получить трубы со спиральными внутренними ребрами путем одновременного волочения с кручением [6] с минимальным углом упругой раскрутки.

Л и т е р а т у р а

1. Д о р о х о в А.И., Н и к у л и н Э.В. - В кн.: "Производство труб", вып. 20. М., "Металлургия", 1968, с. 67-69.

2. Д о р о х о в А.И., Н и к у л и н Э.В. - В кн.: "Производство труб", вып. 22, М., "Металлургия", 1969, с. 85-89.

3. Т и м о ш е н к о С.П., Г у д ь е р Дж. Теория упругости. Перев. с англ. М., "Наука", 1975, с. 576.

4. Т о м л е н о в А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М., "Металлургия", 1972, с. 408.

5. Б е з у х о в Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М., "Высшая школа", 1968, с. 512.

6. С т а р о с т и н Ю.С., П л о х о в В.И., Е р о х о в В.К. и др. Авт. св. СССР № 386539. Бюл. изобретений и товарных знаков, № 47, 1975, с. 36.