

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОЧЕНИЯ С КРУЧЕНИЕМ КВАДРАТНЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ

© 2004 В. Р. Каргин, Е. В. Шокова

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведен анализ волочения с кручением квадратных и прямоугольных труб. Предложена методика по расчету технологических параметров, обеспечивающая удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Квадратные и прямоугольные трубы чаще всего получают из круглой заготовки безоправочным волочением в волоку с каналом фасонного сечения [1]. Более широкие технологические возможности этого процесса открываются при воздействии на заготовку крутящего момента, расположенного в плоскости, перпендикулярной оси волочения, что позволяет получать квадратные и прямоугольные трубы, свернутые в спираль.

Возможны следующие способы волочения в сочетании с кручением (рис. 1): скручивание фасонной трубы вращающимся захватом, установленным на тележке волочильного стана [2]; скручивание фасонной трубы путем принудительного вращения волоки [2]; скручивание фасонной трубы при одновременном волочении через две волоки [3]. Преимуществом рассматриваемых способов является то, что каналы волок имеют на внутреннем контуре плоские поверхности (грани), что исключает проворот заготовки относительно оси волочения во время скручивания и дает возможность прикладывать к протягиваемой заготовке необходимый крутящий момент.

При волочении по первому и второму способам в волоке происходит формоизменение круглой заготовки в фасонное сечение, а на участке между волокой 1 и захватом 2 труба скручивается в спираль (рис. 1а, б) крутящим моментом  $M_{кр}$ .

При волочении по третьему способу скручивание квадратной (прямоугольной) заготовки происходит между фасонными волоками (рис. 1в), расположенными на расстоянии  $l$  в и повернутыми относительно друг друга на угол  $\alpha$  вокруг их общей оси. Воло-

ки имеют возможность совместного свободного вращения относительно оси волочения.

При разработке методики расчета технологических параметров волочения с кручением квадратных и прямоугольных труб приняты следующие допущения: рассматривались тонкостенные трубы постоянной толщины; полагалось, что все сечения трубы за пределом упругой деформации сразу переходят в пластическое состояние; учитывался степенной закон упрочнения; заготовка считалась трансверсально изотропной, механические свойства в поперечном сечении одинаковы, но отличны от свойств в продольном направлении. Главные оси анизотропии 1 и 2 расположены в плоскости поперечного сечения заготовки, а ось 3 – вдоль продольной оси трубы, совпадающей с осью волочения.

Распределение касательных напряжений  $\tau_{z\varphi}$  при пластическом кручении тонкостенных прямоугольных труб постоянной толщины  $t$  с размерами граней  $a$  и  $b$  по срединной линии имеет вид [4]

$$\tau_{z\varphi} = \frac{M_{кр}}{2abt}, \quad (1)$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент.

Из формулы (1) следует, что касательные напряжения распределены по толщине сечения равномерно и направлены параллельно касательной к срединной линии контура трубы.

Для определения угла упругой раскрутки после волочения применялась формула Бредта [4]

$$\gamma_{z\varphi} = \frac{M_{кр}}{2G_{1-2}t} \frac{a+b}{a^2b^2}, \quad (2)$$

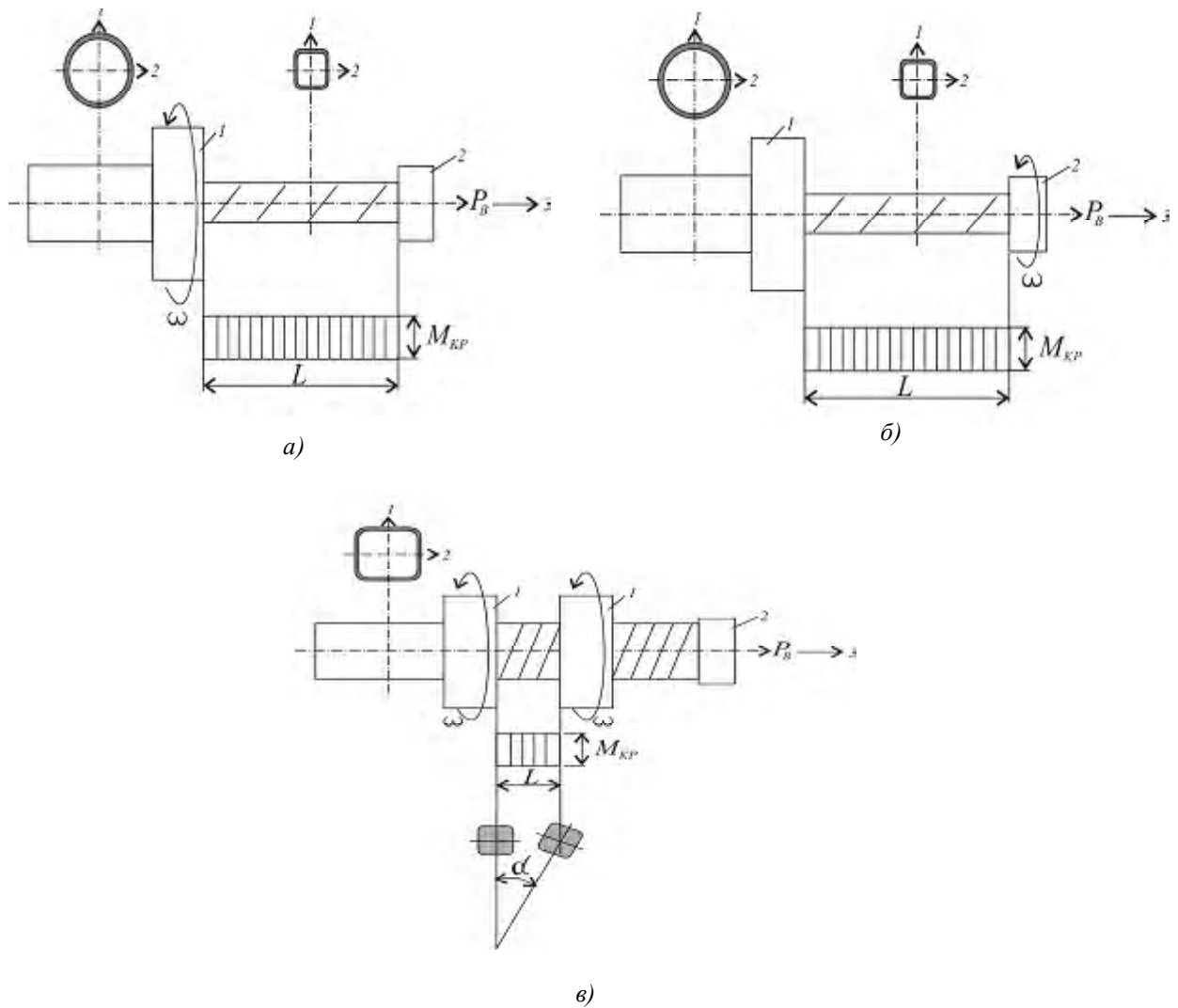


Рис. 1 Способы волочения в сочетании с кручением: 1 – волокна, 2 – захват

где  $M_{кр}$  – величина крутящего момента перед разгрузкой,  $G_{1-2}$  – модуль сдвига в плоскости поперечного сечения трубы.

Для расчета кручения тонкостенных квадратных труб ( $a = b$ ) формулы (1) и (2) принимают вид:

$$\tau_{z\varphi} = \frac{M_{кр}}{2a^2t}, \quad \gamma_{z\varphi} = \frac{M_{кр}}{G_{1-2}t} \frac{1}{a^3}.$$

При волочении по первому и второму способам угловую скорость вращения волокна (захвата)  $\omega$  выбирают так, чтобы угол относительной закрутки  $\theta$  был постоянным в течение всего процесса протягивания

$$\theta = \frac{n_е}{\tau_е}, \tag{3}$$

где  $n_е$  – число оборотов волокна (захвата);  $\tau_е$  – время, необходимое для волочения одной трубы длиной  $l_{mp}$ :

$$\tau_е = \frac{l_{mp}}{v_е}; \tag{4}$$

$v_е$  – скорость волочения.

Угол закрутки можно выразить через число оборотов вращающейся волокна (захвата) из выражения

$$n_е = \frac{\theta l_{mp}}{2\pi}. \tag{5}$$

Подставив формулы (4) и (5) в выражение (3), получим соотношение для расчета угловой скорости вращения волоки (захвата)  $\omega$ , соответствующей скорости волочения

$$\omega = \frac{\theta v_6}{2\pi} \quad (6)$$

При волочении по третьему способу необходимый угол относительной закрутки может быть найден подбором величин  $\alpha$  и  $l_6$

$$\theta = \frac{\alpha}{l_6}$$

Крутящий момент для квадратного и прямоугольного сечений труб можно вычислить с помощью эмпирического уравнения

$$M_{кр} = M_{кр.тр} \frac{J_k}{(J_k)_{кр.тр}}, \quad (7)$$

где  $M_{кр.тр}$  и  $(J_k)_{кр.тр}$  – момент кручения и полярный момент инерции сечения для круглой тонкостенной трубы, имеющей тот же периметр по средней линии, что и поперечное сечение скручиваемой квадратной (прямоугольной) трубы. Полярные моменты инерции квадратной (прямоугольной) и круглой тонкостенных труб соответственно равны [4]:

$$J_k = \frac{4F^2 t}{S}, \quad (J_k)_{кр.тр} = \frac{\pi d^3 t}{4},$$

где  $F$  - площадь, ограниченная средней линией сечения прямоугольной (квадратной) трубы;  $S$  - длина срединной линии прямоугольной (квадратной) трубы;  $d$  - средний диаметр круглой трубы.

Из анализа уравнения (7) следует, что конфигурация контура поперечного сечения фасонных труб заметно влияет на величину момента. Максимальный крутящий момент будет иметь место при скручивании круглой трубы. По сравнению с квадратным поперечным сечением при равенстве периметров по средней линии наименьший момент имеют трубы прямоугольного сечения.

Момент кручения круглой трубы с учетом деформационного упрочнения [2]

$$M_{кр} = \frac{6FA_{1-2}\gamma_{i1-2}^n t}{n+3}, \quad (8)$$

где  $F$  - усредненное значение площади, заключенной между внешним с радиусом  $R_n$  и внутренним  $R_6$  контурами поперечного сечения трубы;  $A_{1-2}$ ,  $n$  - константы упрочнения.

Если считать, что под влиянием крутящего момента распределение нормальных напряжений в поперечном сечении, вызванных силой волочения, не изменяется, то согласно энергетической теории предельного состояния при одном и том же пределе текучести материала получим

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{s3}}\right)^2 + \frac{1+\mu_r}{1-\mu_r} \left(\frac{\tau_{\varphi z}}{\sigma_{s3}}\right)^2 = 1,$$

где  $\sigma_{s3}$  - предел текучести металла трубы в направлении 3;  $\mu_r$  - коэффициент анизотропии.

Это уравнение можно представить в виде

$$\left(\frac{P_6}{P_{пред}}\right)^2 + \left(\frac{M_{кр}}{M_{пред}}\right)^2 = 1, \quad (9)$$

где  $P_{пред}$  и  $M_{пред}$  - предельные значения усилия волочения и крутящего момента, соответственно.

Из формулы (9) видно, что связь между усилием волочения и крутящим моментом подчиняется закону эллипса (рис. 2).

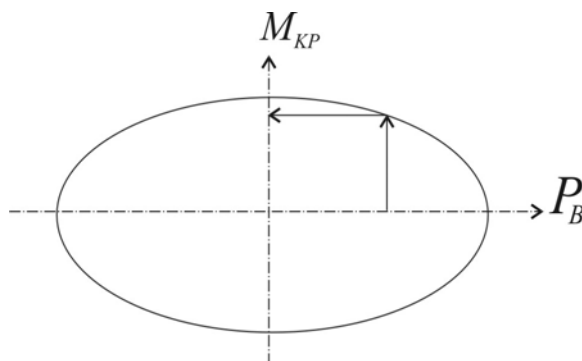


Рис. 2. Зависимость между энергосиловыми параметрами волочения с кручением

Чем больше величина силы волочения квадратной (прямоугольной) трубы, тем меньший момент необходимо приложить к трубе, чтобы привести ее в пластическое состояние. С другой стороны, касательные напряжения, возникающие от крутящего момента на проволоченном участке, снижают нормальные напряжения, а в целом ограничивают величину активных сил, прикладываемых к заготовке, на выходе из волоки.

При волочении по третьему способу усилие равно

$$P_{np} = P_{кр} + P_{тр},$$

где  $P_{кр}$  - составляющая усилия волочения, необходимая для создания винтового движения,  $P_{тр}$  - составляющая усилия волочения, необходимая для преодоления сил трения в канале волоки.

При расчете составляющих полного усилия протягивания используем уравнение баланса мощностей активных и реактивных сил. Мощность, необходимую для создания винтового движения, равную произведению внешнего момента на искомую угловую скорость вращения трубы на выходе из волоки, приравняем к мощности, передаваемой захватом, определяемой произведением осевой силы на скорость волочения

$$P_{кр} v_в = M_{кр} \omega.$$

Откуда

$$P_{кр} = \frac{M_{кр} \omega}{v_в}.$$

Используя соотношение между угловой и поступательной скоростями движения

$$\omega = \frac{2\pi}{B} v_в,$$

окончательно получим

$$P_{кр} = \frac{M_{кр} 2\pi}{B},$$

где  $B$  - шаг спирали винтовой закрутки.

Аналогично находим составляющую из равенства мощностей

$$P_{тр} v_в = \Pi l_{кал} f \sigma_T v_в,$$

$$P_{тр} = \Pi l_{кал} f \sigma_T,$$

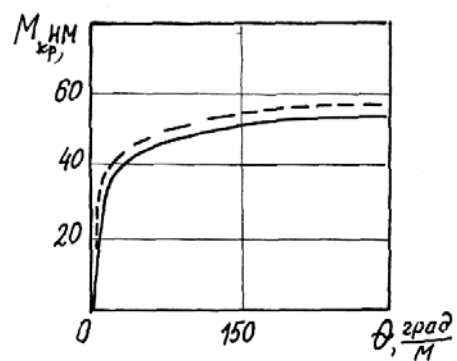
где  $\Pi$  - периметр квадратной (прямоугольной) трубы по внешнему контуру,  $l_{кал}$  - длина калибрующего участка,  $f$  - коэффициент внешнего трения.

Окончательно имеем

$$P_{np} = \frac{M_{кр} 2\pi}{B} + \Pi l_{кал} f \sigma_{T3}.$$

Адекватность уравнения (7) проверялась на основе экспериментальных данных, полученных для прямоугольных труб ( $a = 18$  мм,  $b = 12$  мм,  $t = 1$  мм) из сплава Д16. Волочение трубы производилось из круглой заготовки путем ее протягивания через прямоугольный канал волоки. Скручивание осуществлялось вращающимся захватом. Из сопоставления графиков, приведенных на рис. 3, следует, что расчетная и экспериментальная диаграммы кручения имеют удовлетворительное совпадение (в пределах 10 %).

На рис. 4 показаны образцы прямоугольных винтообразно закрученных труб, полученных в процессе волочения по третьему варианту и на закруточной машине. Кручение тонкостенных прямолинейных труб на закруточной машине не позволяет получить винтовые трубы из-за потери заготовкой устойчивости поперечного сечения при приложении к ней крутящего момента.



— расчет, - - - эксперимент

Рис. 3. Диаграмма кручения



Рис. 4. Образцы профильных винтообразно закрученных труб:  
а – в процессе волочения,  
б – на закруточной машине



Рис. 5. Образцы профильных винтообразно закрученных труб

Образцы квадратных и прямоугольных винтообразно закрученных труб из медных и алюминиевых сплавов, полученных в лабораторных условиях при различных способах волочения в сочетании с кручением, приведены на рис. 5.

Рассмотренные способы волочения в сочетании с кручением позволяют получить разнообразные квадратные и прямоугольные винтообразно закрученные трубы требуемой геометрии поперечного сечения и угла подъема спирали. При скручивании квадратных и прямоугольных труб целесообразно использовать формулы для круглой тонкостенной трубы того же периметра, что и поперечное сечение квадратной (прямоугольной) трубы.

### Список литературы

1. Шурупов А. К., Фрейберг М. А. Производство труб экономичных профилей. – Свердловское государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии. 1963. - 296 с.
2. Каргин В. Р. Процессы получения винтовых профилей и труб. М.: Металлургия. 1994. - 96 с.
3. А. С. № 130481 МКИ 7с5. Устройство для скручивания некруглых профилей волочением / В. Л. Колмогоров, Г. М. Моисеев, Ю. И. Шахмаев и др. Опубл. Б. И., 1960. № 15, с. 21.
4. Тимошенко С. П. Статические и динамические проблемы теории упругости. Киев: Наукова думка. 1975. - 563 с.

## CALCULATION OF TWIST DRAWING PARAMETERS FOR SQUARE AND RESTANGULAR PIPES

© 2004 V. R. Kargin, E. V. Shokova

Samara State Aerospace University

Analysis of twist drawing has been carried out for square and rectangular pipes. A procedure for calculating technical parameters providing satisfactory agreement with the experimental data is proposed.