

**В.А. БОГУСЛАЕВ**, проф. каф. техн. механики,  
**М.Н. БАГМЕТ**, доц. каф. техн. механики, Харьковский аэрокосмический  
 университет им. Жуковского „ХАИ”, г. Харьков,  
**О.В. ПОКАТОВ**, инж., **В.А. МАТЮХИН**, инж., Харьковский  
 машиностроительный завод „ФЭД”

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИБКИ

У статті визначено обмеження при використанні процесу згинання, такі як утонення і стовщення стінок, овальність перетину та висота складок, що з'являються на стиснутій стороні при згинанні труб.

In the article the limitations are determined at the use of bending process, such as necking and thickening of walls, ovalness of crossing and height of folds which appears in compressed side at pipes bending.

**Введение.** Минимально допустимые радиусы изгиба труб зависят от механических свойств металла, от величины допустимого утонения стенок, от угла изгиба, а также от допустимой величины волн на вогнутой стороне и допустимой овальности, что находится в зависимости от тех мер, которые принимаются для предотвращения потери устойчивости стенки и развития овальности. Изделия различного назначения имеют ограничения по различным параметрам; например, на изогнутых трубопроводах, работающих в условиях вибрационных нагрузок, не допускается волнистость, так как это приводит к концентрации напряжений. На трубопроводах высокого давления, работающих в статических условиях, опаснее чрезмерное утонение; во многих случаях на трубах необходимо после гибки сохранить площадь внутреннего отверстия, чтобы не уменьшать проходное сечение, и тогда необходим строгий допуск на овальность. Для трубопроводов, работающих при высоких температурах, весьма нежелательна разностенность. Однако во всех случаях перечисленные требования предъявляются совокупно, и по всем параметрам ставятся довольно жесткие допуски, выполнение которых находится в прямой зависимости от величины радиуса и от освоения операции гибки; иногда поставленный на чертеже без особого обоснования малый размер радиуса вызывает очень большие затруднения на производстве по внедрению новых изделий и влечет за собой массовый брак.

**1. Постановка задачи и цель исследования.** Минимальный радиус гибки труб может назначаться в зависимости от предельных степеней деформаций растяжения или сжатия, которые совершаются при формоизменении заготовки; в зависимости от деформации могут быть ограничения по утонению стенок или по величине перепада толщин стенок. Могут быть также ограничения по овальности или по высоте складок, появляющихся на сжатой стороне. Разберем каждое из этих ограничений отдельно.

**2. Утонение и утолщение стенок.** Утонение стенок трубы происходит на выпуклой стороне изделия вследствие значительных тангенциальных деформаций. Если принять, что диаметр трубы не изменяется и выполняется гипотеза

плоских сечений, то тангенциальная деформация на крайнем наружном и крайнем внутреннем волокнах стенки заготовки будет соответственно равна

$$\delta_n = \frac{d_n}{2\rho}; \quad \delta_g = \frac{d_g}{2\rho}. \quad (1)$$

Разность между этими деформациями будет равна  $\frac{d_n - d_g}{2\rho} = \frac{S}{2\rho} = \frac{\bar{S}}{2\rho}$ ,

где  $\bar{S}$  и  $\bar{\rho}$  – относительная толщина стенки и относительный радиус изгиба трубы (отнесенные к диаметру). При относительных толщинах стенки  $\bar{S} = 10\%$  и  $\bar{\rho} = 5$  разность деформаций не превышает 1 %, что составляет 10 % от общей деформации, определяемой уравнениями (1); при больших радиусах разность деформаций будет еще меньше. Поэтому тангенциальную деформацию по толщине стенки можно принять равномерной и равной

$$\delta = \frac{d_{cp}}{2\rho} = \frac{d_n - S_0}{2\rho}. \quad (2)$$

При условии, что диаметр заготовки не изменяется, тангенциальная деформация из условия постоянства объема будет равна деформации в направлении толщины, которая, в свою очередь, может быть выражена уравнением

$$\delta = \frac{S_0 - S_{\min}}{S_0}. \quad (3)$$

Из равенства (2) и (3) минимальная толщина стенки после деформации будет равна

$$S_{\min} = S_0 \left( 1 - \frac{1 - S_0}{2\rho} \right), \quad (4)$$

или в относительных величинах

$$S_{\min} = S_0 \left( 1 - \frac{1 - \bar{S}_0}{2\bar{\rho}} \right). \quad (5)$$

Из тех же предпосылок максимальная толщина стенки в сжатой зоне при условии отсутствия потери устойчивости определяется из уравнения

$$S_{\min} = S_0 \left( 1 + \frac{1 - \bar{S}_0}{2\bar{\rho}} \right). \quad (6)$$

Из уравнения (5) может быть определен минимальный относительный радиус изгиба при условии, если назначена минимально допустимая толщина стенки трубы:

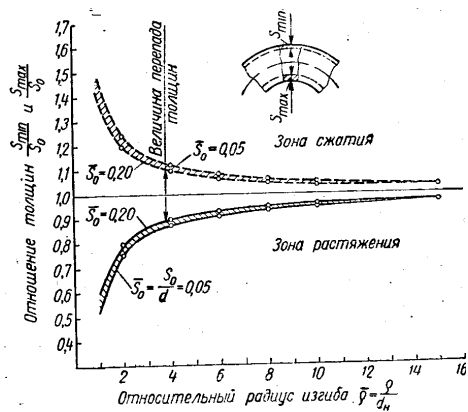


Рис. 1. Зависимость толщины стенки от радиуса изгиба трубы

можно определить допустимые радиусы изгиба в зависимости от утонения стенок или от перепада толщин; из графика также видно, что относительная толщина заготовки сравнительно мало влияет на утонение и утолщение стенок.

**3. Овальность сечения.** Овальность трубы, которая образуется при гибке, уменьшает площадь проходного сечения и момент инерции относительно нейтральной оси. Допуски на овальность для трубопроводов различного назначения лежат в пределах от +2% до +8% диаметра.

Овальность развивается не только в тех местах, где к заготовке прикладывается сосредоточенная сила, которая стремится смять трубу, но и в тех случаях, когда изгиб производится чистым моментом, т.е. когда изгибающий момент по длине заготовки постоянен и она принимает одинаковую кривизну на всех участках. Образование овальности происходит в силу специфики механизма деформирования, будь то чистый изгиб или изгиб поперечной силой.

На рис. 2 показан элемент трубы в промежуточной стадии ее изгиба. Напряжения растяжения и сжатия, неравномерные по высоте сечения, заменены соответственно силами  $N$  и  $Q$  и изгибающим моментом  $M$ . Проекция сил  $N$  и  $Q$  на ось дают составляющие, направленные навстречу друг другу (их сумма равна нулю) перпендикулярно оси заготовки. Эти поперечные силы  $P$  производят вредную деформацию, в результате чего сечение трубы сплющивается, превращаясь из круглого в овальное. В общем случае деформация сечения будет тем больше, чем больше силы  $N$  и  $Q$ , которые, в свою очередь, могут увеличиваться с увеличением кривизны изгибаемой заготовки. Из практики известно, что чем меньше относительный радиус изгиба, тем большую овальность приобретает заготовка. Силы  $N$  и  $Q$  образуют изгибающие моменты, которые направлены на уменьшение кривизны сечения трубы на участках, наиболее удаленных от нейтрального слоя.

Форму сечения трубы после гибки можно описать уравнением

$$\bar{\rho}_{\min} = \frac{1 - \bar{S}_0}{2 \left( 1 - \frac{S_{\min}}{S_0} \right)} \quad (7)$$

Так, если допускаемое утонение должно составлять 10%, то при относительной толщине 5% минимальный относительный радиус будет равен  $\bar{\rho}_{\min} = 4,5$ ; если утонение допускается 20%, то  $\bar{\rho}_{\min} = 2,5$ .

На рис. 1 показана зависимость изменения толщин стенок изделий от относительного радиуса и исходной толщины стенки заготовки. Из этого графика

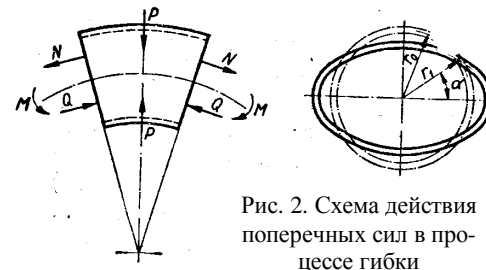


Рис. 2. Схема действия поперечных сил в процессе гибки

$$r_1 = r_n + C \cos 2\varphi \quad (8)$$

где  $r_n$  – начальный наружный радиус трубы;  $C \cdot \cos 2\varphi$  – величина радиального перемещения срединной поверхности трубы от начального положения.

Перемещение при  $\varphi = \pi/4$  меняет знак и, следовательно, в

плоскости изгиба диаметр трубы уменьшается. Из рассмотрения работы внутренних сил Ю.Н. Алексеев определил значение  $C$ :

$$C = \left\{ \left( 1 + \frac{\sqrt{3\sigma_s}}{\Pi} \right) r_{cp} \right\} \left( 1 + 1,5 \frac{S^2 \rho^2}{r_{cp}^4} \right) \quad (9)$$

С учетом уравнения (9) минимальный и максимальный радиусы сечения трубы будут равны соответственно

• при  $\varphi = \pi/2$

$$r_{\min} = r_n - \frac{\left( 1 + \frac{\sqrt{3\sigma_s}}{\Pi} \right) r_{cp}}{1 + 1,5 \frac{S^2 \rho^2}{r_{cp}^4}}$$

• при  $\varphi = 0$

$$r_{\max} = r_n + \frac{\left( 1 + \frac{\sqrt{3\sigma_s}}{\Pi} \right) r_{cp}}{1 + 1,5 \frac{S^2 \rho^2}{r_{cp}^4}},$$

или, выражая вес через диаметры и относительные величины, наименьший ( $d_{\min}$ ) и наибольший ( $d_{\max}$ ) размеры осей овального сечения трубы после изгиба определяются уравнениями

$$d_{\min} = d_n - \left( 1 + \frac{\sqrt{3\sigma_s}}{\Pi} \right) \left( \frac{d_n - S}{1 + 24\bar{S}^2 \bar{\rho}^2} \right), \quad (10)$$

$$d_{\max} = d_n + \left( 1 + \frac{\sqrt{3\sigma_s}}{\Pi} \right) \left( \frac{d_n - S}{1 + 24\bar{S}^2 \bar{\rho}^2} \right). \quad (11)$$

Анализ уравнений (10) и (11) показывает, что для данного материала и определенных размеров заготовки овальность увеличивается с уменьшением относительного радиуса.

На рис. 3 показан график изменения меньшего диаметра овала трубы в зависимости от радиуса изгиба и размеров сечения заготовки для алюминиевого сплава АМгМ. Имеется в виду, что развитию овальности не оказывается противодействия, т.е. гибка производится без наполнителя; кроме того, на графике не учитывается овальность, которая может быть получена от сосредоточенного давления на трубу пуансона или матрицы.

Исходя из уравнения (9), можно определить минимальный радиус изгиба по заданному допуску на овальность, которая может быть охарактеризована разностью  $d_n$  и  $d_{\min}$ ; минимальный относительный радиус будет равен

$$\bar{\rho}_{\min} = \sqrt{\left( \frac{d_{cp} (1 + \sqrt{3\sigma_s / \Pi})}{d_n - d_{\min}} - 1 \right)} \frac{1}{24S^2}. \quad (12)$$

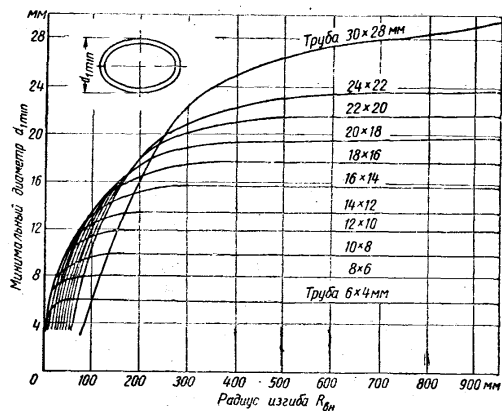


Рис. 3. Зависимость размера малой оси овала трубы от радиуса изгиба материал – сплав АМгМ (по Ю. Н. Алексееву)

ном) или гибкой оправкой, вставленной во внутрь трубы. Если овальность лишь незначительно превышает допустимую, то гибка может производиться без наполнителя, а затем овальность устраняется калибровкой стальными шариками; диаметр последнего, калибрующего шарика должен быть равен внутреннему диаметру изделия. Шарик могут проталкиваться или протаскиваться через внутреннюю полость трубы в штампе или в специальном приспособлении. Наполнитель или калибровка шариками уменьшают или предотвращают полностью также гофры или волны, возникающие на вогнутой стороне трубы от потери устойчивости стенки.

**Заключение.** Следует отметить, что сравнительно большое изменение толщин стенок позволяет назначать значительное формоизменение заготовки. Так, для трубопроводов низкого и среднего давления допускается утонение от 15% до 25%, что дает возможность изгибать трубу по радиусу, равному двум диаметрам. Однако потеря устойчивости и искажение сечения заготовок, особенно тонкостенных, делает такое формоизменение трудно осуществимым в производственных условиях; обычно радиус изгиба меньше 2,5-3 диаметров допускается редко. Образование овальности происходит в силу специфики механизма деформирования трубы.

В тех случаях, когда овальность при изгибе по данному радиусу выходит за пределы допуска, гибку производят с наполнителем, который заполняет внутреннюю полость заготовки и сообщает дополнительную жесткость сечению. В качестве наполнителя чаще всего применяется сухой мелкий песок, реже – жидкость, канифоль или легкоплавкие металлы и сплавы.

В специальных приспособлениях и на станках гибку часто производят со стальной оправкой (дор-