

УДК 621.774.63

*В. Ю. ЖУРАВЛЕВ, С. В. ТИТЕНКОВ, Е. В. ФАЛЬКОВА, Л. П. НАЗАРОВА,
Е. Н. ФИСЕНКО*

*Сибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИБКИ ТРУБ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ

Рассматриваются способы технологического процесса гибки трубы, описываемые различными расчетными схемами с принятием ряда допущений. Приводится схема деформирования поперечного сечения трубы. Рассматривается изгиб трубы с учетом деформирования ее сечения.

Ключевые слова: деформация, напряжения, энергетические принципы, гибка труб, изгибающий момент.

В машиностроении и строительстве широко используются трубопроводы для различных жидкостей. Трубы также применяют в качестве несущих элементов конструкций. При этом часто возникает необходимость гибки изначально прямолинейного проката.

Гибка труб всегда ведется с определенным радиусом, который задается проектировщиками, конструкторами и инженерами для нового изделия. Для разных радиусов могут применяться разные подходы и технологии. Радиус свыше трех диаметров трубы может быть получен различными способами с использованием бездорновых или профилеггибочных станков. Радиус между двумя и тремя диаметрами трубы можно получать на трубогибочном станке, обеспечивающем практически идеальную поверхность перехода и отсутствие гофр в зоне изгиба. Радиусы между полутора и двумя диаметрами трубы могут выполняться только на трубогибочном станке и требуют тщательной настройки станка, правильного подбора инструмента, шариковых дорнов при соответствующей подготовке. Радиусы между одним и полутора диаметрами трубы сложны в изготовлении, но достижимы на профессиональных трубогибочных оснастках при соответствующей подготовке и учете следующих факторов: сечения трубы, физических свойств материала, точности инструмента. Кроме того, в этом случае целесообразно использование складковывглаживателя. Радиусы менее диаметра трубы труднодостижимы из-за сложностей, связанных с обеспечением качества изгиба [1].

При расчете параметров гибки труб применяются различные подходы к определению величины пластических деформаций для получения необходимой конфигурации конечного изделия. В соответствии с ГОСТ 17365–71 для труб с наружным диаметром d до 20 мм минимальные осевые радиусы гибки

труб должны составлять не менее $2,5d$ и при диаметре свыше 20 мм – не менее $3,5d$ [2].

В настоящее время за счет нагрева или создания сложнапряженного состояния материала трубы в основном используются следующие способы гибки труб:

- изгибающим моментом; при использовании такой технологии необходимо применение дорнов, оправок или других заполнителей трубы для исключения образования гофр;

- при общем нагреве изгибаемой трубы, позволяющем снизить в 2–3 раза пределы прочности σ_b и текучести σ_t материала, что удорожает производство и требует специализированного оборудования.

- с узкозональным нагревом токами высокой частоты и снижением усилия гибки в 5–7 раз; в этом случае появлению гофр препятствуют соседние холодные участки;

- при действии внутреннего гидростатического давления, которое позволяет добиться достижения окружными напряжениями предела текучести при малых изгибающих продольных напряжениях, однако при повышенном давлении появляется опасность разрушения трубы;

- проталкиванием через дорн с увеличивающимся диаметром при одновременном нагреве трубы, что позволяет получить требуемую форму при малом усилии гибки;

- холодная гибка труб в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания с большими натягами.

Задача по изгибу трубы решается на основе вариационного подхода с использованием функционала потенциальной энергии системы Π

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W = 0,$$

где U – энергия деформации, W – работа внешних сил.

При получении аналитических решений упрочнение материала не учитывают, и вариационное уравнение преобразуется к виду

$$\tau_s \delta \iiint_V \Gamma dV - \delta W = 0,$$

где τ_s – касательное напряжение текучести; V – объем материала; Γ – интенсивность деформаций сдвига, $\Gamma = 2\sqrt{I_2(D_\varepsilon)}$; $I_2(D_\varepsilon)$ – второй инвариант тензора деформаций.

Каждому используемому способу технологического процесса гибки трубы соответствуют различные расчетные схемы с принятием ряда допущений.

При гибке трубы моментом [3] расчетная схема основана на неизменности объема при пластическом деформировании и линейности напряженного

состояния ($\epsilon_p = \epsilon_z = -0,5\epsilon_\theta$, где ϵ_θ – окружная деформация, ϵ_p и ϵ_z – радиальная и осевая деформации) с принятием ряда допущений: кривизна оси трубы на участке сгибания постоянна; влияние изгиба соседних участков не учитывается; поперечные сечения изгибаемого участка остаются плоскими, они одинаково деформированы; деформации сдвига на участке сгибания равны нулю; нейтральная поверхность деформаций проходит через ось трубы; область упругих деформаций незначительна.

Для данного случая решение ищется преобразованием вариационного уравнения по методу Ритца путем ввода в рассмотрение варьируемых параметров v_i , координатных функций

$$\frac{\partial}{\partial v_i} \left(\tau_s \delta \iiint_V \Gamma dV - \delta W \right) = 0.$$

Рассматривается изгиб трубы с деформируемым сечением (рисунок 1, а).

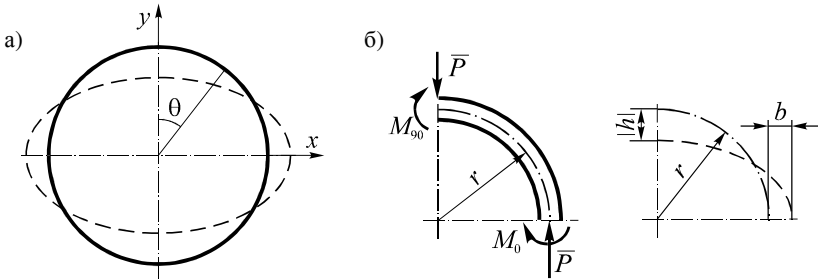


Рисунок 1 – Схема деформирования поперечного сечения трубы

Для нахождения решения используются уравнения равновесия Навье, уравнение тензора деформации Коши, уравнения совместности деформаций Сен-Венана, физические уравнения закона Гука. Выражение интенсивности деформаций сдвига применительно к полярным координатам в сечении трубы (см. рисунок 1, б), с учетом $\epsilon_z = 0$ и замены: $\epsilon_p = -\epsilon_\theta$ предельно упрощается

$$\Gamma = 2\sqrt{\epsilon_p^2 + \frac{1}{4}\gamma_{p\theta}^2}.$$

При гибке трубы радиальное перемещение точек средней линии стенки трубы приводит к овальной форме поперечного сечения. Упругое деформирование овального сечения трубы при повышении внутреннего давления вызывает уменьшение овальности и дополнительные напряжения изгиба. Будучи растягивающими на внутренней поверхности стенки в окрестностях

большей оси овала, они суммируются с напряжениями, вызванными внутренним давлением. Именно в этих местах образуются усталостные трещины при циклическом изменении давления рабочей среды.

При гибке трубы по копиру [4] с малой зоной пластического деформирования до 0,1 рад используют линейную зависимость изгибающего момента от осевой координаты η с принятием следующих допущений: справедлива гипотеза плоских поперечных сечений; внешние силы не вызывают локальных деформаций в области контакта с трубой; силы трения и перерезывающая сила не влияют на форму изогнутой оси трубы; функция напряжений текучести в поперечном сечении соответствует степенной функции от интенсивности деформаций $\sigma_s = A\epsilon_i^m$ [5].

Для данного случая вариационное уравнение преобразуется к виду

$$\int_0^{\eta_l} d\eta \int_{0,5d_0}^{0,5d} \rho d\rho \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Gamma^2}{\partial v_i} d\theta = 0,$$

где η_l – длина оси трубы в зоне пластического деформирования, связанная с переменным радиусом R в поперечном сечении трубы соотношением

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\eta}{\eta_l} \right)^m; d_0 - \text{внутренний диаметр трубы.}$$

Упрощенное решение ищется исходя из условия неизменности ширины сечения трубы от действия инструмента, осуществляющего изгиб. При гибке трубы радиальное перемещение точек средней линии стенки трубы приводит к ограниченной овализации поперечного сечения и появлению разнотолщинности [6–8]. Задача определения степени разнотолщинности стенки трубы, приобретаемая при гибке, строится на предположении, что среднее значение толщины t остается неизменным, поскольку смещение нейтральной поверхности относительно центра сечения не учитывается при решении вариационной задачи о сгибании трубы.

При исследовании образцов, вырезанных из реальных труб, после деформирования гибкой тонкостенной трубы, изготовленной из изотропного материала, обнаруживается существенное различие показателей относительного уменьшения ширины и толщины вырезанных из трубы образцов, что существенно сказывается на изменении толщины стенки изгибаемой трубы по окружности поперечного сечения [9, 10].

Работа изделий, соединенных трубами, зависит от точности изготовления всех комплектующих и требует гибки для исключения возникновения монтажных напряжений при сборке. Поэтому большое внимание при гибке труб уделяется расчету изгибающего момента $M_{изг}$. Это объясняется необходимо-

стью учета пружинения, т. е. изменению кривизны оси трубы при разгрузке для придания необходимой конечной формы трубе.

Расчет требуемого момента ведется по формуле

$$\frac{1}{R_{\text{ост}}} - \frac{1}{R_0} = \frac{M_{\text{изг}}}{EI},$$

где R_0 , $R_{\text{ост}}$ – радиус изгиба и его остаточное значение; E – модуль Юнга; I – момент инерции сечения, которая основана на выражениях деформаций и условных напряжений разгрузки.

Обычно при расчете исходят из схемы одноосного напряженного состояния, отождествляя зависимость положительных напряжений гибки σ_θ от деформации ε_θ [11]. Величина угла пружинения зависит от свойств металла трубы, пространственной формы оси трубы, диаметра, толщины стенки трубы, а также радиуса и угла сгибания. Угол пружинения трубы или профиля можно определить несколькими методами: инструментальным, расчетным, путем аппроксимации. В автоматических трубогибочных станках запрограммирован расчет угла пружинения методом аппроксимации.

Последовательность технологического процесса, осуществляемого трубогибочным станком с числовым программным управлением, следующая. Задается трехмерная геометрия необходимой формы изогнутой трубы. Составляется программа для станка. Задаются припуски, обеспечивающие требования и ограничения оснастки трубогибочного станка, с последующей верификацией процесса гибки. После получения пробной детали ее измеряют и сравнивают с 3D-моделью трубы-эталона [12].

В результате 3D-модель измеренной трубы накладывается на 3D-модель эталонной, рассчитываются отклонения между трубами. Проводится верификация процесса гибки. Рассчитываются параметры откорректированной трубы. Опции измерения, сравнения, создания корректировочных данных и гибки можно повторять многократно. Однако наибольшая часть отклонения устраняется уже на первом этапе.

Результаты работы в настоящее время находят применение при изготовлении трубопроводов сложной конфигурации на Красноярском машиностроительном заводе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Мальцев, Д. Н. Совершенствование трубогибочного производства предварительным деформированием сечения заготовок : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Д. Н. Мальцев; Гос. ун-т – учебно-научно-произв. комплекс. – Орел, 2014. – 124 с.

2 Трубопроводы для агрессивных сред. Общие технические требования : ГОСТ 17365–71. – Введ. 01.07.1973. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 8 с.

3 **Вдовин, С. И.** Деформация трубы при гибке моментом / С. И. Вдовин, В. Н. Михайлов, Н. В. Татарченков // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 2. – С. 62–65.

4 **Михайлов, В. Н.** Многопереходная гибка труб по круглому копиру / С. И. Вдовин, В. Н. Михайлов, Н. В. Татарченков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 5. – С. 17–20.

5 Finite element analysis for inconel 625 fine tube bending to predict deformation characteristics / H.-S. Jeong [et al.] // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – Vol. 13, Is. 8. – P. 1395–1401.

6 **Козлов, А. В.** Влияние холодной гибки с раскатыванием на толщину стенок изгибаемой трубы / А. В. Козлов, В. Г. Шеркунов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2009. – № 3. – С. 32–34.

7 **Козлов, А. В.** Компьютерное моделирование процесса гибки труб с раскатыванием / А. В. Козлов, В. Г. Шеркунов // Известия ТулГУ. Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2009. – Вып. 4. – С. 28–33.

8 Теоретическое исследование пластического изгиба трубы с деформируемым сечением / К. С. Лунин [и др.] // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5–2. – С. 262–265.

9 **Corona, E.** Yield anisotropy effects on buckling of circular tubes under bending / E. Corona, L.-H. Lee, S. Kyriakides / International Journal of Solids and Structures. – 2006. – Vol. 43, Is. 22–23. – P. 7099–7118.

10 **Kyriakides, S.** Wrinkling of Circular Tubes Under Axial Compression: Effect of Anisotropy / S. Kyriakides, F. C. Bardi, J. A. Paquette // Journal of Applied Mechanics. – 2005. – Vol. 72, Is. 2. – P. 301–305.

11 **Вдовин, С. И.** Расчет параметров оси трубы при изгибе поперечной силой / С. И. Вдовин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 11. – С. 14–19.

12 **Титенков, С. В.** Перспективы развития системы технологии гибки трубопроводов 3D-конфигурации на производстве / С. В. Титенков, В. Ю. Журавлев // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 703–715.

*V. Yu. ZHURALEV, S. V. TITENKOV, E. V. FALKOVA, L. P. NAZAROVA, E. N. FISENKO
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk*

METHODS OF PIPE BENDING PARAMETERS CALCULATION ON THE ENERGY PRINCIPLES BASIS

The article deals with the methods of technological pipe bending described by different design schemes with a number of assumptions. The scheme of pipe's cross-section deformation is given. The bending of the pipe with a deformable section is considered.

Получено 23.04.2019