

ГОФРООБРАЗОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОДОЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА

Разработан метод оценки гофрообразования при формовке косинусообразных фитингов, изогнутых осадкой трубчатой заготовки. В основе метода лежит энергетический критерий устойчивости и экспериментально-расчетные зависимости деформированного состояния. Первоначальными данными для расчета являются геометрические параметры изделия и свойства материала в виде показателя деформационного упрочнения.

Ключевые слова: гофрообразование, потеря устойчивости, показатель деформационного упрочнения, косинусообразный фитинг.

O.V. HRUSHKO

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

CORRUGATION OF PIPE SHELL BLANK IN THE PROCESS OF NONELASTIC BUCKLING

Abstract – the purpose of the research is prognostication of corrugation for the process of forming of cosine shaped fittings with the use of axial compression of pipe shell blank. A pipe shell blank acquires a cosine shape in the process of forming. The axis of the fitting can be described by the exponential function of Gausse. On the basis of experiment the coefficients of approximation of this function are found. The minimum radius of curvature when corrugation appear at is found from mathematical correlations. The method of estimation of corrugation pipe shell blank is developed. The method is based on the energy stability criterion and experimental and calculated dependences of strain state. Initial data for calculation are geometric parameters of the product and material properties as an rate of strain hardening. Dependence of critical radiuses on the rate of strain hardening is substantial. Blanks from metals with a greater capacity for strain hardening can be bending on less radiuses.

Keywords: corrugation, buckling, the rate of strain hardening, cosine shaped fitting.

Введение

В работах [1, 2] указывается на возможность получения полуфабрикатов стержневых изделий, изогнутых по схеме сжатия с дальнейшей потерей устойчивости, практически не требующей применения сложной штамповой оснастки (рис. 1). Там же указаны перспективы использования продольного изгиба для получения особого вида трубчатых фитингов – обводных патрубков. Последние рационально использовать при монтаже трубопроводов сложных конструкций, пересекающих ось перпендикулярно расположенных труб или стержней. Также такого рода полуфабрикаты могут быть применены в качестве заготовок под точные изделия – крутоизогнутые отводы или гнутые патрубки [2, 3]. Прогнозирование стабильности протекания процесса может быть выполнено на основе моделей механики процесса, позволяющих рассчитывать рациональные и предельные режимы формоизменения. Отметим также, что на стабильность процесса при прочих равных условиях оказывают механические свойства металла, отображаемые в его карте [3]. Рассматриваемому процессу присущ достаточно широкий перечень технологических отказов, проявляющихся в виде разрушения, искажения формы [4], смятия торцевых участков, среди которых выделим наиболее распространенный вид брака – потерю устойчивости сжатой части патрубка в виде гофр. Такое явление получило название гофрообразование (в литературе также используется термин «волнообразование») и, как правило, оно является недопустимым для изогнутых трубчатых изделий [5, 6].

Анализ исследований. Постановка задачи

В ряде работ по исследованию устойчивости пластического формоизменения отображены принципы, позволяющие прогнозировать такой вид технологического отказа. В частности, решение Ю. Н. Алексева для свободного изгиба трубы [6], основано на энергетическом критерии и аналитических зависимостях напряженно-деформированного состояния в процессе формообразования. При этом рассматривалось волнообразование при свободном изгибе труб в статических условиях. Известны исследования, указывающие на достаточную точность инженерных формул, базирующихся на указанном подходе [3, 4].

Согласно [6] уравнение потери устойчивости имеет вид:

$$\iint \left[W + 0.5s \left(\sigma_1 \omega_1^2 + \sigma_2 \omega_2^2 + 2\tau_{12} \omega_1 \omega_2 \right) \right] df = 0, \quad (1)$$

где s – толщина стенки; ω_1, ω_2 – деформации в направлениях 1 и 2 (осевом и окружном); $\tau_{\alpha\theta} = 0$; $\sigma_1 = \sigma_\alpha$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$ – касательное и нормальные напряжения соответственно; W – потенциал моментов.

В результате для свободного изгиба трубы моментом получено значение критического радиуса изгиба

$$\rho_{kp} = \frac{8r \left(2 + \frac{l^2}{\pi^2 k^2 r^2} \right)}{\pi s^2 \left(\frac{\pi^2 k^2 n}{l^2} + \frac{1}{r^2} \right)}, \quad (2)$$

где k – число полуволин вдоль оси трубы; r – срединный радиус трубы; s – толщина стенки; l – длина изогнутой части; n – показатель деформационного упрочнения при степенной аппроксимации кривой упрочнения ($\sigma_i = Ae_i^n$). n для данного решения является параметром карты металла.

Гипотетически, зависимость (2) может применяться для широкого класса процессов гибки труб, если опасная, с точки зрения гофрообразования, область оболочки а) безмомента; б) свободна от контактных напряжений.

Отметим, что нам не известны другие методики определения критического радиуса изгиба, при котором образуются гофры, поэтому она в некотором роде уникальна по общности теоретического решения при различных способах изгиба труб.

Целью исследования является прогнозирование гофрообразования в зависимости от геометрических соотношений изделия и параметров карты металла для процесса формообразования косинусообразных фитингов с использованием осевого сжатия трубной заготовки.

Исследование

Вследствие схожести напряженных состояний при отсутствии инструмента в зоне возможного гофрообразования, вывод искомой зависимости для изгиба трубы с осадкой полностью соответствует рассуждениям работы [6].

Таким образом, формула (2) по отношению к обозначениям нашей задачи приобретает вид

$$R_{kp} = \frac{8r \left(2 + \frac{(H_k/4)^2}{\pi^2 k^2 r^2} \right)}{\pi s^2 \left(\frac{\pi^2 k^2 n}{(H_k/4)^2} + \frac{1}{r^2} \right)}, \quad (3)$$

где коэффициент 1/4 при H_k учитывает действительную длину заготовки по оси x для той части патрубка, где происходят бифуркации оболочки (рис. 2).

Для расчетов следует брать $k = 1$ (при одной полуволине гофра), однако на практике после возникновения одной полуволины может реализоваться и большее их количество – 3, 5, 7.

Наиболее опасная область, с точки зрения утонения стенки, находится на внутренней части изгиба ($\theta = 3\pi/2$) по плоскости симметрии ($x_c = 0,5H_k$).

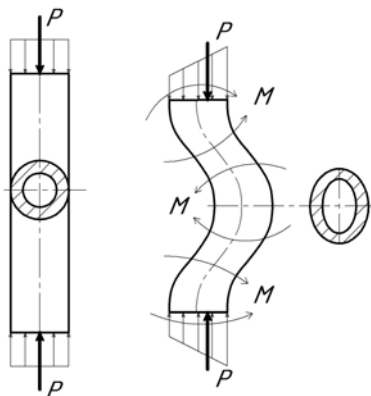
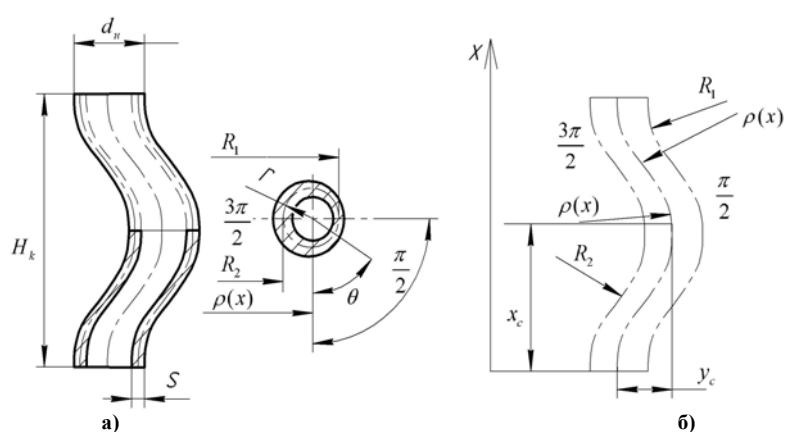


Рис. 1. Осадка с изгибом трубчатой заготовки



$x_c = 0,5H_k$ – координата наибольшего прогиба (центральная часть);

θ – координата радиус-вектора в окружном направлении оболочки

Рис. 2. Геометрические параметры косинусоидально изогнутой трубы (а) и схема напряженного состояния

В результате формообразования трубчатая заготовка приобретает косинусоидальный вид, ось которой можно описать различными функциями: косинусоидой, дугами окружности разной кривизны, дугами эллипса, экспоненциальными и степенными функциями. Путем нелинейного регрессионного анализа показано, что наилучшее приближение ($R_{adj}^2 = 0,97...0,99$) для разных типоразмеров и материалов патрубка

имеет функция, отвечающая экспоненте Гаусса в виде [7]

$$y(x) = y_c \exp \left[- \left(\frac{x - x_c}{H_k w} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где H_k – расстояние между торцами изогнутого патрубка (см. рис. 2); y_c – наибольший прогиб оси; $x_c = 0,5H_k$ – координата наибольшего прогиба (соответствует координате плоскости симметрии); w – коэффициент аппроксимации.

Расчеты на основе эксперимента показали, что w слабо зависит от геометрии заготовки и степени изгиба патрубка на основной стадии деформирования. Так, осаживали ряд заготовок из меди марки М1, стали Ст. 3, латуни Л98, свинца марки ССу, Сталь 20, алюминиевого сплава АД33Т1. Геометрические размеры варьировались в пределах $l_0 / d_0 = 4 \dots 6$, $d_0 / s_0 = 4 \dots 7$. Путем нелинейного регрессионного анализа с использованием пакета программ OriginPro нашли, что значение $w = 0,319 \pm 0,008$.

В процессе формообразования заготовка непрерывно уменьшает длину своей оси, за счет пластической осадки. Планированием эксперимента найдена величина относительного уменьшения длины оси

$$\delta = k_\delta \left(1,716 - 0,263 \cdot \frac{l_0}{d_0} \right) \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

где k_δ – коэффициент, зависящий от толстостенности трубы d_0 / s_0 ; $\varepsilon = \frac{l_0 - H_k}{H_k}$ – относительное уменьшение расстояния между торцами патрубка.

Коэффициент k_δ принимает значения близкие к 1 при $d_0 / s_0 = 4$ и существенных осевых деформациях ($\varepsilon = 0,3 \dots 0,4$), и близкие к двум при $d_0 / s_0 = 7$ и $\varepsilon = 0,05 \dots 0,2$ [1, 2].

По известному виду функции радиус кривизны находится по формуле [7]

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}^{1,5}. \quad (6)$$

Длина геометрической оси изогнутой заготовки может быть найдена следующим образом

$$L = l_0 (1 - \delta) = \int_0^{H_k} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx. \quad (7)$$

Из уравнений (4), (5) и (7) находится параметр y_c . С учетом вида функции (4) решение может быть найдено численными методами.

Радиус кривизны оси при $\theta = 3\pi / 2$ найдем из формул (4), (6)

$$\rho_{\min} = \rho \left(\frac{x_c}{2}, \frac{3\pi}{2} \right) = \frac{(H_k w)^2}{y_c}. \quad (8)$$

Условие устойчивого, без образования гофр, деформирования запишем в виде

$$\rho_{\min} \geq \rho_{kp}, \quad (9)$$

где ρ_{kp} определяется по формуле (3), ρ_{\min} – по (8), с учетом численных решений относительно y_c .

Так, для патрубка, показанного на фото (рис. 3, а) деформация оказалась критической с точки зрения образования гофр. Геометрические параметры заготовки (полученные замером) следующие $d_0 = 22$ мм, $s_0 = 5$ мм, $l_0 = 100$ мм, $H_k = 82$ мм, $\rho_0 = 30$ мм, $y_c = 22$ мм, латунь Л98 ($n = 0,43$). Критическое значение $\rho_{kp} = 28,7$ мм, $\rho_{\min} = 31,1$ мм, что практически соответствует экспериментальному. Аналогичные данные получены для заготовок, показанных на фото, для которых наблюдается внутренний гофр-зажим (рис. 3 б, в). Таким образом, по условию (9) можно достаточно точно спрогнозировать предельные степени деформаций по критерию гофрообразования (минимальные радиусы изгиба) для их применения в расчетной и производственной практике.

Практический интерес представляет анализ влияние механических свойств металла на гофрообразование, поскольку исходные геометрические параметры должны назначаться с их учетом, исходя из различных предпосылок (отсутствия трещин, смятия, овализация и пр.). Как следует из представленных выше зависимостей, карта материала для этого решения представлена лишь одной величиной – показателем деформационного упрочнения n . На рис. 4 показано характерное решение по определению критического радиуса кривизны от показателя деформационного упрочнения для тестового примера ($d_0 = 22$ мм, $s_0 = 5$ мм, $l_0 = 100$ мм, $H_k = 82$ мм). Следует отметить, что зависимость критических радиусов от показателя деформационного упрочнения n существенна с точки зрения его возможного статистического разброса (с

среднем $\pm 0,05$) для данной марки металла. Поэтому величину n следует уточнять для конкретной партии заготовок, например, по исходной твердости металла [8]. Следовательно, путем измерения твердости можно разбраковывать обрабатываемый металл по группам и для каждой группы назначать конкретные геометрические параметры – начальную длину и степень осадки. Уточнение последней для металлов из разных партий, в зависимости от показателя деформационного упрочнения, достигает 10...15%, что позволяет получать изделия с прогнозируемой геометрией и существенно повышает эффективность процесса. Также заготовки из металлов с большей способностью к упрочнению могут быть изогнуты на меньшие радиусы, что находит экспериментальное подтверждение в поставленных экспериментах.



Рис. 3. Изогнутые патрубки с гофрами на внутренней части изгиба

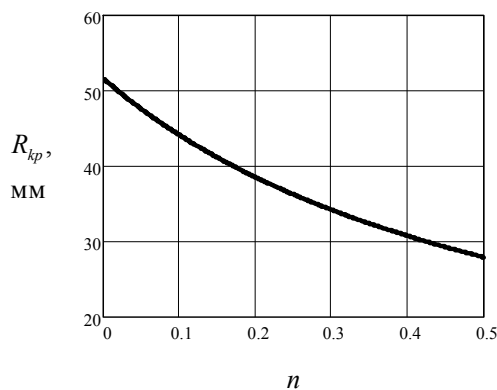


Рис. 4. Зависимость критического радиуса кривизны от показателя деформационного упрочнения

($d_0 = 22$ мм, $s_0 = 5$ мм, $l_0 = 100$ мм, $H_k = 82$ мм)

Выводы

Образование гофр в патрубках, изогнутых по схеме сжатия с дальнейшей потерей устойчивости, может быть спрогнозировано с использованием критерия Ю. Н. Алексева расчета критического радиуса изгиба. Методика адаптирована к процессу изгиба с осадкой, что получило экспериментальное подтверждение с погрешностью 10% для исследованных случаев. Зависимость критических радиусов от показателя деформационного упрочнения существенна с точки зрения его возможного статистического разброса для данной марки металла. Предложено путем измерения твердости разбраковывать обрабатываемый металл по группам и для каждой группы назначать конкретные геометрические параметры – начальную длину и степень осадки. Уточнение последней для металлов из разных партий, в зависимости от показателя деформационного упрочнения, достигает 10...15%, что позволяет получать изделия с прогнозируемой геометрией и существенно повышает эффективность процесса. Поэтому величину n следует уточнять для конкретной партии заготовок, например, по исходной твердости металла [8].

Литература

1. Кухарь В. В. Формообразование элементов трубопроводов продольным изгибом / В. В. Кухарь, А. В. Грушко // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 147–152. – ISBN 966-604-015-8.
2. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки : монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев и др. – Мариуполь : Газета “Приазовский рабочий”, 2011. – 336 с.
3. Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы : монография / О. А.

Розенберг, В. А. Огородников, А. В. Грушко и др. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 140 с. – ISBN 966-641-092-3.

4. Грушко О. В. Овалізація перерізу в процесі поздовжнього пластичного згину труби / О. В. Грушко, М. П. Єленіч, В. В. Кухар // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2008. – № 1 (104). – С. 24–28. – ISSN 2226-9150.

5. Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю. Н. Алексеев. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1969. – 108 с.

6. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков, 1968. – 188 с.

7. Грушко А. В. Напряженно-деформированное состояние трубчатых заготовок в условиях их пластического продольного изгиба / Н. П. Еленіч, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 163–168. – ISBN 978-966-379-269-9.

8. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.

9. Грушко А. В. О связи исходной твердости и кривой течения материала / А. В. Грушко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – № 3. – С. 35–40. – ISSN 2226-9150.

References

1. Kuhar' V. V. Formoobrazovanie jelementov truboprovodov prodol'nym izgibom / V. V. Kuhar', A. V. Grushko // Zahist metalurgijnih mashin vid polomok : zb. nauk. pr. – Mariupol', 2010. – Vip. 12. – S. 147–152. – ISBN 966-604-015-8.

2. Analiz plasticheskogo formoizmenenija v chastnyh zadachah kovki i shtampovki: monografija / V. A. Grinke-vich, V. V. Kuhar', M. V. Kraev i dr. – Mariupol': Gazeta "Priazovskij rabochij", 2011. – 336 s.

3. Formoobrazovanie krutoizognutyh otvodov izgibom protjagivaemoj truby : monografija / O. A. Rozenberg, V. A. Ogorodnikov, A. V. Grushko i dr. – Vinnica : UNIVERSUM-Vinnicja, 2004. – 140 s. – ISBN 966-641-092-3.

4. Grushko O. V. Ovalizacija pererizu v procesi pozdovzhn'ogo plastichnogo zginu trubi / O. V. Grushko, M. P. Elenich, V. V. Kuhar // Herald of Khmelnytsky National University, 2008. – № 1 (104). – S. 24–28. – ISSN 2226-9150.

5. Alekseev Ju. N. Vvedenie v teoriju obrabotki metallov davleniem, prokatkoj i rezaniem / Ju. N. Alekseev. – Har'kov : Izd-vo Har'k. un-ta, 1969. – 108 s.

6. Alekseev Ju. N. Voprosy plasticheskogo techenija metallov / Ju. N. Alekseev. – Har'kov, 1968. – 188 s.

7. Grushko A. V. Elenich N. P. Naprjazhenno-deformirovanное sostojanie trubchatyh zagotovok v uslovijah ih plasticheskogo prodol'nogo izgiba / N. P. Elenich, A. V. Grushko, V. V. Kuhar' // Udoskonalennja procesiv i ob-ladnannja obrobki tiskom v metalurgії i mashinobuduванні : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2007. – S. 163–168. – ISBN 978-966-379-269-9.

8. Korn G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov : opredelenija, teoremy, formuly / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1973. – 831 s.

9. Grushko A. V. O svjazi ishodnoj tverdosti i krivoj techenija materiala / A. V. Grushko // Herald of Khmelnytsky National University. – Khmelnytsky : HNU, 2009. – № 3. – S. 35–40. – ISSN 2226-9150.

Рецензія/Peer review : 26.12.2014 р.

Надрукована/Printed : 25.1.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф., І.О. Сивак