

УДК 621.73.043.011

А.И. ДОЛМАТОВ¹, М.Н. БАГМЕТ¹, С.Е. МАРКОВИЧ¹, И.А. ЖДАНОВ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Научно-производственная корпорация «ФЭД», Харьков

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ГИБКИ ТРУБ

В статье определены ограничения при использовании процесса гибки, такие как утонение и утолщение стенок, овальность сечения и высота складок, гофрообразование, которые появляются на сжатой стороне при гибке труб. Рассмотрено влияние относительной толщины заготовки на утонение и утолщение стенок труб, определен минимальный радиус изгиба трубы по заданному допуску на овальность. Приведена аналитическая модель для сечения изогнутой трубы и исследовано влияние радиуса штампа, радиуса трубы и толщины трубы на процесс образования гофров при гибке труб. Разработанные элементы системы прогнозирования характеристик качества позволяют перейти к созданию эффективного инструмента для инженеров-технологов цехового уровня и департаментов главных специалистов предприятий.

Ключевые слова: гибка, утонение и утолщение стенок, овальность сечения, высота стенок, гофрообразование, минимальный радиус изгиба

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 влечет 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.

В результате изгиба развивается осевое сжимающее напряжение в сечении трубы вблизи изгибного штампа. Таким образом, могут появиться местные гофры. Гофрообразование – это явление нестационарного сжатия. Однако проблеме гофрообразования при изгибе труб не уделялось большого внимания. Текущая производственная практика является достаточной, чтобы в целом формировать технологические процессы, реализация которых не приведет к образованию гофров. Однако отсутствие единых технологических рекомендаций и эффективных инструментов прогнозирования характеристик качества трубопроводов после гибки приводит к тому, что внедрение новых объектов производства и оптимизация существующих технологий требует проведения ряда экспериментальных исследований и МКЭ моделирования, что приводит к дополнительным расходам ресурсов и рабочего времени, а самое главное, не гарантирует нахождения оптимального решения. Это подчеркивает актуальность разработки методик априорной оценки и оптимизации процессов гибки для различных условий нагружения.

1. Постановка задачи и цель исследования

Основной целью исследования является разработка элементов комплексной системы прогнозирования характеристик качества трубопроводных систем и оптимизации технологических процессов гибки.

Достижение данной цели требует решения ряда задач. Так на первом этапе планируется разработка

методики прогнозирования величин деформации поперечного сечения, изменения толщины стенок и оценки вероятности гофрообразования для условий гибки без наполнителей и дополнительных нагружений. Разработка данного модуля является первым шагом в создании комплексной системы прогнозирования характеристик качества трубопроводных систем и оптимизации технологических процессов гибки в условиях действия различных факторов, в том числе – комбинированного дополнительного нагружения.

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

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

Разность между этими деформациями будет равна:

$$\frac{d_n - d_b}{2\rho} = \frac{S}{2\rho} = \frac{\bar{S}}{\bar{\rho}},$$

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

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

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

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

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

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

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 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.

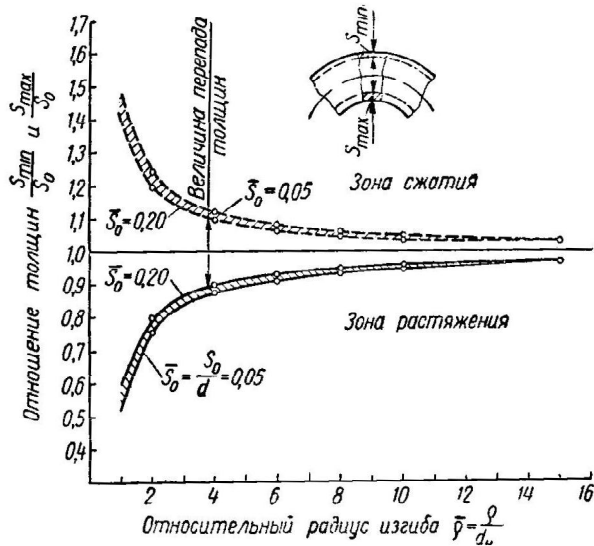


Рис. 1. Зависимость толщины стенки от радиуса изгиба трубы

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 .

Проекции сил N и Q на ось дают составляющие, направленные навстречу друг другу (их сумма равна нулю) перпендикулярно оси заготовки.

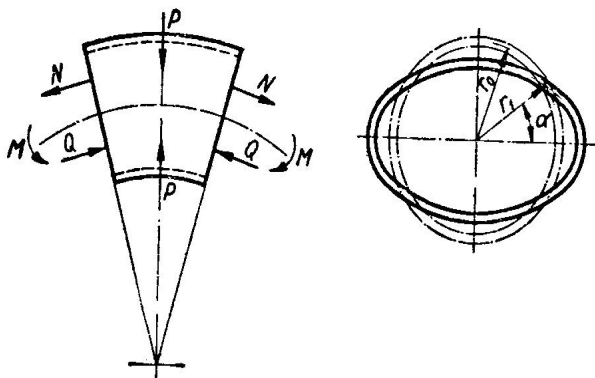


Рис. 2. Схема действия поперечных сил в процессе гибки

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 сече-

ния трубы на участках, наиболее удаленных от нейтрального слоя.

Форму сечения трубы после гибки можно описать уравнением:

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

где r_n – начальный наружный радиус трубы;

$C \cdot \cos 2\varphi$ – величина радиального перемещения срединной поверхности трубы от начального положения.

Перемещение при $\varphi = \frac{\pi}{4}$ меняет знак и, следовательно, в плоскости изгиба диаметр трубы уменьшается.

Из рассмотрения работы внутренних сил Ю.Н. Алексеев определил значение C :

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

С учетом уравнения (9) минимальный радиус сечения трубы будет равен (при $\varphi = \frac{\pi}{2}$)

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

и максимальный (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

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

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

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

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

$$\rho_{min} = \sqrt{\left[\frac{d_{cp} \left(1 + \frac{\sqrt{3\sigma_s}}{\Pi} \right)}{d_n - d_{min}} - 1 \right] \frac{1}{24S}} \quad (12)$$

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 (дорном) 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 полностью предотвращают также гофры или волны, возникающие на вогнутой стороне трубы от потери устойчивости стенки.

4. Гофрообразование при гибке труб

Аналитическую модель для сечения изогнутой трубы между зажимным устройством и приспособлением давления или оправки (как показано на рис. 4) можно рассматривать как проблему чистого изгиба [1].

Для простоты, изменение толщины игнорируется, т.е. выход деформации плоскости $\epsilon_z = 0$.

Таким образом, для больших деформаций изогнутой трубы, у нас есть деформация ϵ_α в направлении изгиба и окружная деформация ϵ_θ как

$$\epsilon_\theta = -\epsilon_\alpha = \ln(R/R_d) \quad (13)$$

Материал характеризуется как упруго-пластический материал, следующий закону упрочнения Войса $\bar{\sigma} = A - B \exp(-C\bar{\epsilon})$. Критерий текучести Хилла используется для описания нормального анизотропного поведения материала и анизотропного пара-

метра R , определяемого как отношение пластической деформации в направлении ширины к пластической деформации через толщину в одноосном растяжении [2].

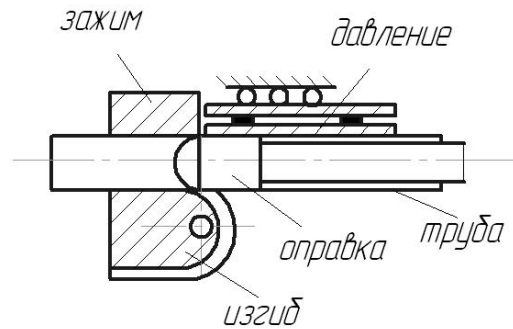


Рис. 3. Роторный изгиб с держателем (Стелсон, 1995)

Таким образом, распределение напряжений может быть получено как:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{1+R}{2}} \left(A - B \exp \left(-c \sqrt{\frac{2(1+R)}{1+2R}} \left| \ln(R/R_d) \right| \right) \right) \quad (14)$$

Из уравнения (13), видно, что спектр θ в эффективной области сжатия находится между $(0, \pi)$. Выбирая $\alpha_1 = 0$, мы имеем $\alpha_2 = \Delta\alpha$, который является углом изгиба. Кроме того, число волн m в окружном направлении принимается равным 1. Используя эти упрощения, мы получаем функционал энергии

$$F = \Delta U - \Delta T = I_{n4} n^4 + \left(I_{n2} + \frac{12}{t^2} I_\alpha \right) n^2 + \left(I_{n0} + \frac{12}{t^2} I_\theta \right) = 0, \quad (15)$$

где

$$I_\theta = \int_0^\pi \frac{6R'\Delta\alpha}{r} \sin^2 2\theta \sigma_\theta d\theta, \quad (16, a)$$

$$I_\alpha = \int_0^\pi \frac{2\pi^2 r}{\Delta\alpha R'} (1 - \cos 2\theta)^2 \sigma_\alpha d\theta \quad (16, б)$$

$$I_{n4} = \int_0^\pi \left(\frac{8\pi^4 r}{R'^3 \Delta\alpha^3} (1 - \cos 2\theta)^2 \right) \bar{L}_{3333} d\theta, \quad (16, в)$$

$$I_{n2} = \int_0^\pi \left(\begin{aligned} & \left(-\frac{8\pi^2 \cos\theta}{R' r \Delta\alpha} (1 - \cos 2\theta) \sin 2\theta \cos\theta \right) \bar{L}_{3333} + \\ & \left(\frac{16\pi^2}{r R' \Delta\alpha} \cos 2\theta (1 - \cos 2\theta) \right) \bar{L}_{2233} + \\ & \left(\frac{8\pi^2 r}{R' \Delta\alpha} \left(\frac{2}{r} \sin 2\theta + \frac{\cos\theta}{R'} (1 - \cos 2\theta) \right) \right) \bar{L}_{2323} \end{aligned} \right) d\theta;$$

$$I_{n0} = \int_0^\pi \left(\begin{aligned} & \left(\frac{24R'\Delta\alpha}{r^3} \cos^2 2\theta + \right. \\ & \left. + \frac{18R'\Delta\alpha}{t^2 r} (1 - \cos 2\theta)^2 \right) \bar{L}_{2222} + \\ & \left(\frac{6R'\Delta\alpha \sin^2 2\theta \cos^2 \theta}{r^3} + \right. \\ & \left. + \frac{18r\Delta\alpha (1 - \cos 2\theta)^2}{t^2 R'} \right) \bar{L}_{3333} + \\ & \left(\frac{12R'\Delta\alpha \cos \theta \sin 4\theta}{r^3} + \right. \\ & \left. + \frac{18\Delta\alpha}{t^2} (1 - \cos 2\theta)^2 \right) \bar{L}_{2233} \end{aligned} \right) d\theta.$$

Функция энергии в уравнении (15) является функцией радиуса штампа R_d , волновое число n , также как свойств материала, толщины и геометрических параметров, таких как местная кривизна. Критическое состояние на начало гофрообразования означает, что функция равенства энергии в формуле (15) имеет нетривиальное решение для волнового числа n , которое равно:

$$\Delta = \left(I_{n2} + \frac{12}{t^2} I_\alpha \right)^2 - 4I_{n4} \left(I_{n0} + \frac{12}{t^2} I_9 \right) \geq 0. \quad (17)$$

Уравнение (17) свыше $\Delta = 0$ дает минимальный радиус штампа R_{dcr} , выше которого складки во вре-

мя гибки труб не будут образовываться. Соответствующее число волн рассчитывается как критическое число волн:

$$n_{cr} = \sqrt{\left(I_{n2} + \frac{12}{t^2} I_\alpha \right) / 2I_{n4}}. \quad (18)$$

Критический радиус штампа во многом зависит от радиуса трубы и толщины, как показано на рис. 5. Минимальный радиус штампа увеличивается с увеличением радиуса трубы и уменьшением толщины трубы, как показано на рис. 5.

Понимание этих взаимоотношений будет полезным для предотвращения гофрообразования во время процессов гибки труб. Материал, используемый на рис. 5, AL5032-T4 с $R=0,92$ мм, и $A=418,66$ МПа, $B=293,6$ МПа и $C=7,112$ в законе Войса. Складки не наблюдались в изгибе труб с толщиной трубы 0,73 мм и радиусом трубы $r=4,4$ мм. Радиус штампа, который они использовали 28,7 мм. В нашем приближении, для такого случая, минимальный радиус штампа без складок должен быть приблизительно 14,1 мм, который проверяет их экспериментальное обнаружение [1].

Также обнаружено, что критическая длина волны почти независима от радиуса штампа, однако она в значительной степени зависит от толщины, как показано на рис. 6, где радиус трубы составляет 4,4 мм [3].

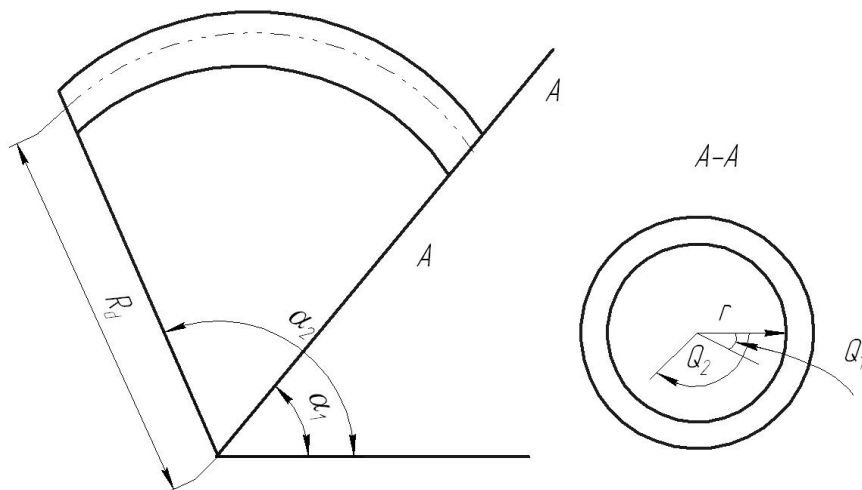


Рис. 4. Профиль минимального радиуса штампа

Заключение

Представленный модуль позволяет производить комплексную оценку характеристик качества трубопроводных систем после гибки, в частности, прогнозирования величин деформации поперечного сечения, изменения толщины стенок и оценки вероятности гофрообразования для условий гибки без наполнителей и дополнительных нагружений.

Проведенный анализ позволяет реализовать первый этап создания методики априорного прогнозирования характеристик качества трубопроводов и позволяет перейти к созданию эффективного инструмента для инженеров-технологов и конструкторов как цехового, так и заводского уровня для оценки правильности принятия решений и оптимизации технологических процессов гибки.

Литература

1. Cao, J. *An Analytical Model for Plate Wrinkling under Tri-axial Loading and Its Application [Text]* / J. Cao, X. Wang // *Int. J. Mech. Sci.* – 1999. – Vol.42, No. 3. – P. 617 – 633.
2. Wang, C.T. *Wrinkling Criterion for an Aniso-*

tropic Shell with Compound Curvatures in Sheet Forming [Text] / C.T. Wang, G. Kinzel, T. Altan // *Int. J. Mech. Sci.* – 1994. – Vol. 36 (10). – P. 945-960.

3. Stelson, K.A. *Tolerance Analysis of Three-dimensional Tube Bending: Worst Case and Statistical Methods [Text]* / K.A. Stelson, H. Lou // *Transactions of NAMRI, SME.* – 1995. – Vol. XXIII. – P. 293 – 298.

Поступила в редакцию 23.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры интегрированных технологий А.Я. Мовшович, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОБМЕЖЕННЯ В ПРОЦЕСАХ ГІБКИ ТРУБ

А.І. Долматов, М.М. Багмет, С.Є. Маркович, І.О. Жданов

У статті визначено обмеження при використанні процесу гнучкості, такі як утончення і стовщення стінок, овальність перетину та висота складок, гофрування, що з'являються на стиснутій стороні при гнучкості труб. Розглянуто вплив відносної товщини заготовки на утончення і стовщення стінок труб, визначений мінімальний радіус вигину труби по заданому допуску на овальність. Приведено аналітичну модель для перетину вигнутої труби і досліджений вплив радіуса штампа, радіуса труби і товщини труби на процес утворення гофрів при гибке труб. Розроблені елементи системи прогнозування характеристик якості дозволяють перейти до створення ефективного інструмента для інженерів-технологів цехового рівня й департаментів головних фахівців підприємств.

Ключові слова: гнучка, утончення і стовщення стінок, овальність перетину, висота стінок, гофрування, мінімальний радіус вигину.

DESIGN AND TECHNOLOGICAL LIMITATIONS AT TUBE BENDING PROCESSES

A.I. Dolmatov, M.N. Bagmet, S.E. Markovich, I.A. Gdanov

In papers limitations at bending process use are defined, such as decrease of width of a walls and swelling of walls, ovality of cross-section and altitude of folds, wrinkling which appear on the constricted part at the tube bending. Influence of relative width of a blank on decrease of width of a walls is observed and a swelling of walls of tubes, the minimum radius of a bending of a pipe on an established tolerance on ovality is defined. The analytical model for cross-section of the bent pipe is resulted and influence of radius of the press tool, radius of a tube and width of a tube on process of formation of wrinkles is examined at tube bending.

Key words: tube bending, decrease of width of a walls and a swelling of walls, ovality of cross-section, altitude of walls, wrinkling, minimum radius of a bending.

Долматов Анатолий Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Багмет Мария Николаевна – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Маркович Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Жданов Игорь Александрович – заместитель директора по коммерции, сбыту и ВЭД Научно-производственной корпорации «ФЭД», Харьков, Украина.