

взаємозалежному поєднанні зниження температур нагрівання й охолодження залишається постійним.

3. Проведені дослідження дозволяють рекомендувати запропоновані конструкцію складеного колеса й технологічні параметри при створенні технології якісного складання з'єднань з натягом бандаж-центр комбінованим термічним способом [7].

Список літератури: 1. *Оборський І.Л.* Нова конструкція і технологія з'єднання бандаж-центр колеса електровагона. // Залізнич. транспорт України. – 2003. – № 5. – С. 9-10. 2. *Оборський І.Л.* Усовершенствование конструкции и технологии сборки составного колеса. Залізнич. транспорт України. – 2006. – № 1. – С. 49-51. 3. Патент України № 46548 А, МПК⁷ В23 Р 19/02, МПК⁷ В23 Р 11/02. З'єднання деталей з натягом і спосіб його здійснення. / *І.Л. Оборський, А.С. Зенкін, Б.М. Арпент'єв, В.Г. Кантур та інші.* – № 2001085678; Заявлено 09.08.2001; Опубл. 15.05.2002. Бюл. №5. 4. Патент України №59676А, МПК⁷ В60В17/00. Бандаж колеса. / *І.Л. Оборський* – № 2002119084; Заявлено 15.11.2002; Опубл. 15.09.2003. Бюл. №9. 5. *Оборський І.Л.* Определение конструктивно-технологических параметров и проектирование рациональной технологии сборки соединений с натягом / *И.Л. Оборский, А. Н Демковский, Д.Н. Хоменко, Н.И. Оборская* // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr. 279. Mechanika, z. 83 (nr 1/2011). Technika i technologia montazu maszyn. – Rzeszow.– 2011. – С. 171 – 177. 6. *Оборський І.Л.* Исследование напряженно-деформированного состояния спицевого колеса электровагона при сборке комбинированным термическим способом. / *И.Л. Оборский, А.С. Зенкин, А.Г. Андреев, А. И. Щепкин* // Сборка в машиностроении, приборостроении. - М.: Машиностроение, 2002. № 8.- С. 14-16. 7. *Оборський І.Л.* Исследование и разработка конструктивно-технологических параметров сборки крупногабаритных соединений с натягом / *И.Л. Оборский, А.С. Зенкин, А.Г. Андреев, А. В. Щепкин, А.П. Звонарева* // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – К.: КНУТД. – 2012. – № 3. – С. 94-100.

Поступила в редколлегию 12.06.2012

УДК 621.774

А.И. ДОЛМАТОВ, докт. техн. наук, проф., НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков,

И.А. ЖДАНОВ, заместитель директора ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИБКИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ

В работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований изменения толщины стенки на внутренней и внешней сторонах трубы и деформация поперечного сечения трубы в процессе сгибания под воздействием различных видов нагрузки: с приложением осевого усилия, внутреннего давления и комбинации осевого усилия и внутреннего давления.

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

В роботі розглянуті результати експериментальних досліджень зміни товщини стінки на внутрішній і зовнішній сторонах труби і деформація поперечного перерізу труби в процесі згинання під впливом різних видів навантаження: з додатком осевого зусилля, внутрішнього тиску і комбінації осевого зусилля і внутрішнього тиску.

Ключові слова: гнуття, стоншення і стовщення стінок, овальність перетину, товщина стінок, гофрування, мінімальний радіус вигину.

The paper discusses the results of experimental studies of changes in wall thickness on the inner and outer sides of the pipe and the pipe cross-sectional distortion in the process of bending under the influence of different types of loading: the application of axial force, internal pressure and a combination of axial force and internal pressure.

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.

Анализ проблемы. Одним из наиболее проблемных процессов, требующих особого внимание при подготовке производства аэрокосмической техники является гибка труб, поскольку она характеризуется значительными искажениями формы и толщины стенки, потерей устойчивости и т.д. Среди направлений обеспечения высокой точности конструкции трубопроводов, предотвращения появления гофров, искажения формы в настоящее время является внедрение технологий с использованием дополнительных нагрузок, таких как осевые усилия и внутреннее избыточное давление. Комбинация нескольких видов дополнительного нагружения в процессе гибки позволяет не только минимизировать такие негативные последствия, как складкообразование, искажение формы, утонение стенок, но и существенно снизить стоимость матриц, что делает данный подход к решению вопросов проектирования технологических процессов одним из наиболее перспективных. Однако широкому внедрению данных методик в серийное производство препятствует отсутствие единых технологических рекомендаций и эффективных инструментов априорной оценки правильности принятых решений, что подчёркивает актуальность данных исследований.

Авторами была методика, реализующая комплексный подход к проектированию процесса гибки. В частности, предложена математическая модель для расчёта утонения стенок и искажения поперечного сечения при гибке труб с использованием комбинированного дополнительного нагружения: внутреннего давления и осевого растяжения. Одним из ключевых шагов в данном направлении является получение экспериментальных данных о распределения толщины трубы и искажения поперечного сечения трубы в процессе гибки под воздействием различных факторов. В частности, одной из актуальных задач является проведение комплексных экспериментальных исследований для различных условий нагружения: с приложением осевого усилия, внутреннего давления и комбинации осевого усилия и внутреннего давления.

Постановка задачи и цели исследования. Целью данного исследование является получение экспериментальных данных о распределения толщины трубы и искажения поперечного сечения трубы в процессе гибки под воздействием различных факторов. Для достижения этой цели необходимо решение ряда задач: проведение комплексных экспериментальных исследований влияния различных видов нагружения (с приложением осевого усилия, внутреннего давления и комбинации осевого усилия и внутреннего давления) на изменение толщины стенки на внутренней и внешней сторонах трубы и на искажение поперечного сечения трубы.

1. Выбор исходных данных

Для определения минимального радиуса, при котором есть опасность возникновения гофров, воспользуемся методикой, описанной [1].

Авторами [1] на основании энергетического подхода был разработан критерий гофрообразования на примере изгиба листа двойного кривизны. Критическое напряжение изгиба рассматривалось как функция местной кривизны, свойств материала, геометрических размеров и коэффициента асимметрии. Энергетический метод широко использовался Тимошенко [2] для изучения упругого изгиба тонких пластин и оболочек с различными граничными условиями. Согласно данного энергетического подхода критические условия потери устойчивости оценивалось при сравнении внутренней энергии искривлённой плоской пластины ΔU и работы, проделанной силами плоской мембраны ΔT . Следовательно, условие устойчивости выражено как

$$\Delta T \leq \Delta U. \quad (1)$$

Типичная труба, как показано на рисунке 1, имеет отношение диаметра трубы $(2r)$ к толщине трубы (t) больше чем 10, и изгибается вокруг изгибного штампа с радиусом R_d , что допускает использование теории оболочек. Оправка обеспечивает почти идеальные условия зажима, и поэтому труба рассматривается, как зажатый изогнутый лист в (α_1, α_2) и (θ_1, θ_2) в двух направлениях, как показано на рис. 1. Энергия $\Delta T = \Delta U$ дает решение для критического условия возникновения складок. В случае, если ΔT меньше, чем ΔU для всех допустимых отклонения формы, отсутствие складок будет развиваться в этих условиях изгиба, т.е. радиус изгиба R_d .

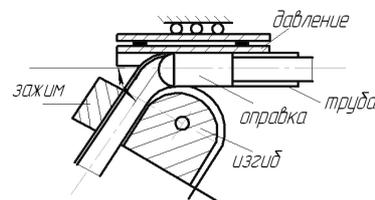


Рис. 1. Схематическая модель изогнутого листа

Критическое состояние соответствующее началу гофрообразования определяется как:

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

Уравнение (2) при $\Delta=0$ дает минимально возможный радиус штампа R_{dcr} . Соответствующее число волн рассчитывается как критическое число волн

$$n_{cr} = \sqrt{\left(I_{n2} + \frac{12}{t^2} I_{\alpha} \right) / 2 I_{n4}} \quad (3)$$

где

$$I_{\theta} = \int_0^{\pi} \frac{6R'\Delta\alpha}{r} \sin^2 2\theta \sigma_{\theta} d\theta \quad (4)$$

$$I_{\alpha} = \int_0^{\pi} \frac{2\pi^2 r}{\Delta\alpha R'} (1 - \cos 2\theta)^2 \sigma_{\alpha} d\theta \quad (5)$$

$$I_{n4} = \int_0^{\pi} \left(\frac{8\pi^4 r}{R'^3 \Delta\alpha^3} (1 - \cos 2\theta)^2 \right) \bar{L}_{3333} d\theta \quad (6)$$

$$I_{n2} = \int_0^{\pi} \left[\begin{aligned} & \left(-\frac{8\pi^2 \cos \theta}{R' r \Delta\alpha} (1 - \cos 2\theta) \sin 2\theta \cos \theta \right) \bar{L}_{3333} \\ & + \left(\frac{16\pi^2}{r R' \Delta\alpha} \cos 2\theta (1 - \cos 2\theta) \right) \bar{L}_{2233} \\ & + \frac{8\pi^2 r}{R' \Delta\alpha} \left(\frac{2}{r} \sin 2\theta + \frac{\cos \theta}{R'} (1 - \cos 2\theta) \right) \bar{L}_{2323} \end{aligned} \right] d\theta \quad (7)$$

$$I_{n0} = \int_0^\pi \left(\begin{aligned} & \left(\frac{24R'\Delta\alpha}{r^3} \cos^2 2\theta + \frac{18R'\Delta\alpha}{t^2 r} (1 - \cos 2\theta)^2 \right) \bar{L}_{2222} \\ & + \left(\frac{6R'\Delta\alpha \sin^2 2\theta \cos^2 \theta}{r^3} + \frac{18r\Delta\alpha(1 - \cos 2\theta)^2}{t^2 R'} \right) \bar{L}_{3333} \\ & + \left(\frac{12R'\Delta\alpha \cos \theta \sin 4\theta}{r^3} + \frac{18\Delta\alpha}{t^2} (1 - \cos 2\theta)^2 \right) \bar{L}_{2233} \end{aligned} \right) d\theta \quad (8)$$

С использованием данной методики были проведены расчёты для изгиба трубы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Материал – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, $\sigma_B=529$ МПа, $E=178$ ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Наружный диаметр трубы – 24 мм, толщина стенки – 2,5 мм. Как свидетельствуют результаты расчётов, критический диаметр для изгиба трубы при данных условиях составляет 43,8 мм. Согласно технологических рекомендаций, используемых в серийном производстве трубопроводов для газотурбинных двигателей, диаметр матрицы должен быть не менее 48 мм. Однако, данные рекомендации учитывают наличие запаса устойчивости.

В соответствии с этими данными, была использована матрица с малым радиусом, гибка на которой могла вызвать появление гофров: диаметр матрицы – 44 мм.

Для проведения экспериментальных исследований был использован модернизированный станок для холодной гибки труб КМ-А130СНС, который может работать с трубами из нержавеющей стали диаметром до 139,7 мм и толщиной стенки до 3 мм и снабжён специальным приводом, позволяющим создавать осевое растягивающее усилие до 18 кН, что позволяет выполнять гибку труб с растяжением. Данный станок был модернизирован для реализации процесса гибки труб в условиях действия внутреннего давления. Для этого концы труб были герметизированы и снабжены патрубком для подачи внутрь жидкости под давлением до 8,5 МПа.

2 Анализ данных по влиянию комбинированного нагружения на параметры изделий

В первой серии экспериментов было проанализировано влияние осевого растяжения. Как свидетельствуют результаты экспериментов, с приложением осевого усилия величиной 11 500 Н к концу трубы вблизи обжимной матрицы образование гофров фиксировалось лишь на 8% образцов. Тогда как при гибке без приложения осевого усилия в 83% случаев наблюдалось появление гофров. Всего было испытано по 12 образцов для каждого из методов гибки.

Усреднённые данные по определению толщины стенки и искажения поперечного сечения моделированием МКЭ и с использованием аналитической модели, а также полученные в результате экспериментов, показаны на рис. 2...5. Как свидетельствуют приведенные данные, аналитическая модель даёт несколько завышенное значение утонения стенки по сравнению с моделированием методом конечных элементов и экспериментальными данными.

Данный процесс продемонстрировал хорошие результаты применения данного вида дополнительного нагружения с точки зрения образования гофров. Однако приложение осевого растяжения привело к существенному искажению формы поперечного сечения (овальность составила до 12,2% при прогнозировании с использованием методом конечных элементов, до 9,4% при

использовании аналитической модели, а по результатам анализа экспериментальных данных – до 11,5%).

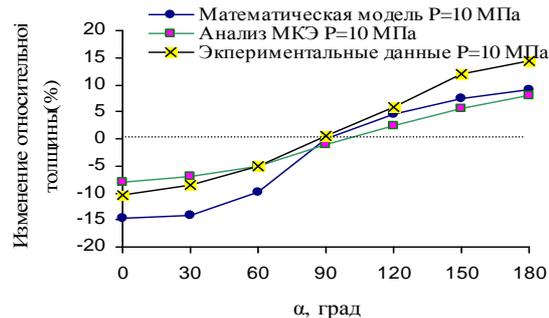
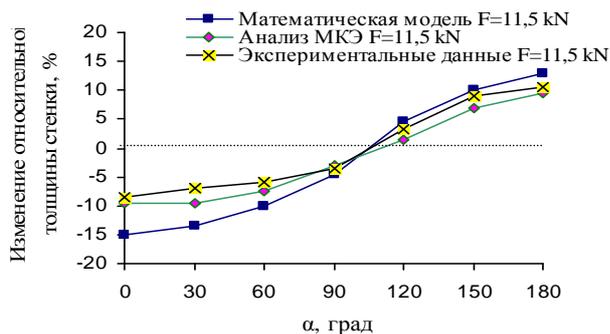


Рис. 2. Изменение относительной толщины стенки, полученное при воздействии осевого растяжения в отсутствие внутреннего давления ($P_i=0$)

Рис. 3. Изменение относительной толщины стенки, полученное при воздействии внутреннего давления в отсутствие осевого растяжения ($F=0$)

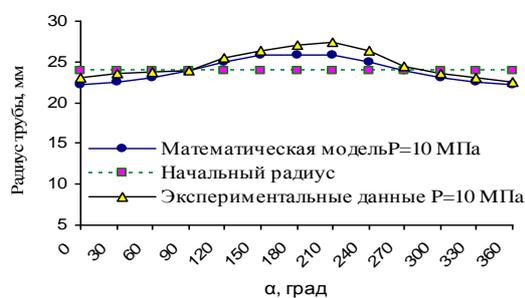
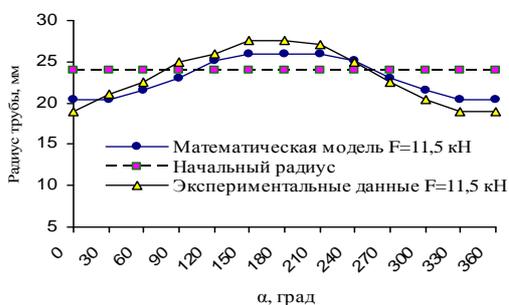


Рис. 4. Изменение радиуса трубы, полученное при отсутствии внутреннего давления ($P=0$)

Рис. 5. Изменение радиуса трубы, полученное при отсутствии осевого растяжения ($F=0$)

Как показали проведенные исследования, для предотвращения складкообразования и уменьшения искажения поперечного сечения должно быть приложено внутреннее давление порядка 8 МПа.

Для анализа влияния величины приложенного осевого усилия на толщину стенки был проведен ряд исследований, где величина осевого усилия варьировалась от 11500 до 17500 Н.

Как свидетельствуют результаты, с наружной и внутренней сторон изгиба толщина стенки уменьшается с ростом величины осевого растяжения. В обоих случаях изменение толщины стенки происходит по закону, близкому к линейному, о чём свидетельствуют как результаты, полученные с использованием аналитической модели, так и данные, полученные экспериментальным путём. Как видно из приведенных зависимостей, процесс гибки характеризуется несколько большей скоростью утонения стенки с внутренней стороны изгиба по сравнению с внешней, при увеличении осевого растяжения.

При сочетании осевого растягивающего усилия и внутреннего давления обеспечивается отсутствие гофрообразования и минимальное искажение формы поперечного сечения, однако имеет место существенное утонение стенки.

Как видно из приведенных данных, толщина стенки на внутренней стороне изгиба уменьшается с ростом внутреннего давления. На рисунках 6 и 7 показано изменение максимальной толщины стенки с ростом давления и изменение

минимальной толщины стенки с изменением внутреннего давления соответственно.

Как свидетельствуют результаты исследований, толщины стенки на внутренней и наружной сторонах изгиба уменьшаются с ростом внутреннего давления. И в обоих случаях изменение толщины стенки подчиняется закону, приближающемуся к линейному.

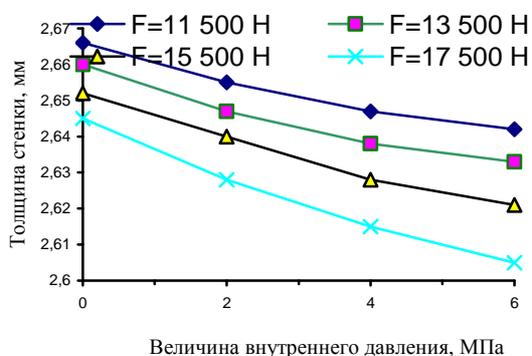


Рис. 6. Максимальная толщина стенки на внутренней стороне изгиба при воздействии растягивающего усилия и внутреннего давления

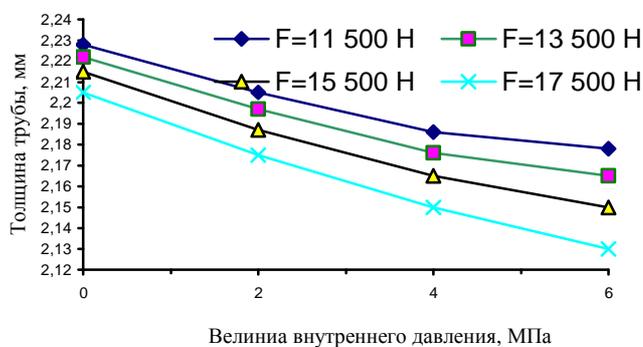


Рис. 7. Минимальная толщина стенки на внешней стороне изгиба при воздействии растягивающего усилия и внутреннего давления

По результатам исследований можно сделать следующее заключение: гибка лишь с внутренним давлением и гибка с растяжением и внутренним давлением уменьшает искажение поперечного сечения и уменьшает толщину стенки на внутренней стороне изгиба, тогда как при одновременном воздействии осевого растяжения и внутреннее давление образования складок можно избежать, и форма поперечного сечения трубы будет близка к кругу, но будет иметь место большее утонение, по сравнению с гибкой только с внутренним давлением.

Как показал анализ данных, приведенных на рисунках 6...8, наиболее оптимальным вариантом с точки зрения соотношения «утонение стенки» / «овализация», а также с учётом технологической сложности обеспечения заданных параметров нагружения в условиях серийного производства, является случай, когда труба изгибается при воздействии комбинированного нагружения: внутреннее давление – 4 МПа, осевое растяжение – 15,5 кН. Для проверки данных, полученных с использованием аналитической модели, был проведен натурный эксперимент.

Выводы.

1. Проведены экспериментальные исследования процессов гибки труб в условиях действия единичного или комбинированного дополнительного

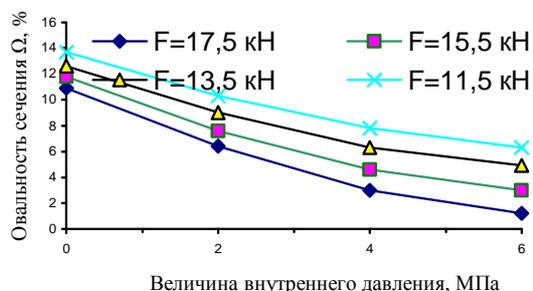


Рис. 8. Овальность сечения при воздействии растягивающего усилия и внутреннего давления

нагружения с использованием анализа с применением аналитической модели и метода конечных элементов.

2. Исследования применения осевого растяжения образцов (11,5 кН) показали хорошие результаты с точки зрения предотвращения образования образования гофров, однако приложение осевого растяжения привело к существенному искажению формы поперечного сечения (овальность составила до 12,2% при прогнозировании с использованием методом конечных элементов, а по результатам анализа экспериментальных данных – до 11,5%).

3. Как свидетельствуют результаты экспериментов, эффективным средством для уменьшения искажения поперечного сечения является использование внутреннего давления.

4. Проведенный анализ влияния комбинированного нагружения на утонение стенок и степень искажения формы поперечного сечения позволил определить оптимальные параметры нагружения с точки зрения соотношения «утонение стенки»/«овализация», а также с учётом технологической сложности обеспечения заданных параметров нагружения в условиях серийного производства.

Список литературы: 1. Wang X. Wrinkling Limit in Tube Bending / X. Wang, J. Cao // Journal of Engineering Materials and Technology.- 2001.- №123(4).- pp. 430-435. 2. Timoshenko S. Theory of Elastic Stability / Timoshenko S.- 1961.- McGraw-Hill, New York.