



ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ НАПРАВЛЕННЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ВОЛНАМИ

И. З. ЛЮТАК

Представлен один из подходов к определению напряженно-деформированного состояния трубопроводов малых и больших диаметров ультразвуковыми направленными кольцевыми волнами, а также графические зависимости скорости распространения восьми мод ультразвуковых направленных кольцевых волн от величины механических напряжений в стенке трубопровода.

The paper presents one of the approaches to determination of the stress-strain state of large and small diameter pipelines by ultrasonic guided circular waves, as well as graphic dependencies of the velocity of propagation of eight modes of ultrasonic guided circular waves on the magnitude of mechanical stresses in the pipeline wall.

В Украине эксплуатируется значительное количество трубопроводов, которые подвергаются силовым воздействиям вследствие сдвига грунтов, перераспределения нагрузок от проседания фундаментов и т. д. Определение деструктивных силовых воздействий на трубопроводы в эксплуатационных условиях, приводящих к изменению механических напряжений и деформаций в их стенках, является одной из важных задач.

Одним из наиболее распространенных методов, в котором используется зависимость скорости распространения УЗ волн от величины напряженно-деформированного состояния (НДС) металла является УЗ, основанный на явлении акустоупругости (ЯА).

Определением НДС металла трубопроводов с помощью УЗ волн занимаются ряд научно-исследовательских учреждений в Украине и за ее пределами. Отечественные ученые А. Гузь, А. Гуца, зарубежные Д. Игл и К. Винклер заложили основы подхода к определению НДС технологических объектов УЗ волнами [1–3]. При дальнейших исследованиях особое внимание уделялось усовершенствованию моделей зависимости скорости направленных УЗ волн от величины НДС [3–6]. В Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа на базе кафедры методов и приборов контроля качества и сертификации продукции разрабатываются методы определения НДС в стенках трубопроводов с использованием объемных волн (продольных и поперечных), а также мод направленных кольцевых волн.

Целью данной работы является усовершенствование модели определения величины НДС металла трубопроводов в зависимости от изменения скорости распространения мод УЗ направленных кольцевых волн (УЗНКВ).

Рассмотрим изменение скорости распространения мод УЗНКВ в зависимости от величины НДС на основе подхода Мурнагана, разработавшего модель упругости применительно к стали. В работе [2] на основе этого подхода была разработана модель ЯА для объемных УЗ волн, распространяющихся параллельно и перпендикулярно к направлению деформаций [2]. Используя ЯА, проведем вычисления изменения скорости распространения мод УЗНКВ в стенках трубопроводов. Зависимость скорости объемных УЗ волн от величины НДС записана в виде [2]:

$$\begin{aligned} \rho c_{xx}^2 &= \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \\ &\quad + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)] \epsilon, \\ \rho c_{xy}^2 &= \rho c_{xz}^2 = \mu + [4\mu + \nu(n/2) + m(1 - 2\nu)] \epsilon, \\ \rho c_{yy}^2 &= \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)] \epsilon, \\ \rho c_{yx}^2 &= \mu + [(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + \nu n/2] \epsilon, \\ \rho c_{yz}^2 &= \rho c_{zy}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu - n/2] \epsilon, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϵ — деформация в направлении 1; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность среды; c_{xx} , c_{xy} , c_{xz} — скорости распространения УЗ объемных волн вдоль оси, указанной первым индексом, и поляризацией колебаний, указанных вторым индексом; λ , μ — упругие константы Лямэ; l , m , n — упругие константы Мурнагана третьего порядка; α_x , α_y , α_z — компоненты главных деформаций.

УЗНКВ состоят из суперпозиции объемных продольных и поперечных УЗ волн, моды которых отличаются фазовой и групповой скоростями распространения [7, 8]. В общем случае мода УЗНКВ формируется четырьмя объемными волнами падающей и отраженной от верхней и нижней границ раздела сред. Рассмотрим распространение УЗНКВ по окружности трубы (рис. 1).

Моды УЗНКВ, возбужденные ультразвуковым первичным преобразователем (УПП), распространяются в стенке трубы и регистрируются приемным УПП. В зависимости от типа УПП (колебания продольные или поперечные) поле УЗНКВ в стенке трубы будет формироваться определенным набором объемных волн с соответствующей поляризацией колебаний, поэтому ЯА описывается различным набором уравнений (1). Рассмотрим три случая возбуждения УЗНКВ с использованием теории колебаний сплошных сред, учитывая поляризацию объемных волн:

— если УЗНКВ возбуждается прямым УПП с продольными колебаниями чувствительного элемента, то ЯА описывается компонентами объемных волн (c_{xx} , c_{yy} , c_{xy} , c_{yz});

— при возбуждении УЗНКВ прямым УПП с поперечными колебаниями чувствительного элемента, поляризованными в направлении оси x , ЯА описывается компонентами (c_{xx} , c_{xy} , c_{yx});

— УЗНКВ возбуждается прямым УПП с поперечными колебаниями чувствительного элемента, поляризованными в направлении оси z — ЯА описывается компонентами (c_{yz} , c_{xz}).

В результате анализа установлено, что скорость распространения УЗНКВ можно вычислить с помощью уравнений (1).

На практике определение изменения скорости распространения отдельных компонентов объемных волн, которые формируют УЗНКВ, при изменении величины НДС металла в стенках трубопроводов, является сложной задачей. При описании акустоупругости УЗНКВ воспользуемся уравнением энергии деформации W_s , полученным на основании теории Лагранжа с коэффициентами упругости третьего порядка [9]:

$$W_s = W_s(\text{СК}) = W_s(F^T F), \quad (2)$$

где СК — тензор деформаций Коши–Грина; F — градиент деформаций; F^T — транспонированный градиент деформаций.

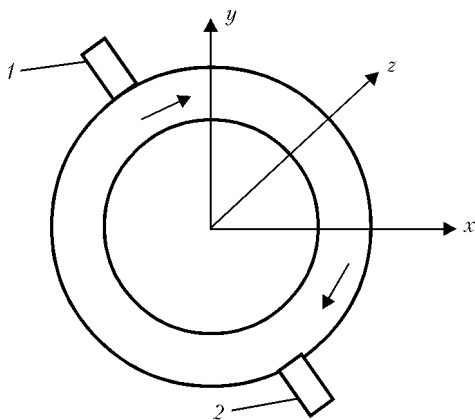


Рис. 1. Распространение УЗНКВ в стенке трубы: 1, 2 — соответственно генерирующий и приемный УЗ первичные преобразователи (стрелками показано распространение мод)

Это уравнение позволяет применять уравнения акустоупругости для многоосного случая деформации упругой среды, в том числе для деформации стенки трубопровода и дает возможность объединить в одном уравнении выражения для величины приложенных внешних усилий, деформации упругой среды и изменения скорости распространения УЗ объемных волн и мод УЗНКВ. Способ вычисления скорости распространения УЗНКВ для двумерного пространства базируется на факторизации функции, описывающей деформации, и реализован с помощью метода конечных элементов для вычисления собственных колебаний механической системы [10]. Еще одним преимуществом метода конечных элементов является возможность с его помощью более точно определять скорость распространения УЗНКВ, поскольку по окружности трубы взаимная пропорция продольной и поперечной волн изменяется вследствие криволинейности границ раздела среды УЗНКВ.

Соотношение между разницей скоростей мод УЗНКВ, полученной по представленной модели, можно вычислить по формуле [9]:

$$\frac{c - c_0}{d\varepsilon c_0} = 1 + \frac{f - f_0}{d\varepsilon f_0} + \frac{f - f_0}{f_0}, \quad (3)$$

где c , c_0 — соответственно скорости ультразвука в деформированной и недеформированной средах; f , f_0 — соответственно частоты собственных колебаний механической системы в деформированной и недеформированной средах; $d\varepsilon$ — изменение деформации упругой среды.

Представленный метод вычисления акустоупругости УЗНКВ позволяет проводить анализ для любых диаметров трубопроводов.

Для вычисления разности скоростей распространения мод УЗНКВ $c - c_0 / c_0$ возьмем трубу диаметром 273 мм и толщиной стенки 10 мм из стали с параметрами, которые приведены при проверке результатов в лабораторных условиях [2]. Вычисление разности скоростей будем проводить для восьми мод УЗНКВ в двух частотных диапазонах 1 и 2,5 МГц. В связи с тем, что при увеличении частоты необходимо увеличение числа конечных элементов на частоте 2,5 Гц расчет будет проводиться только на половине окружности трубы (рис. 2). Граничные условия на разрезе будут симметричными, что позволяет моделировать часть трубы как одно целое. Расчеты проведем в три этапа: на первом — рассчитываются собственные частоты трубы без напряжений; на втором к трубопроводу прикладываются внешние усилия и рассчитываются величины напряжений и деформаций; на третьем — рассчитываются собственные частоты трубопровода после приложения

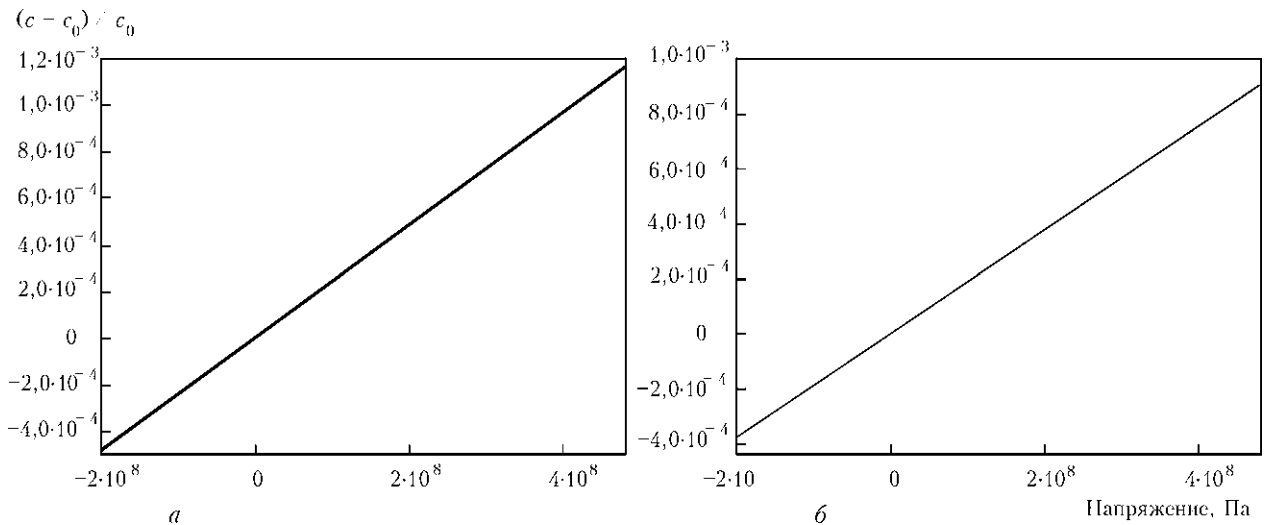


Рис. 2. Акустоупругость УЗ направленной кольцевой волны в стенке трубы: а, б — первая мода на частоте соответственно 2,5 и 1,0 МГц

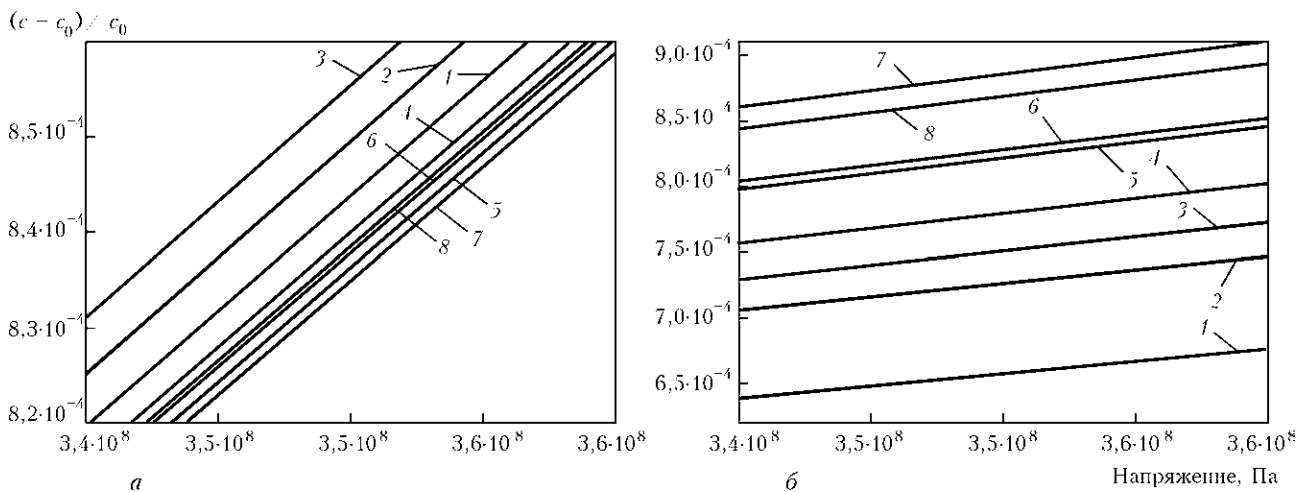


Рис. 3. Акустоупругость восьми мод УЗ направленной кольцевой волны в стенке трубы в окрестности частот 2,5 (а) и 1 МГц (б) в диапазоне высоких напряжений

внешних усилий, т. е. его НДС. Как видно из представленных результатов, собственные частоты зависят от величины НДС, а величина акустоупругого коэффициента (левая часть уравнения (3) от частоты (рис. 2). Здесь и далее рассматривается отрезок трубы с приведенными выше параметрами.

Для оценки изменения скорости распространения отдельных мод УЗНКВ от величины НДС получены графические зависимости (рис. 3). Как видно, разность скоростей мод УЗНКВ от величины НДС на частоте 2,5 МГц больше, чем на частоте 1 МГц. Для указанного частотного диапазона наибольший коэффициент акустоупругости получен для 7-й и 8-й мод.

Для определения скорости распространения отдельных мод УЗНКВ в стенке трубопровода проведен расчет их дисперсных свойств по разработанному алгоритму. Групповую скорость определяли по аппроксимированному линейному

уравнению. Высшие моды аппроксимированы полиномом высокого порядка.

Выводы

УЗНКВ можно использовать для определения НДС трубопроводов разных диаметров. Результаты приведенных расчетов разности скоростей распространения мод УЗНКВ в зависимости от НДС трубопровода показывают, что каждая из восьми мод характеризуется собственным акустоупругим коэффициентом, величина которого зависит от частоты моды.

1. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорот, О. И. Гуша, В. К. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1974. — 108 с.
2. Egle D. M., Bray D. E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel // J. Acoust. Soc. Am. — 1976. — **60**. — P. 741–744.
3. Winkler K. W., Xingzhou L. Measurements of third-order elastic constants in rocks // Ibid. — 1996. — **100**. — P. 1392–1398.

4. *Dipole flexural waves splitting induced by borehole pressurization and formation stress concentration* / Z. Cao, K. Wang, G. Li et al. // *Chin. J. Geophys.* — 2003. — **46**. — P. 1021–1030.
5. *Zhengliang Cao, Kexie Wang, Zaitian Ma. Acoustoelastic effects on guided waves in a fluid-filled pressurized borehole in a prestressed formation* // *J. Acoust. Soc. Am.* — 2004. — **116**, № 3. — P. 1406–1415.
6. *Ping'en Li, Youquan Yin, Xianyue Su. Acoustoelastic effects on mode waves in a fluid-filled pressurized borehole in triaxially stressed formations* // *Acta Mechanica Sinica.* — 2006. — **22**, № 6. — P. 569–580.
7. *Лютак І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот* // *Техн. діагностика и неразруш. контроль.* — 2009. — № 2. — С. 30–35.
8. *Лютак І. З. Розроблення алгоритму обчислення дисперсних властивостей спрямованих ультразвукових хвиль та дослідження їх залежності від механічних характеристик сталі* // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів.* — 2009. — Вип. 14. — С. 22–28.
9. *Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Comsol [електронний ресурс]: Версія 3.5a / Компанія COMSOL, Inc.* — 2009. — 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM). — Системні вимоги: Windows XP. — Назва з титул. екрану.
10. *Wilcox P. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section* / P. Wilcox, M. Evans, O. Diligent et al. // *Review of Progress in QNDE.* — 2002. — **21**. — P. 203–210.

Ів.-Франк. нац. техн. ун-т нафти и газа

Поступила в редакцію
21.06.2010



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. С. А. Недосека защитил 2 июня 2010 г. докторскую диссертацию на тему «*Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии*».

Диссертация посвящена решению проблемы оценки фактического состояния сварных конструкций с накопленными повреждениями и разработке методов акустико-эмиссионной диагностики и мониторинга, имеющих целью заблаговременно на основе прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса выявить опасность возникновения трещин и не допустить разрушения.

Для решения задач были объединены современные подходы в таких научных направлениях, как континуальная механика, акустика и математическое моделирование. Результаты исследования АЭ, полученные при механических испытаниях образцов на статическое растяжение, сопоставлены с экспериментальными данными, полученными дополнительными методами: АЭ сканированием, определением ударной вязкости, взвешиванием в жидкости, ЛМ-твердости и металлографическим анализом. Показано, что влияние сварного соединения на АЭ свойства материала состоит в увеличении количества событий АЭ с увеличением объема металла, составляющего зону термического влияния.

Формализован и применен объектный подход к решению задачи, описывающей возникновение, рост и взаимодействие множественных пор в процессе накопления повреждений при деформировании, а также возникновение вследствие этого волн АЭ. Это позволило существенно упростить решение задачи за счет инкапсуляции базовой функциональности модели в

объектах, моделирующих поры, и обеспечить в рамках того же самого алгоритма моделирования, возникновения и развития разнообразных полей повреждений в разных условиях с учетом влияния концентрации напряжений

Разработана математическая модель, связывающая АЭ и акустические свойства материала с процессом накопления повреждений, который трактуется как возникновение, рост и взаимодействие сферических пор с учетом влияния объемного распределения повреждений и геометрии концентратора на прохождение через материал акустических сигналов. Модель позволяет создавать эталоны АЭ для различных условий формирования поврежденности в материале. Усовершенствована методика аналитического расчета возникающих и распространяющихся в материале волн АЭ путем разбития суммарной волны на элементарные составляющие по волновым числам и комплексным частотам. Выполненные расчеты возникающих и распространяющихся в стержневых и плоских элементах конструкций акустических волн показали зависимость спектра, формы и амплитуд волн от толщины материала. Разработан и подтвержден экспериментально метод прогноза разрушающей нагрузки, основанный на сравнении данных реальных АЭ испытаний с эталонами, получаемыми с помощью математической модели накопления повреждений, представленной в виде вектора состояния материала.

Научные результаты, полученные в работе, подтверждены на практике при анализе состояния действующих конструкций, внедрены и применяются в производственных условиях при диагностическом контроле и непрерывном АЭ мониторинге труб, барабанов котлов, сосудов давления, хранилищ и оборудования цехов производства аммиака, на мостовых переходах труб аммиакопровода.