

Таким образом, разработана методика и проведены экспериментальные работы по определению неизвестных в настоящее время параметров кривых усталости выводов РЭ различного конструктивного исполнения, с различными вариантами установки и различной формой выводов и их сечений, необходимых для расчета времени до их усталостного разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник / В.Т. Трощенко, А.А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1303 с.
2. Степин П.А. Сопротивление материалов: Учебник для немашиностроит. спец. вузов / П.А. Степин. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
3. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 173 с.

531.3

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ ВОЛН ЛЭМБА ДЛЯ ОБЪЕМНЫХ И ПЛОСКОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

инж. А.А. ДЕРЯБИН

Приведены результаты исследований влияния угла наклона трещины, диаметра поры на распространение волн Лэмба. Решение задачи дифракции для плоскостного дефекта сводилось к решению задач трансформации поперечной волны, падающей на поверхность дефекта, в головную и Рэлеевскую волну, задачу отражения головной волны от конца трещины, формирования краевых продольной и поперечных волн. Расчет задачи дифракции для объемного дефекта сводился к решению задач трансформации поперечной волны, падающей на поверхность дефекта, в Рэлеевскую волну, движения поверхностной волны по вогнутой цилиндрической поверхности и излучения волн со скальзывания.

В настоящее время проблема оценки остаточного ресурса является наиболее актуальной для страны в целом. Большинство техногенных объектов исчерпали свой нормативный срок

эксплуатации и представляют опасность во всех аспектах: экологических, экономических и социальных. В системе ЖКХ это проявляется наиболее ярко. Речь идет о трубопроводах, обеспечивающих водоснабжение и газоснабжение жилых построек. Эта проблема становится особенно важной для высотных зданий, которые эксплуатируются более двадцати лет (например, здание ОАО «Газпром» и ему подобные).

Проведенный анализ показал, что практически единственным методом диагностирования указанных участков трубопроводов является ультразвуковой, причем наиболее эффективным является контроль волнами Лэмба по теневой схеме. Это обуславливается тем, что этими волнами могут быть обнаружены поверхностные трещины не только с наружной, но и с внутренней стороны стенки трубы, а также сложно ориентированные дефекты, которые трудно обнаружить объемными волнами.

Изучению этих волн посвящены работы В.Т. Боброва [12 – 14], в которых решены задачи дифракции волн Лэмба на дефекте в виде прямоугольной риски, рассеяния фокусированных пучков волн Лэмба на дефекте типа круглого отверстия, а также контроля толщины пластины.

В нашем случае задача стоит более сложная – выявить внутренние дефекты и определить их характер. Поэтому в основе решения задачи должна быть не жидкостная, а твердотельная модель, позволяющая учитывать дифракционные волны, образующиеся на дефекте при падении на него упругой волны.

Задача разбивалась на две части:

- а) дифракция на плоскостном дефекте;
- б) дифракция на объемном дефекте.

ДИФРАКЦИЯ НА ПЛОСКОСТНОМ ДЕФЕКТЕ

В общем случае [1 – 9] нормальная волна содержит как продольную, так и поперечную компоненты. Нормальную волну можно представить как пару продольных и пару поперечных плоских волн, взаимно переходящих друг в друга при отражении от границ слоя. Значения для потенциалов можно записать следующим образом:

$$\varphi = C \{ \exp[i(\xi x + k_3 z - \omega t)] \pm \exp[i(\xi x - k_3 z - \omega t)] \}$$

$$\psi = D \{ \exp[i(\xi x + \chi_3 z - \omega t)] \mp \exp[i(\xi x - \chi_3 z - \omega t)] \}$$

где φ , ψ – скалярный и векторный потенциалы, $k_3 = \sqrt{k_l^2 - \xi^2}$, $k_l = \frac{\omega}{c_l}$, $\chi_3 = \sqrt{k_t^2 - \xi^2}$, $k_t = \frac{\omega}{c_t}$,

$\xi = k_l \sin(\gamma_l) = k_t \sin(\gamma_t)$, c_l , c_t – скорости продольной и поперечной волн, γ_l , γ_t – углы распространения продольных и поперечных волн с осью Z , ω – угловая частота.

Верхний знак относится к симметричной нормальной волне, а нижний – к антисимметричной.

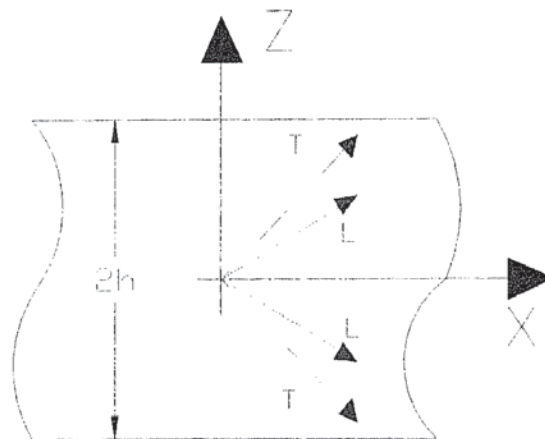


Рис. 1. Структура волн Лэмба

Далее задача сводится к решению задач воздействия плоских волн при падении их на поверхность дефекта. Так как основная линейка углов датчиков находится в диапазоне между третьим и вторым критическими углами, то рассматриваем только падение поперечной волны на поверхность дефекта.

В соответствии с [1], поперечная волна, падая на трещину и касаясь ее краев, порождает два типа краевых дифракционных волн – поле продольных и поперечных волн. Если луч падает под третьим критическим углом к поверхности трещины, то образуется дополнительное поле вследствие неоднородных головных волн.

Особый интерес представляет задача отражения головной волны от конца трещины и формирование краевых волн, так как задачи трансформации поперечной волны в головную и продольную волны представлены в литературе [1 - 11].

Решение задачи взаимодействия продольной волны, распространяющейся вдоль трещины, с концами трещины (расчет коэффициента отражения волны, трансформации в другие типы волн, образующихся на концах трещин) представляется следующим образом.

Представим конец трещины в виде точки, в которой должны выполняться граничные условия:

$$\sigma_x = 0, \sigma_z = 0 \text{ и } \tau_{xz} = 0$$

Выражения для потенциалов в общем виде запишем в следующей форме :

$$\varphi = A \exp[-qz + i(kx - \omega t)]$$

$$\psi = B \exp[-sz + i(kx - \omega t)] \quad (1)$$

где $s^2 = k^2 - k_t^2$, $q^2 = k^2 - k_l^2$, k - волновое число волны.

В результате находим:

- коэффициент отражения продольной волны, распространяющейся вдоль поверхности трещины, от конца трещины:

$$D = \frac{A_1}{A_0} = \frac{\lambda(-\xi^2 + k_3^2) - 2\mu\xi^2}{(a_{13} - \frac{a_{33}a_{11}}{a_{31}}) - (a_{23} - \frac{a_{33}a_{21}}{a_{31}}) \frac{a_{12}a_{31} - a_{32}a_{11}}{a_{22}a_{31} - a_{32}a_{21}}}$$

(2)

где

$$a_{11} = -\lambda k_i^2 + \lambda q^2 - 2\mu k_i^2, \quad a_{12} = i2\mu k_i s, \quad a_{13} = -\lambda \xi^2 + \lambda k_3^2 - 2\mu \xi^2$$

$$a_{21} = -i2\lambda k_i q, \quad a_{22} = -\lambda(k_i^2 + s^2), \quad a_{23} = i2\lambda \xi k_3,$$

$$a_{31} = -\lambda k_i^2 + \lambda q^2 + 2\mu q^2, \quad a_{32} = -i2\mu k_i s, \quad a_{33} = -\lambda \xi^2 + \lambda k_3^2 + 2\mu k_3^2,$$

$$k_3 = k_i \sqrt{\sin^2(\gamma) - (c_i/c_3)^2}, \quad k_3 = k_i \sin(\gamma), \quad \gamma - \text{угол падения поперечной волны на трещину,}$$

$$s^2 = k^2 - k_i^2, \quad q^2 = k^2 - k_i^2, \quad k - \text{волновое число волны.}$$

- коэффициент трансформации продольной неоднородной волны в поперечную волну на конце трещины:

$$V_{II} = \frac{B}{A_0} = \frac{(-\lambda \xi^2 + \lambda k_3^2 - 2\mu \xi^2) - D(a_{13} - \frac{a_{33}a_{11}}{a_{31}})}{a_{12} - \frac{a_{32}a_{11}}{a_{31}}}$$

(3)

- коэффициент трансформации продольной неоднородной волны в продольную волну на конце трещины:

$$V_{II} = \frac{A}{A_0} = -\frac{V_{II}a_{32} - Da_{33}}{a_{31}} \quad (4)$$

Результаты расчета показали, что амплитуда продольной краевой волны на 10 – 12 дБ больше амплитуд поперечных краевых волн, что подтвердил контрольный эксперимент. Из этого следует, что амплитуды боковых волн имеют еще более низкое значение, при расчете волн Лэмба, возникающих в результате дифракции, будем учитывать только краевые продольные волны.

Значения фазовых скоростей, определяющихся как $(c_p)_n = \omega/\xi$, где ξ – проекция волновых чисел на ось, вдоль которых распространяются волны, будут зависеть от угла наклона

трещины, так как будет меняться вместе с углом наклона трещины и проекция волнового числа поперечной краевой волны, которая и формирует волну Лэмба. В результате получается, что отношения фазовых скоростей волны Лэмба до дефекта и после дифракции будет иметь следующий вид:

$$\frac{C_{pi}^2}{C_{pi}^1} \approx \frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha)} \times \frac{Cl}{Ct} \quad (5)$$

где C_{pi}^1 - фазовая скорость волны Лэмба до дефекта, C_{pi}^2 - фазовая скорость волны Лэмба, образованной в результате дифракции, α_1 - угол ввода поперечной волны, α - угол наклона трещины.

Для проверки представленной теории была проведена серия экспериментов, которые подтвердили результаты расчетов.

Образцы изготовлены из Ст 3 сп по ГОСТ 3262-75, что соответствует материалу изготовления газо-водопроводных труб. Толщина всех образцов составляет 6 мм, шероховатость поверхности - не хуже Rz 40, несплошности длиной 3 мм, расположенные под углами наклона 45 и 60 град. относительно нормали.

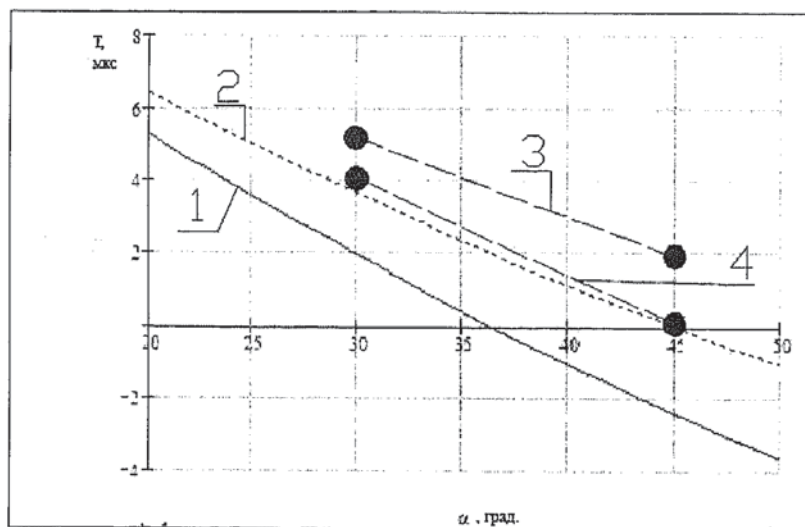


Рис. 2. Измерение разности времени прихода S2 моды волны Лэмба (частота 1.25 МГц):

1- расчетная кривая для угла ввода волны 40° , 2- расчетная кривая для угла ввода волны 50° , 3- экспериментальная кривая для угла ввода волны 40° , 4 - экспериментальная кривая для угла ввода волны 50°

ДИФРАКЦИЯ ВОЛН ЛЭМБА. ОБЪЕМНЫЙ ДЕФЕКТ

Расчет задачи дифракции для объемного дефекта сводился к решению задач падения трансформации поперечной волны, падающей на поверхность дефекта, в Рэлеевскую волну, движения поверхностной волны по вогнутой цилиндрической поверхности и излучения волн соскальзывания.

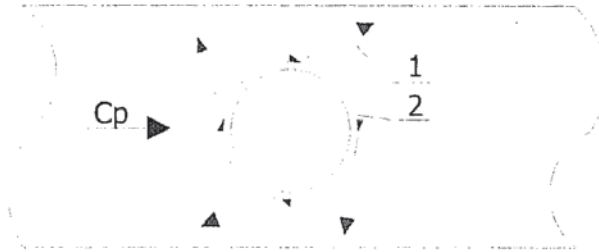


Рис. 3. Схема дифракции:
1- волна соскальзывания, 2- волна огибания, Ср –
направление движения волны Лэмба (фазовая скорость)

Решение данных задач представлено в литературе [1 – 4], где доказано, наибольшее значение амплитуд имеют волны соскальзывания поперечного типа, которые будут влиять на формирование волн Лэмба.

Для решения задачи дифракции для несплошности в виде поры необходимо учесть следующее:

- огибающая волна ослабевает по периметру дефекта;
- каждая волна соскальзывания имеет свою проекцию волнового числа, на ось вдоль которой она распространяется (ось X), что будет влиять на фазовую скорость волн Лэмба;
- амплитуда волн соскальзывания будет убывать, в зависимости от удаленности точки излучения этой волны от точки падения поперечной волны.

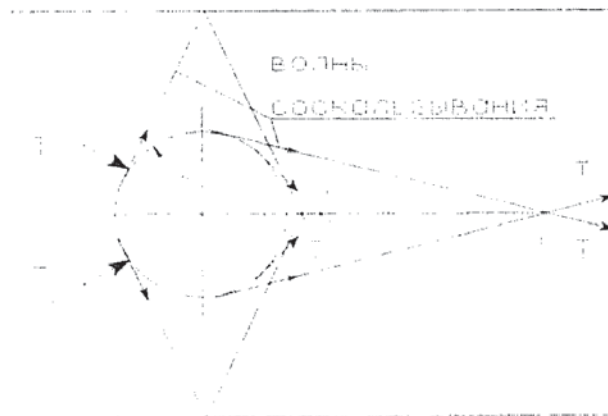


Рис. 4. Схема формирования волн Лэмба волнами соскальзывания:

R – радиус поры

Волны Лэмба будут формироваться в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.

Ряд волн формируется за счет отраженных волн от поверхности пластины, часть – лучами соскальзывания без отражения. Величина радиуса поры непосредственно влияет на фазы сформированных волн Лэмба следующим образом:

- для волн Лэмба, сформированных волнами соскальзывания без отражения:

$$\tau = \frac{R}{C_l} \times \text{tg}(\alpha_n) \quad (6)$$

- для волн с отражением:

$$\tau = \frac{H - R \sin(\alpha_{ii})}{C_t \cos(\alpha_{ii})} \quad (7)$$

где α_{ii} - угол распространения волны соскальзывания (угол касательной к поверхности дефекта и нормалью).

Для проверки представленной теории были проведены эксперименты, которые подтвердили результаты расчетов.

Образцы изготовлены из Ст 3 сп по ГОСТ 3262-75, что соответствует материалу изготовления газо-водопроводных труб. Толщина всех образцов составляет 6 мм, шероховатость поверхности - не хуже Rz 40, образцы с имитацией объемных дефектов (пор) имеют боковые сверления с диаметром 1.0, 1.5, 2.0 мм.

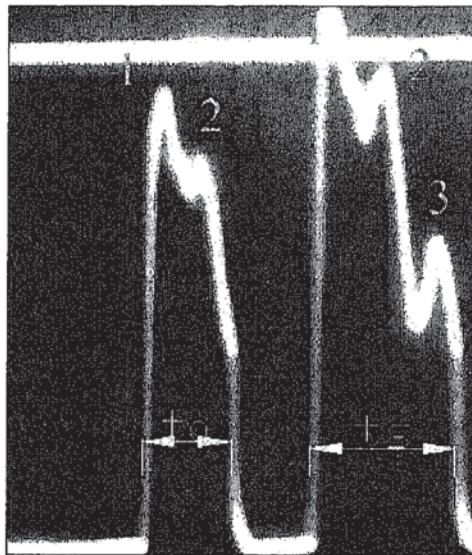


Рис. 5. Изменения формы сигнала от волн Лэмба при наличие бокового сверления диаметром 2 мм

Как видно из рис.5 при наличии в образце бокового сверления диаметром 2 мм, наблюдаются два различных импульса от первых асимметричных мод и три импульса от симметричных нулевых мод. Принимая за длительность сигнала величину времени от фронта сигнала до линии спада, можно посчитать эту длительность для первых асимметричных мод τ_a и симметричных нулевых мод τ_s .

ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах расчетов и экспериментального исследования влияния геометрии дефектов на параметры распространения волн Лэмба, можно сделать следующие выводы:

1. Фазовая скорость нормальной волны зависит от угла наклона трещины, так как на ее формирование оказывает влияние краевая волна продольного типа, направленная по направлению трещины.
2. Диаметр поры влияет на форму принимаемого сигнала мод нулевого порядка за счет формирования пакетов волн Лэмба волнами соскальзывания поперечного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 496 с.
2. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред. - М.: Наука, 1982. – 335 с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. - М.: Наука, 1973. – 344 с.
4. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М.: Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.
5. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981. – 288 с.
6. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. - М.: Наука, 1966. - Гл. 1. - С. 5 – 77.
7. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. - М.: Металлургия, 1965. – 391 с.
8. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. - М.: Металлургия, 1974. – 240 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. - М.: Наука, 1965. – 202 с.
10. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Могильнер Л.Ю. Повышение выявляемости объемных дефектов // Дефектоскопия. – 1985. - № 7. – С. 24 – 32.
11. Алешин Н.П., Волков С.А., Мартыненко С.В. Расчет поля рассеяния на плоскостных дефектах // Дефектоскопия. – 1984. - № 11. - С. 3 – 10.
12. Бобров В.Т. Влияние характера дефекта на эффективность ультразвукового контроля при радиочастотной сварке труб // Сварочное производство. – 1969. - № 6. - С. 22-24.
13. Экспериментальное исследование особенностей возникновения и распространения волн Лэмба при импульсном возбуждении методом клина / И.Н. Ермолов, В.Т. Бобров, С.В. Веремеенко и др. // Дефектоскопия. - 1971. - № 2. – С. 43 – 49.
14. Лебедева Н.А., Бобров В.Т. Влияние дисперсии на ослабление импульса волн Лэмба // Дефектоскопия. – 1973. - № 1. – С. 131 – 133.
15. Никифорова Ж. Г., Бобров В. Т., Авербух И.И. Распространение волн Лэмба в анизотропных листах // Дефектоскопия. – 1972. - № 5. – С. 56-63.
16. Бобров В.Т., Лебедева Н.А. О характере отражения и трансформации импульса волн Лэмба на кромке и на дефекте типа риски // Ультразвуковые методы неразрушающего контроля: Материалы всесоюзной научно-технической конференции. – Киев, 1970. – С. 99.

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ СТАТЬИ В НАШЕМ ЖУРНАЛЕ

1. Статья должна быть подписана авторами с указанием ФИО, ученой степени, должности, почтового адреса, адреса e-mail, номера телефона.

2. Перед заглавием проставляется индекс УДК.

3. Объем рукописи от 3 до 30 страниц с аннотацией, формат — А4.

4. Требуется отзыв, за подписью зав. кафедрой и научным редактором, либо руководителем предприятия (фирмы).

5. Статья должна быть выполнена в текстовом процессоре Word 97/2000, Word XP, или в последующих за ними версиях.

6. Рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как AutoCad или Adobe Illustrator. Приветствуется создание векторных рисунков и чертежей в Macromedia Flash. Допускается выполнение рисунков небольшой сложности в MS EXCEL 2002/XP. Сложные рисунки (трехмерная графика, чертежи дизайнерского уровня) должны быть выполнены в виде отдельных файлов, а фотографии должны быть обязательно обработаны в фоторедакторах уровня Adobe Photoshop с нанесением всех пояснительных записей и комментариев к фотографиям в этих же редакторах и сохранением файлов в *.Tiff или *.PSD формате со всеми слоями. Форматы *.BMP, *.jpeg, *.gif допустимо использовать только для создания рисунков и сохранения фотографий начального уровня сложности. Подписи и комментарии не должны быть наложены на рисунок или фотографию. Применение псевдографики, изготовление рисунков, чертежей и фотографий кустарным способом не допускается.

7. Статья должна быть набрана шрифтом 14 кегля через 2 интервала, абзац отделяется одним маркером конца абзаца. Распечатка статьи производится исключительно на лазерном принтере в двух экземплярах, аннотация к статье предоставляется на русском и английском языках не более 12 строк и распечатывается также в двух экземплярах. Статья может быть прислана в редакцию по электронной почте, в этом случае распечатка не требуется. Статья должна быть заархивирована в RAR или ZIP формат, рисунки могут находиться в одном архиве с текстом, размер файла архива не более 5 mb, лучше поделить архив на несколько и присылать поэтапно, но сохранить рисунки высокого качества (PSD формат и т.п. со слоями). Формулы набираются в редакторе Equation, греческие буквы набираются прямым шрифтом, латинские курсивом, русские индексы — прямым, латинские курсивом. При распечатке греческие буквы от руки обводятся красным цветом.

8. В статьях должна применяться Система международных единиц (СИ).

9. Список литературы предоставляется в конце статьи с указанием ФИО автора источника, названия, наименования издания, места и года выпуска, номера, тома, количества страниц в книге и перечня страниц в журнале, гипертекстовая ссылка в случае, если издание находится в Интернете. Список составляется в последовательности ссылок в тексте. В тексте статьи ссылки на список литературы заключаются в квадратные скобки.

10. Статьи могут быть опубликованы на коммерческой основе в разделе «Разное», не допускается свободное изложение материала в таких статьях, их тематика должна быть научной и соответствовать тематике нашего журнала. Цена — договорная.

11. Статьи, соответствующие тематике нашего журнала в полной мере и принятые к печати, оплачиваются автором, организацией, фирмой, спонсорами и т.д.

Наши реквизиты:

ИНН 7701002520/КПП 770101001

УФК по г. Москве (МГТУ им. Н.Э. Баумана л/с 06073332510)

Отделение 1 Московского ГТУ Банка России г. Москва 705

Р/счет 40503810600001009079

БИК 044583001