

Исследование акустических свойств неравномерно нагруженной границы твердых сред при контроле фланцевых соединений

А. В. Костерина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

anna.vkosterina@gmail.com

Аннотация. Целью работы является исследование влияния сплошности границы двух твердых поверхностей в составе фланцевого соединения на амплитуду передаваемого ультразвукового сигнала. В ходе работы были записаны граничные условия для случая нарушенного контакта двух поверхностей, получены теоретические зависимости изменения амплитуды принимаемого сигнала от приложенного давления. В результате исследования было установлено, что жесткость адгезии существенно влияет на амплитуду ультразвукового сигнала.

Ключевые слова: граничные условия, ультразвуковой контроль, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, изменение амплитуды, контактное давление

I. ВВЕДЕНИЕ

Поверхность между твердыми телами, на которой непрерывны упругие напряжения и упругие смещения, считается границей жестко соединенных сред. Поскольку состояние границы раздела оказывает сильное влияние на поведение гармонических волн при их прохождении из одной среды в другую, записав граничные условия, определяющие состояние границы раздела между телами, можно получить волновые уравнения для обоих сред.

Данную схему можно применять и для случая нарушенного контакта, т. е. нежесткого соединения сред. Тогда нарушается непрерывность перемещений распространяющихся волн [1]. На практике примером твердых соприкасающихся поверхностей с нарушенным контактом могут служить фланцевые соединения, широко распространенные на различных промышленных объектах. В процессе эксплуатации оборудования под воздействием вибраций, высокого давления, агрессивных сред и температурных колебаний возникают осевые и радиальные деформации, самопроизвольный отпуск крепежей, что влечет за собой нарушение плотности контакта соединяемых деталей. Безусловно, данные явления негативно сказываются на сроках службы технических устройств, а также на их безопасности, что обуславливает необходимость контроля силы сцепления фланцевых соединений неразрушающими методами. Для этих целей возможно применение акустического метода, основанного на влиянии состояния границы раздела на амплитудные характеристики падающих ультразвуковых волн.

II. ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД НА АМПЛИТУДУ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Соединение называется нежестким, если на границе раздела отсутствуют поля малых перемещений, но усилия сцепления непрерывны. Чтобы учесть особенности зацепления при соприкосновении двух поверхностей, образованном множеством микроконтактов, необходимо математически связать физические параметры контактирующих поверхностей с упругими свойствами несплошности.

Пусть контактируют две упругие среды, характеризующиеся параметрами Ламе – λ и μ . Упругие постоянные Ламе – константы, принадлежащие к множеству модулей упругости и характеризующие упругие деформации твердых тел. Линейная зависимость между тензором деформации ε и тензором напряжений σ в упругой среде выражается с помощью закона Гука:

$$\sigma = \lambda T(\varepsilon)I + 2\mu\varepsilon \quad (1)$$

Так как всякие поверхности имеют микроскопические шероховатости, контакт между твердыми телами осуществляется за счет соприкосновения выступов и впадин рельефа. Таким образом, каждое отдельное шероховатое соединение на плоской границе двух упругих полупространств можно представить в виде механической колебательной системы, состоящей из соединенных цепочкой элементов массы и упругости.

Эквивалентное механическое сопротивление, приходящееся на единицу площади участка границы, зависит от эквивалентной жесткости, поскольку массовый компонент существенно уступает по величине упругому. Модуль эквивалентной жесткости KGN , определяющий нормальные составляющие упругих смещений, находится согласно выражению [2]:

$$KGN = \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)c_1c_2}{(\lambda_1 + 2\mu_1)c_1 + (\lambda_2 + 2\mu_2)c_2} \frac{2\pi(1-\xi)}{\omega d^2\xi} \quad (2)$$

Модуль эквивалентной жесткости KGT , определяющий тангенциальные составляющие упругих смещений, определяется по формуле:

$$KGT = \frac{\mu_1\mu_2c_1c_2}{\mu_1c_1 + \mu_2c_2} \frac{2\pi(1-\xi)}{\omega d^2\xi} \quad (3)$$

где $\xi = b^2/d^2$ – коэффициент перфорации, зависящий от размеров несплошностей рельефа, b, d – параметры шероховатости границы. Когда коэффициент перфорации стремится к максимальному значению, т. е. 1, коэффициенты KGN и KGT приближаются к 0, что соответствует отсутствию контакта.

Для расчета коэффициентов KGN и KGT были взяты плотности и постоянные Ламе стали и паронита, т. к. в реальных фланцевых соединениях часто используются паронитовые прокладки.

По формулам (2) и (3) рассчитана контактная жесткость для нормальных и тангенциальных составляющих упругих смещений. Результаты вычислений представлены на рис. 1 и 2.

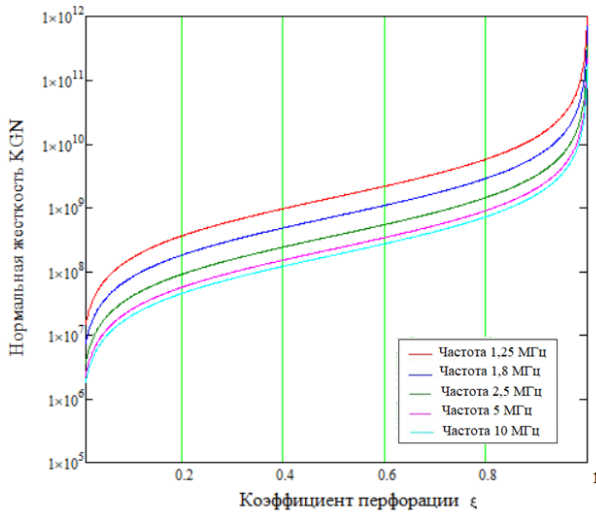


Рис. 1. Зависимость нормальной жесткости от коэффициента перфорации (ξ) границы твердых сред (сталь-паронит) на множестве микроконтактов

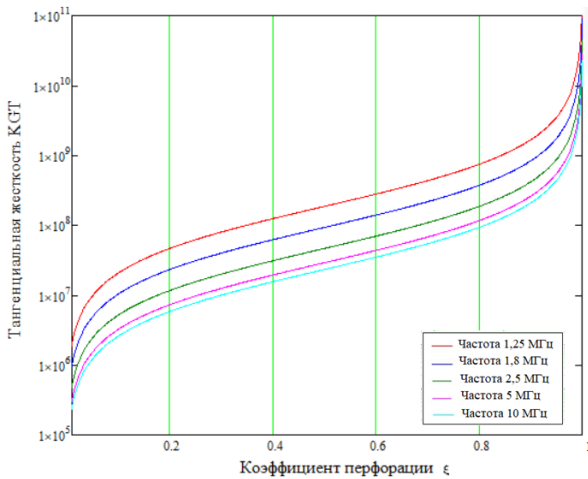


Рис. 2. Зависимость тангенциальной жесткости от коэффициента перфорации (ξ) границы твердых сред (сталь-паронит) на множестве микроконтактов

Полученные значения на рис. 1 и 2 отображены в логарифмическом масштабе. По графикам видно, что для границы сталь-паронит значения жесткости в тангенциальном направлении, меньше, чем в направлении нормали. По полученным при расчетах

значениям можно судить о величине и изменении параметров, формирующих граничные условия.

Полное поле складывается из падающей и отраженной волны. В случае падения на границу раздела «жестко» соединенных твердых сред плоской продольной акустической волны граничные условия записываются в виде:

$$\begin{aligned} u_z^{(1)} &= u_z^{(2)}, \\ \sigma_{zz}^{(1)} &= \sigma_{zz}^{(2)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для поперечной волны:

$$\begin{aligned} u_x^{(1)} &= u_x^{(2)}, \\ \sigma_{xz}^{(1)} &= \sigma_{xz}^{(2)}, \\ \sigma_{zz}^{(1)} &= \sigma_{zz}^{(2)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где u_z, u_x – компоненты смещений, σ_{zz}, σ_{xz} – компоненты тензора механических напряжений.

При нарушенном контакте условие равенства упругих напряжений остается неизменным, при этом происходит неполная передача составляющих упругих смещений. Описывающие данные явления неоднородные граничные условия записываются следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}^{(1)} &= \sigma_{zz}^{(2)}, \\ u_z^{(1)} &= u_z^{(2)} + \frac{\sigma_{zz}^{(2)}}{KGN}, \\ \sigma_{xz}^{(1)} &= \sigma_{xz}^{(2)}, \\ u_x^{(1)} &= u_x^{(2)} + \frac{\sigma_{xz}^{(2)}}{KGT}. \end{aligned} \quad (6)$$

Компоненты тензора напряжений в средах выражаются в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right), \\ \sigma_{zz} &= \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial x}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения для смещений $u_{x,z}$ можно представить следующим образом [4]:

$$\begin{cases} u_x^{(1)} = [-ik A_1 \exp(-q_1 z) + s_1 B_1 \exp(-s_1 z)] \exp[i(\omega t - kx)], \\ u_z^{(1)} = [q_1 A_1 \exp(-q_1 z) + ik B_1 \exp(-s_1 z)] \exp[i(\omega t - kx)], \\ u_x^{(2)} = [-ik A_2 \exp(q_2 z) + s_2 B_2 \exp(s_2 z)] \exp[i(\omega t - kx)], \\ u_z^{(2)} = [-q_2 A_2 \exp(q_2 z) - ik B_2 \exp(s_2 z)] \exp[i(\omega t - kx)], \end{cases} \quad (8)$$

где $A_{1,2}, B_{1,2}$ – произвольные амплитуды, $s_1 = \sqrt{k^2 - k_{t1}^2}$, $s_2 = \sqrt{k^2 - k_{t2}^2}$, $q_1 = \sqrt{k^2 - k_{l1}^2}$, $q_2 = \sqrt{k^2 - k_{l2}^2}$, k – волновое число.

Подставляя (8) в (6), получим систему линейных однородных уравнений относительно амплитуд $A_{1,2}, B_{1,2}$.

Переходя от граничных условий к амплитудным характеристикам, возможно определить величину

сигнала, отраженного или прошедшего через границу раздела сред. Также это можно сделать, принимая каждое шероховатое соединение пружину [5]. Пружинная модель позволяет через межфазную жесткость перейти от давления, приложенного к соприкасающимся поверхностям, к коэффициенту отражения ультразвуковой волны.

Амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела сред, выражается через межфазную жесткость K согласно выражению [6]:

$$|R| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2K}{\omega z}\right)^2}} \quad (9)$$

где ω – угловая частота ультразвуковой волны, z – акустическое сопротивление (импеданс) через границу раздела сред.

Жесткость K в свою очередь определяется через приложенное контактное давление P_{nom} и расстояние между средними линиями шероховатости двух поверхностей U :

$$K = \frac{dP_{nom}}{dU}, \quad (10)$$

Данный вариант определения коэффициента отражения и амплитуды сигнала справедлив для контакта элементов фланцевого соединения без прокладки из другого материала между ними. При сжатии двух поверхностей с прослойкой между ними, следует учитывать изменение акустического импеданса, который зависит от скорости распространения продольной волны и плотности материала. В монографии Л. М. Бреховских [7] описано отражение плоских волн от слоя, разделяющего две однородные среды. Коэффициент отражения в случае, когда среды по обе стороны слоя одинаковы, находится следующим образом:

$$R = \frac{Z_2^2 - Z_1^2}{Z_1^2 + Z_2^2 + 2Z_1Z_2 \operatorname{ctg}^2(k_2d)} \quad (11)$$

где $Z_1 = c_1\rho_1$, $Z_2 = c_2\rho_2$ – акустический импеданс первой и второй среды соответственно, c – скорость продольной волны в материале ρ – плотность материала; $k_2 = \frac{2\pi f}{c}$ – волновое число, f – частота, d – толщина слоя.

Объединяя выражения (9) и (11), получаем формулу для расчета коэффициента отражения ультразвуковой волны от границы раздела фланец-прокладка. При этом коэффициент отражения будет зависеть от давления, с которым поверхности прижимаются друг к другу.

В качестве материалов прослойки выбран паронит, т. к. он наиболее часто применяется на практике для уплотнения фланцевых соединений. Зависимость амплитуды сигнала, отраженного от границы сталь-паронит-сталь, от приложенной нагрузки, полученная в результате расчетов, представлена на рис. 3.

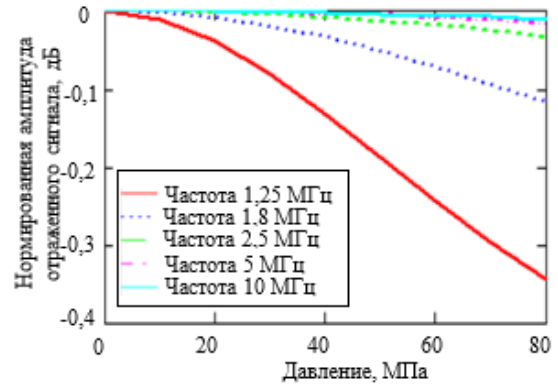


Рис. 3. Нормированная амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела сталь-паронит-сталь, на различных частотах при увеличении давления на поверхности

Как видно из рис. 3, падение амплитуды близко к линейному и может служить критерием для оценки степени сжатия поверхностей, при этом наибольшее уменьшение наблюдается на низких частотах. Однако при увеличении внешнего давления максимальное ослабление сигнала составляет менее 1 дБ, что может быть трудно различимо в условиях контроля реальных производственных объектов.

При уменьшении амплитуды отраженного сигнала, амплитуда прошедшего сигнала должна возрастать. Это утверждение вытекает из закона сохранения энергии, связывающего эти два параметра. Изменение амплитуды сигнала, прошедшего через уплотнительный слой из паронита, представлено на рис. 4.

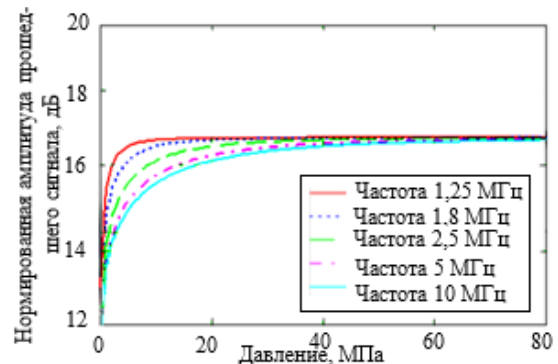


Рис. 4. Нормированная амплитуда прошедшего сигнала разных частот через границу сталь-паронит-сталь при увеличении контактного давления

Из рис. 4 видно, что, в отличие предыдущего графика, зависимость имеет нелинейный характер и имеет насыщение. На высоких частотах происходит более плавный выход кривой в зону насыщения, на низких – переход осуществляется скачком, при этом амплитуда насыщения выше. Увеличение амплитуды сигнала вызвано улучшением акустического контакта под действием внешнего давления.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

Как показали теоретические расчеты, в одинаковых условиях амплитуда прошедшего через границу раздела сред сигнала выше, чем отраженного, поэтому для

фиксации изменения амплитуды сигнала был выбран теневой метод акустического контроля. Схематичное изображение взаимного расположения пластин, паронитовой прокладки и преобразователей для проведения контроля представлено на рис. 5.

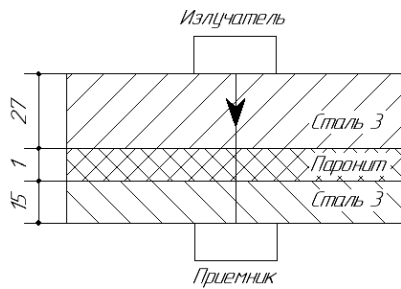


Рис. 5. Схема проведения измерений теневым методом

Для проведения измерений использовался ультразвуковой дефектоскоп «Пеленг» УДЗ-204. Пластины из стали 3 и паронитовой прокладкой между ними сжимались друг с другом с помощью прессы с максимальным давлением 80 МПа

Результаты измерения амплитуды прошедшего сигнала представлены на рис. 6.

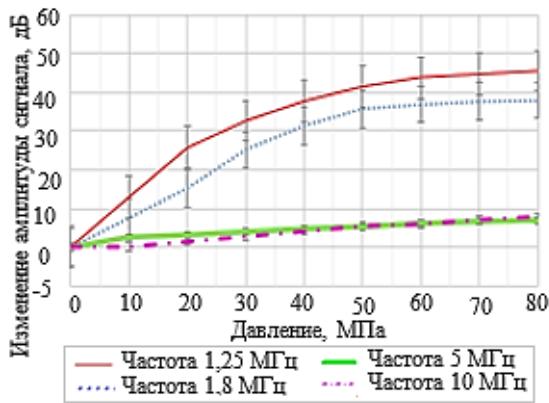


Рис. 6. Нормированное изменение амплитуды принятого сигнала на разных частотах при наличии прокладки из паронита между пластинами

По рис. 6 видно, что с увеличением контактного давления наблюдается усиление сигнала. Амплитуда растет и достигает насыщения, при этом максимальное

увеличение амплитуды наблюдается на частоте 1,25 МГц и составляет 45 дБ. С увеличением частоты происходит резкое снижение усиления сигнала, т.к. слоистая структура паронита препятствует прохождению волн высокой частоты из первой стальной пластины во вторую. На частотах 5 и 10 МГц усиление составляет от 5 до 10 дБ.

Таким образом, проведением эксперимента подтверждается правильность теоретических расчетов: графики изменяются схожим образом и в обоих случаях наблюдается значительное усиление сигнала.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность применения акустического метода для контроля ослабления контакта элементов фланцевого соединения с паронитовой прокладкой.

Полученные теоретические результаты проверены экспериментально теневым методом акустического контроля. Эксперименты показали, что теневым методом акустического контроля возможно определять ослабление контакта во фланцевом соединении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Schoenberg M. Elastic waves behavior across linear slip interfaces/ J. Acoust. Soc. Amer., 1980, vol. 68, N5, p. 1516-1521.
- [2] Аббакумов К.Е., И Б.Ч. Модернизация граничных условий при оценке рассеивающих свойств микрошероховатой границы раздела твердых сред // Электронная библиотека Белорусско-Российского университета, 2017, с. 94-100.
- [3] Аббакумов К.Е., Вагин А.В. Волновые процессы в слоистой микронеоднородной среде с неоднородными граничными условиями // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. №5, с. 12-18.
- [4] Аббакумов К.Е., Коновалов Р.С. Распространение акустических волн Стоунли в области границы твердых полупространств при нарушенном акустическом контакте // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007, с. 3-7.
- [5] Kendal K and Tabor D. An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces. ProcR Soc Ser A 1971; 323: 321–340.
- [6] Marshall M.B., Lewis R., Howard T. and Brunskill H., Ultrasonic measurement of self-loosening in bolted joints // Proc IMechE Part C:J Mechanical Engineering Science226(7) 1869–1884.
- [7] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.