

# Оценка возможности контроля болтового соединения крышек сосудов, с помощью ультразвуковых волн

А. В. Теплякова, А. В. Костерина

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

smaest@mail.ru, Anna.VKosterina@gmail.com

**Аннотация.** В работе исследован акустический метод контроля крепления крышек сосудов, основанный на изменении амплитуды сигнала при отражении и прохождении ультразвуковых волн через границу раздела сред. Для этого было смоделировано изменение коэффициентов отражения и прохождения при изменении контактного давления и экспериментально измерено изменение амплитуды ультразвукового сигнала теневым и эхо-методом.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль; коэффициент отражения; коэффициент прохождения, контактное давление.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности объектов промышленности является актуальной задачей, требующей разработки новых и совершенствования существующих методов неразрушающего контроля качества металлических конструкций, связанной с изменением механических свойств и деградацией структуры материала в зависимости от характера внешнего воздействия.

Аварии на оборудовании бывают связаны и с разрушением конструктивных элементов, например, элементов крепления крышки сосуда – шпилек и болтов. Повреждения могут возникнуть из-за кратковременного воздействия больших усилий, достижения пределов прочности и текучести. Также сосуды часто бывают подвержены сочетанию стационарных, нестационарных, случайных и ударных вибрационных процессов с широким спектром и высокими уровнями вибрации, под действием которых возможно самопроизвольное отвинчивание элементов крепежа.

Деформация, разрушение и откручивание болтов влекут за собой нарушение плотности контакта между крышкой сосуда и его корпусом, что, в конце концов, может привести к разрушению оборудования, особенно если объект работает под большим давлением.

Для предотвращения аварий существует множество способов контроля состояния элементов крепежа и ослабления сцепления, основанных на оценке уменьшения крутящего момента, приложенного к каждому отдельному болту с помощью специальных ключей [1], акустические методы, позволяющие измерить удлинение болтов с помощью ультразвуковых волн, метод акустической тензометрии [2] и др.

Однако большинство известных методов подходят только для измерения во время монтажа оборудования, а

при использовании в режиме непрерывного сканирования имеют ряд ограничений. Существующие способы требуют проведения высокоточных измерений, т. к. на результат сильное влияние оказывают внешние факторы. Кроме того, вышеперечисленные методы необходимо использовать для каждого болта по отдельности, что усложняет их реализацию и делает экономически невыгодными.

В данной работе будет предложен акустический метод контроля ослабления крепежа на крышках сосудов, основанный на изменении амплитуды сигнала при отражении и прохождении ультразвуковых волн через границу раздела сред.

Метод предполагает установку датчиков непосредственно на поверхность металла крышки, исключая необходимость контролировать каждый отдельный болт. Следовательно, для осуществления измерений потребуются гораздо меньше преобразователей, что упрощает реализацию метода и снижает его стоимость по сравнению с уже известными методами. Датчики будут работать в режиме непрерывного сканирования, и с помощью ультразвука будет получена информация о силе прижатия друг к другу скрепляемых деталей, что в реальных условиях в случае неисправности элементов крепежа позволит вовремя принять необходимые меры.

## II. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ПРИ НАРУШЕНИИ КАЧЕСТВА КОНТАКТА

Все реальные поверхности являются шероховатыми, т. е. в микромасштабе они состоят из множества крошечных неровностей в виде выступов и впадин. На рис. 1а показаны две соприкасающиеся поверхности. Контакт происходит на вершинах неровностей, вокруг которых расположены воздушные зазоры.

Когда ультразвуковая волна падает на границу раздела двух сред, часть энергии проходит во второе тело через точки соприкосновения неровностей, а часть отражается обратно от полостей, заполненных воздухом (рис. 1б). Когда длина волны ультразвука значительно больше, чем размер воздушных зазоров, граница раздела ведет себя как отражатель.

Кендалл К. и Табор Д. [3] исследовали этот случай и сравнили реакцию границы с пружиной, при этом каждое соединение рассматривалось как отдельная пружина.

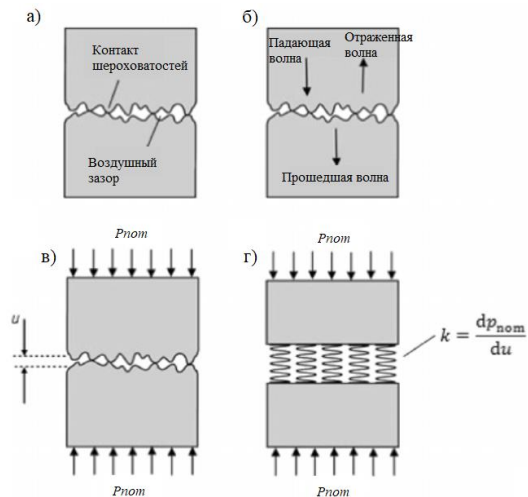


Рис. 1. Граница раздела двух шероховатых сред: стыки неровностей (а), прохождение и отражение ультразвука (б), приложенное к поверхностям давление (в), модель пружины (г)

Жесткость  $K$ , выраженная на единицу площади, определяется как изменение номинального контактного давления  $P_{nom}$ , необходимое для того, чтобы вызвать единичное сближение средних линий поверхностей:  $K = dP_{nom}/du$ , где  $u$  – расстояние между средними линиями шероховатости двух поверхностей. Схематическое изображение пружинной модели представлено на рис. 1в и 1г. Коэффициент отражения был связан с межфазной жесткостью, и для случая контакта двух одинаковых материалов выглядит следующим образом:

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

где  $\omega$  – угловая частота ультразвуковой волны, а  $z$  – акустический импеданс (произведение скорости волны и плотности материала) через границу раздела сред.

Дринкуотер Б.В., Дуайер-Джойс Р.С. и Коули П.А. [4] исследовали границы применимости пружинной модели и установили, что этот метод может быть успешно применен к данным ультразвукового отражения на частотах до 50 МГц, и что параметр межфазной жесткости сильно зависит от приложенной поверхностной нагрузки. По мере увеличения давления множество контактов, вызванных шероховатостью, деформируются, и поверхности более плотно прилегают друг к другу. По мере сближения пластин образуются новые контакты, что вызывает повышение межфазной жесткости. Было также замечено, что межфазная жесткость имеет частично линейный характер и изменяется от 0, при отсутствии контакта, до бесконечности, при полном соприкосновении поверхностей. Коэффициент отражения при этом изменяется от 1 до 0.

Нормированная зависимость амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела сред, полученная по формуле (1), от приложенной нагрузки представлена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, коэффициент отражения сильно зависит от жесткости сцепления двух поверхностей, т. е.

его изменение может указывать на нарушение контакта и ослабление болтового соединения.

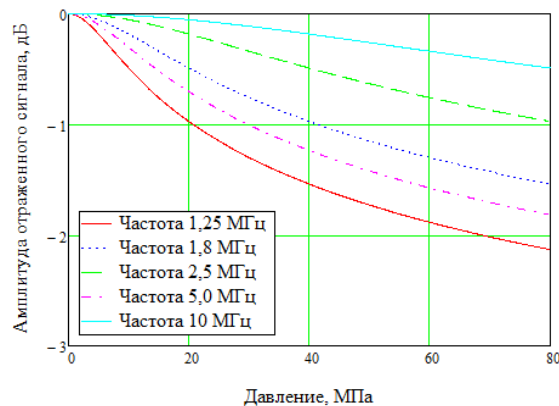


Рис. 2. Изменение амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела, на различных частотах при увеличении давления на поверхности

При состоянии «свободной» границы и разделении двух поверхностей происходит полное отражение ультразвука от поверхности раздела сред. Следовательно, через границу двух тел звуковая волна не проходит и коэффициент отражения равен 1 и амплитуда отраженного сигнала максимальна.

При наличии внешней нагрузки происходит резкое увеличение количества микроконтактов, через которые ультразвук передается дальше, во вторую среду. С увеличением давления площадь контакта становится все больше, часть энергии волны проходит во вторую среду, и амплитуда отраженной волны уменьшается.

Также можно отметить, что чем ниже частота, тем больше изменение коэффициента отражения и тем сильнее уменьшение отраженного сигнала. Но даже при достаточно большом давлении (80 Мпа) максимальное изменение амплитуды отраженного сигнала не велико и составляет около 2 дБ. Однако в этом диапазоне давлений падение сигнала близко к линейному, и может служить критерием для оценки степени сжатия поверхностей.

Изменение коэффициента отражения влечет за собой изменение коэффициента прохождения. Согласно закону сохранения энергии, коэффициенты отражения и прохождения ультразвука через границу раздела сред связаны выражением:  $R^2 + D^2 = 1$ , где  $D$  – коэффициент прохождения. Нормированная зависимость амплитуды прошедшего сигнала от контактного давления показана на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что чем сильнее сжаты друг с другом две поверхности, тем большая энергия ультразвуковой волны проходит через границу раздела сред, не отражаясь от нее. С увеличением давления сжатия увеличивается площадь поверхности контакта, и волна беспрепятственно проходит из первой среды во вторую. Как видно из рис. 3, амплитуда прошедшего сигнала нелинейно зависит от приложенного давления и имеет насыщение. Чем выше частота ультразвука, тем дольше кривая зависимости амплитуды прошедшего сигнала не выходит в зону насыщения. На низких частотах изменение амплитуды происходит быстрее, но также быстрее кривая входит в зону насыщения и амплитуда

прошедшего сигнала перестает изменяться при увеличении контактного давления.

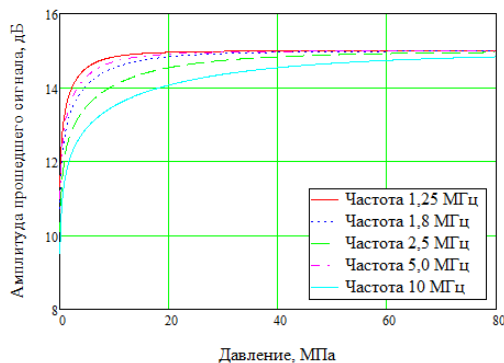


Рис. 3. Изменение амплитуды прошедшего сигнала разных частот при увеличении контактного давления

При использовании разных методов ультразвукового контроля данное явление может быть выражено в большей или меньшей степени. Определение оптимального метода по информативности и применимости в реальных условиях предстоит выполнить экспериментальным путем.

### III. ЭХО-МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Эхо-метод ультразвукового контроля основан на посылке в изделие коротких ультразвуковых сигналов и регистрации эхо-сигналов, отраженных от выявляемых несплошностей.

Так как данное исследование направлено на определение применимости ультразвукового метода для контроля крышек сосудов, следует рассмотреть материалы, используемые на реальных объектах. В качестве объекта контроля взяты две пластины из стали марки Ст3 нижняя толщиной 15 мм и верхняя толщиной 27 мм. Пластины прижимались друг к другу с помощью прессы с максимальным давлением 80 МПа. На верхней пластине установлен преобразователь, выступающий в качестве излучателя и приемника импульсов (рис. 4).

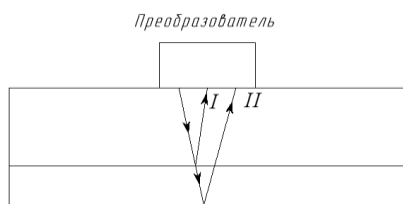


Рис. 4. Преобразователь и объект контроля для прозвучивания эхо-методом

Амплитуда импульса, отраженного от границы раздела (I), и импульса, отраженного от нижней грани второй пластины (II), измерялась с помощью дефектоскопа «Пеленг» УДЗ-204. Данная модель дефектоскопа была выбрана для более точного измерения амплитуды принятого сигнала, т.к. позволяет определить значение амплитуды с точностью до сотых децибел. Изменение амплитуды сигналов фиксировалось на разных частотах. Результаты экспериментального измерения амплитуды для первого сигнала, отраженного от границы раздела пластин, представлены на рис. 5.

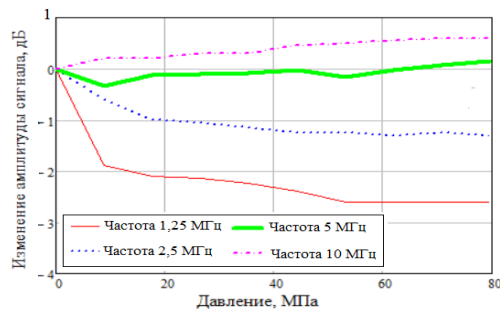


Рис. 5. Изменение амплитуды первого сигнала на разных частотах

Как видно из рис. 5, амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела ожидаемо снижается. Максимальное ослабление амплитуды наблюдается на низких частотах: на 1,25 МГц оно достигает 2,5 дБ, на 2,5 МГц около 1,2 дБ. На высоких частотах ослабления сигнала практически не наблюдается. Полученные результаты хорошо коррелируют с теоретическими зависимостями.

Еще одно измерение амплитуды отраженного сигнала было проведено после нанесения на поверхность соприкосновения пластин контактной жидкости, имитирующей герметизирующий слой, который часто используется на реальных объектах. Изменение амплитуды сигнала, отраженного от границы раздела пластин, при наличии контактной жидкости представлено на рис. 6.

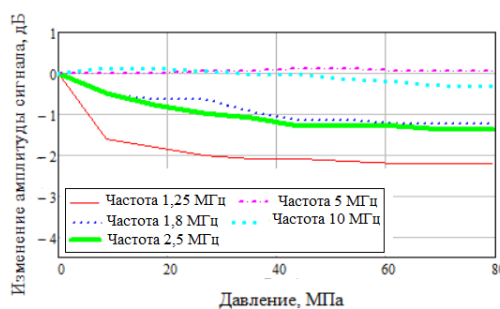


Рис. 6. Изменение амплитуды отраженного сигнала на разных частотах при наличии контактной жидкости между пластинами

По рис. 6 видно, что так же как и в первом случае, на низких частотах ослабление амплитуды сильнее, чем на более высоких. На частоте 1,25 МГц снижение амплитуды составило чуть больше 2 дБ, на частоте 1,8 МГц и 2,5 МГц около 1,5 дБ. На высоких частотах амплитуда сигнала изменилась в пределах погрешности.

В обоих случаях амплитуда импульсов снижается до определенного уровня и достигает насыщения. При этом, чем ниже частота, тем более резко происходит ослабление сигнала при меньших давлениях.

На высоких частотах ослабления сигнала почти не наблюдается, т.к. обеспеченного давления прижатия стальных пластин друг к другу в ходе проведения эксперимента недостаточно для прохождения ультразвуковых волн высокой частоты во вторую пластину.

Наличие слоя контактной жидкости между пластинами особого влияния на амплитуду первого отраженного сигнала на данных давлениях не оказывает.

Так же в ходе эксперимента была измерена амплитуда эхо-сигнала, отраженного от нижней границы второй пластины. При отсутствии контактной жидкости между пластинами потеря энергии на отражение

слишком велика и отраженный сигнал не фиксировался над уровнем шумов. Результаты измерения амплитуды второго сигнала с использованием контактной жидкости между пластинами между пластинами представлены на рис. 7.

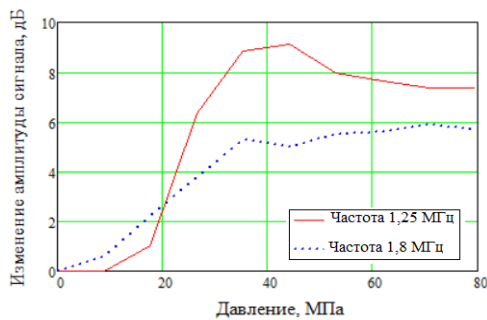


Рис. 7. Изменение амплитуды второго сигнала на разных частотах при наличии контактной жидкости между пластинами

Второй сигнал был зафиксирован только на низких частотах, т.к. обеспеченного усилия сжатия недостаточно для двукратного прохождения ультразвуковой волны через границу раздела сред.

Таким образом, по изменению амплитуды первого и второго сигнала на низких частотах возможно определить ослабление контакта двух поверхностей.

#### IV. ТЕНЕВОЙ МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Теневой метод ультразвукового контроля основан на фиксации уменьшения сигнала, проходящего от излучателя к приемнику. В теневом варианте используются два преобразователя: один выступает в качестве излучателя сигнала, второй – в качестве приемника (рис. 8).

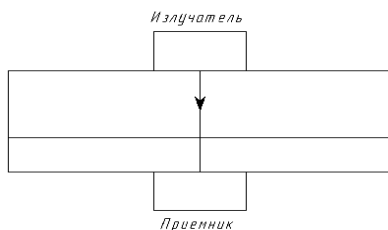


Рис. 8. Преобразователь и объект контроля для прозвучивания теневым методом

Объектом контроля являлись те же пластины, что и при контроле эхо-методом.

Измерения амплитуды проводились сначала на сухих поверхностях, затем с использованием контактной жидкости, которая имитировала слой герметика между двумя пластинами. Результаты экспериментов показаны на рис. 9–10.

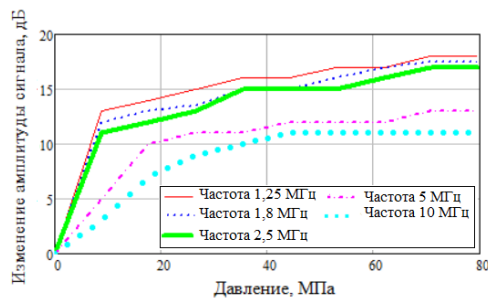


Рис. 9. Изменение амплитуды принятого сигнала на разных частотах

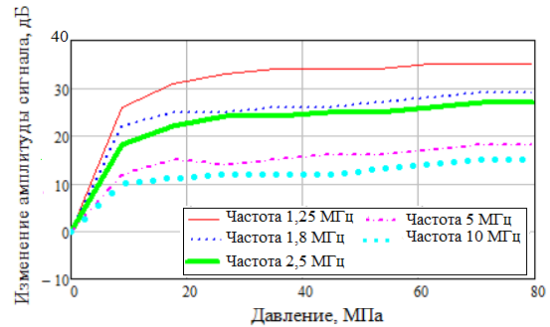


Рис. 10. Изменение амплитуды принятого сигнала на разных частотах при наличии контактной жидкости между пластинами

Как видно из рис. 9 и 10, с увеличением частоты происходит более плавное увеличение амплитуды, при этом амплитуда достигает насыщения на всех частотах.

В случае измерений на сухих поверхностях максимальное усиление сигнала наблюдается на низкой частоте. Оно одинаково для 1,25 МГц, 1,8 МГц, 2,5 МГц и составляет 17 дБ. Одинакова и крутизна графиков изменения амплитуды.

С использованием контактной жидкости становятся заметны различия в изменении амплитуды на разных частотах. Максимальное усиление сигнала происходит на частоте 1,25 МГц и составляет 35 дБ. С увеличением частоты увеличение амплитуды снижается, однако остается на уровне 10 дБ и более, что выше, чем амплитуда импульсов при прозвучивании эхо-методом и позволяет точнее определять ослабление контакта.

Сравнивая с теоретическими результатами можно сделать вывод, что характер изменения амплитуды прошедшего сигнала весьма схож, что подтверждает правильность теоретических расчетов.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование применимости ультразвуковых методов для непрерывного контроля силы сцепления фланцевого соединения.

Расчитаны теоретические зависимости изменения амплитуды принятого сигнала при изменении контактного давления. Полученные результаты проверены экспериментально. Наблюдается четкая корреляция между теоретическими и экспериментальными значениями, что подтверждает применимость данной теории и возможность использования данного метода анализа силы сцепления поверхностей на практике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Onishi T, Mizutani Y, Mayuzumi M. Plastic region bolt tightening controlled by acoustic emission monitoring. Journal Acoustic Emission, 2003, pp. 285-291.
- [2] Рыльский В.Е. Покладов А.А. Бобренко В.М. Сырбу В.Н. Сорокин А.В. Чуднов И.В. Акустическая тензометрия как приложение к УД4-Т НУ-01//В мире неразрушающего контроля 3(33), 2006 г. С. 49-52.
- [3] Kendal K and Tabor D. An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces. Proc R Soc Ser A 1971; pp. 321-340
- [4] Drinkwater BW, Dwyer-Joyce RS and Cawley P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface. Proc R Soc Ser A 1996; 451: pp. 2613-2628.