

УДК 534.222:620.179.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОСЛАБЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

© Надежда Евгеньевна Никитина

*Институт проблем машиностроения Российской академии наук,
Нижний Новгород, Россия
wvs-dynamo@mail.ru*

Аннотация. Исследовано влияние дифракционного расхождения ультразвукового пучка на результаты акустических измерений. Показано, что в проведенных экспериментах дифракционное расхождение является основным источником ошибки определения величины коэффициента затухания ультразвука в материале.

Ключевые слова: импульс, ультразвук, амплитуда, измерение.

RESEARCH THE CAUSES OF AMPLITUDE ATTENUATION PULSE IN ULTRASONIC MEASUREMENTS

© N. Ye. Nikitina

*Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia
wvs-dynamo@mail.ru*

Abstract. The influence of the diffraction divergence of the ultrasonic beam at the results of acoustic measurements. It was shown in these experiments that the diffraction divergence is the main source of error in determining the value of the ultrasonic attenuation coefficient of the material.

Keywords: pulse, ultrasonic, amplitude, measurement.

Введение. Основы практического применения ультразвука заложены фундаментальными исследованиями С.Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии [1]. Проведя многочисленные опыты, он в 1927 году сделал фундаментальное открытие: установил способность ультразвуковых (УЗ) волн распространяться в металлах на большие расстояния без заметного поглощения. С.Я. Соколов создал первый промышленный образец аппарата для обнаружения дефектов в металлических изделиях и заготовках, назвав его ультразвуковым дефектоскопом. Он установил, что рассеяние ультразвука в металле сильно зависит от величины средних размеров кристаллитов (зерен) металла [2].

В настоящее время ультразвуковые исследования твёрдых тел находят широкое применение на практике. Свойство ультразвука распространяться в однородной среде направленно, а на границе раздела двух сред (например, металл-воздух) почти полностью отражаться, позволило применить УЗ колебания для выявления дефектов в деталях и элементах конструкций без их разрушения.

Существует два основных метода ультразвуковой дефектоскопии: резонансный и импульсный. Импульсный метод работает «на прохождение» или «на отражение». Во втором случае он называется эхо-импульсный метод, или просто эхо-метод. Эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии основан на явлении отражения ультразвуковых волн от поверхности детали, противоположной той, на которой возбуждается зондирующий импульс.

Аппаратурная реализация метода основана на следующих принципах. Высокочастотный генератор вырабатывает опорный импульс, возбуждающий излучатель (электромеханический преобразователь). Посланный излучателем импульс, отразившись, возвращается обратно к преобразователю, который в это время работает на прием. С преобразователя сигнал поступает на усилитель, а затем на отклоняющие пластины осциллографа. Для получения на экране изображения импульса возбуждения и отраженных импульсов предусмотрен генератор развертки. Работой высокочастотного генератора управляет синхронизатор, который через определенный промежуток времени снова формирует высокочастотный импульс, и развертка осциллографа снова запускается.

Эхо-импульсный метод позволяет исследовать изделия при одностороннем доступе к ним. Определив по шкале экрана осциллографа время прихода эхо-импульса от дефекта и зная скорость распространения волны выбранного для контроля типа (продольной или сдвиговой), можно определить, на какой глубине находится дефект. Если скорость распространения волны неизвестна, ее можно найти, зная толщину материала и время прихода эхо-импульса от противоположной датчику поверхности изделия (так называемого «донного сигнала»).

Чтобы оценить величину дефекта, определяют ослабление посланного в материал сигнала. По ослаблению зондирующего материал сигнала оценивают не только размер дефекта, но и затухание ультразвука в толще материала. Затухание ультразвука, пожалуй, это первый из акустических параметров, который стал использоваться для изучения внутренней структуры твердых тел. В настоящее время затухание ультразвуковых волн является важнейшей информативной характеристикой неразрушающих методов контроля и диагностики конструкционных материалов.

Исследования, проведенные Л.Г. Меркуловым в лаборатории и под руководством С.Я. Соколова, позволили установить количественную связь коэффициента затухания ультразвука со средней величиной зерен (кристаллитов) в чистых металлах [3]. Затем Меркулов проделал эксперименты, которые показали, что ультразвук может успешно применяться и для исследования структуры сталей. Он экспериментально доказал возможность определения величины зерна в стали (в баллах) по значению коэффициента затухания ультразвука в ней [4].

Для упругих волн среда их распространения может быть охарактеризована двумя основными свойствами [5]: наличием масштабных параметров, связанных с размерами кристаллов, зерен, включений и других особенностей структуры; наличием и «резкостью» границ между составляющими структуры.

По сравнению с размерами структурных составляющих металлов и сплавов ультразвуковые волны довольно «длинные». Существование в среде размерного параметра, много меньше длины волны, приведет к слабой высокочастотной дисперсии волн и к их рассеянию преимущественно релеевского типа. На скорость и затухание волн также повлияет количество и «качество» существующих в материале внутренних границ. Сдвиговые волны должны быть более чувствительны к величине размерного параметра в направлении поляризации волны и наличию границ, перпендикулярных этому направлению [5].

Большинство ультразвуковых методов контроля основано на полученных предварительно «тарировочных» зависимостях затухания ультразвука от тех или иных характеристик материала [6] (если эти зависимости имеют монотонный характер, подобно тем, которые были найдены Меркуловым). О величине коэффициента затухания УЗ в среде без макродефектов судят по уменьшению амплитуды УЗ импульсов при увеличении расстояния от излучателя. На это уменьшение, кроме непосредственно поглощения или рассеяния упругих волн в материале, могут оказывать

влияние гладкость отражающих поверхностей, потери энергии в контактном слое, дифракционное расхождение ультразвукового пучка и, возможно, другие факторы. В зависимости от свойств исследуемой детали и используемой измерительной установки те или другие факторы, влияющие на величину информативного параметра, будут иметь преобладающее значение.

В нашей работе изучается влияние дифракционного расхождения ультразвукового пучка на результаты проводимых акустических измерений. Для условий наших экспериментов оно является основным источником ошибки определения величины коэффициента затухания УЗ в материале. В статье [3] Л.Г. Меркулов указывает, что на низких частотах ультразвука (несколько МГц) приходилось считаться с дифракционным расхождением пучка упругих волн. Однако, как это конкретно делалось, в работе не указано.

Схема проведения эксперимента. Наша экспериментальная установка специально не предназначена для определения величины затухания ультразвука, акустический стенд предназначен для прецизионного измерения временных интервалов, характеризующих распространение и искажение акустических импульсов в материале образца или элемента конструкции. Целью наших экспериментов было исследование совместного влияния структурных особенностей образцов стального проката и расхождения ультразвукового пучка на величину ослабления амплитуды ультразвуковых импульсов в них. В конечном счете, следовало выяснить, насколько пригодна имеющаяся у нас экспериментальная установка для исследования акустических свойств материала, связанных с наличием микроструктуры, по результатам определения коэффициента затухания ультразвука в нем.

В состав стенда для акустических измерений входят:

- Источник временных сдвигов (ИВС) прибора И2-26;
- Осциллограф С1-98;
- Блок формирования и усиления импульсов (БФУ);
- Блок питания БФУ Б5-8.

Экспериментальная установка работает следующим образом. Опорный видеоимпульс с ИВС поступает на вход калиброванной линии задержки ИВС прибора И2-26, а также запускает генератор импульсов БФУ, который вырабатывает короткий мощный видеоимпульс для «ударного» возбуждения пьезопреобразователя (датчика). Пьезопластинка преобразователя «звонит на резонансной частоте», и её колебания, задемпфированные механическим образом, возбуждают в исследуемом материале импульсы упругих волн, многократно отражающиеся от противоположной границы образца. Зондирующие материал ультразвуковые импульсы имеют плавную огибающую и эффективную длительность (на уровне 0,6–0,7 максимальной амплитуды), равную 3–4 периодам основной частоты. Соответствующие им электрические сигналы поступают на амплитудный ограничитель БФУ, реализованный диодной схемой и служащий для уменьшения мощного возбуждающего импульса в приёмном тракте установки. Затем они идут на усилитель БФУ для усиления эхо-импульсов, затем на вход индикатора (осциллографа), синхронизация которого осуществляется опорным импульсом, задержанным в линии задержки источника временных сдвигов прибора И2-26.

Таким образом, в экспериментальной установке использованы серийные приборы – блок ИВС измерителя временных интервалов И2-26, осциллограф С1-98, блок питания Б5-8. Блок формирования и усиления импульсов (БФУ) реализует функции создания мощного видеоимпульса для возбуждения датчика, а также функции ограничения его амплитуды на экране осциллографа, и, наоборот, увеличения амплитуды эхо-импульсов. Экспериментальная установка может быть использована для выявления таких слабых эффектов, как зависимость скоростей упругих волн от деформаций (напряжений) в твердых

телах [5]. В экспериментах мы использовали датчики продольных и сдвиговых волн с резонансной частотой 5 МГц и размерами пьезопластин 8x8 мм.

Для наших исследований мы взяли образец высокопрочной стали (мартенсит), вырезанный из прокатного листа, и термообработанный образец той же стали. Образцы стального проката имеют практически зеркальные отражающие поверхности и толщину 35,8 мм и для отожженного образца 29,3 мм.

Для определения коэффициента затухания упругой волны применяли метод оценки уменьшения амплитуды многократно отраженных импульсов. Для этого по шкале на экране осциллографа измеряли амплитуды отраженных импульсов и сравнивали их между собой. Проводя такие измерения, считают, что весь тракт усиления сигнала имеет линейную амплитудную характеристику. В нашей установке такое предположение выполняется. Представляем результаты акустических измерений.

Результаты измерений в образце стального проката. Максимальные амплитуды импульсов мы оценивали по вертикальной шкале осциллографа, как положительное, так и отрицательное ее значение. За информативный параметр принимали величину размаха максимальной амплитуды эхо-импульса, начиная с первого из них. Проводили измерения для трех типов упругих волн. На рис. 1 представлены картины отраженных импульсов для волн параллельной (\parallel) и перпендикулярной (\perp) прокату поляризации, а также для продольных волн. Значение размаха амплитуды (в условных единицах) соответствует количеству клеток, занимаемых эхо-импульсом.

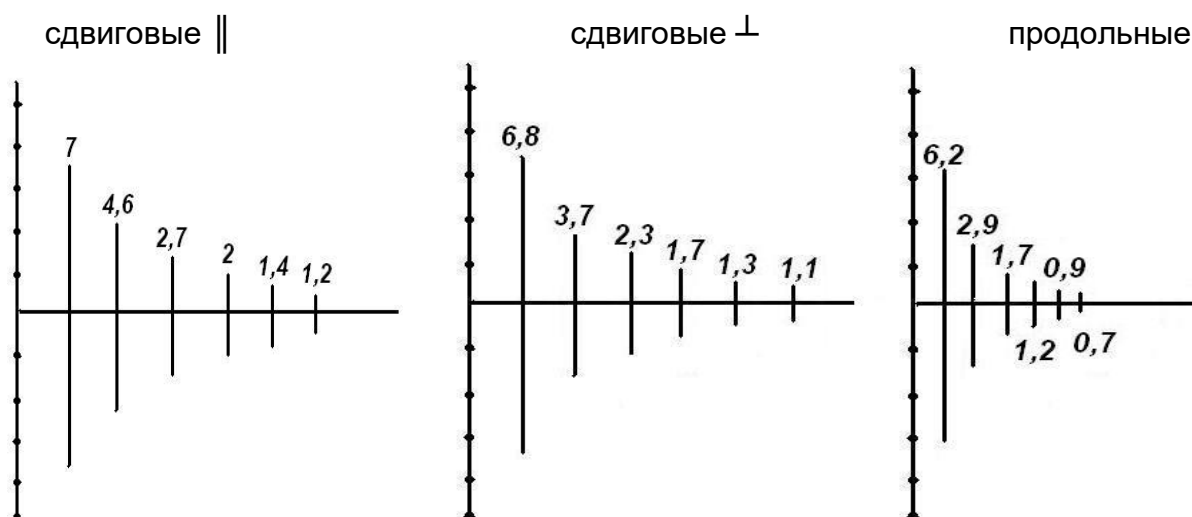


Рис. 1. Ослабление максимальной амплитуды импульса с несущей частотой 5 МГц при распространении в образце проката.

В соответствии с измеренными значениями максимальной амплитуды эхо-импульсов можно количественно оценивать величину ослабления импульса в образцах. Если предположить, что это ослабление полностью определяется затуханием упругой волны в материале образца, то амплитуда сигнала должна с расстоянием уменьшаться по экспоненциальному закону. В этом случае значение коэффициента затухания упругой волны находится по формуле:

$$\alpha = \frac{-\ln \frac{A_2}{A_1}}{x} = \frac{\ln \frac{A_1}{A_2}}{x},$$

где x – двойная толщина, равная 71,6 мм для этого образца, 1 и 2 – номера отраженных импульсов (или следующих за ними).

Проверим это предположение, используя результаты измерений на образце. Ниже приведены данные расчетов «коэффициента затухания» ультразвука (в единицах нп/м) на основе сравнения амплитуд соседних эхо-импульсов.

Таблица 1.
Результаты определения коэффициента затухания упругих волн, образец проката

№№	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
α , сдвиговые \parallel	5,9	7,4	4,2	5,0	2,2
α , сдвиговые \perp	8,5	6,6	4,2	3,8	2,3
α , продольные	10,6	7,5	4,9	4,0	3,5

Судя по приведенным здесь данным, экспоненциальной зависимости амплитуды сигнала от пройденного им расстояния не наблюдается. Зависимости даже не все монотонные, что обусловлено интерференцией упругих волн в материале. Наблюдается уменьшение искомой величины при переходе к дальним импульсам.

Скорее всего, это результат влияния расхождения ультразвукового пучка на ослабление сигнала. Там, где пучок еще не сильно расплылся и не приобрел плавную форму (видимо, для 1-3 эхо-импульсов), ослабление амплитуды импульса самое большое. Степень расхождения ультразвукового пучка во многом определяется отношением размера датчика к длине излучаемой волны – чем больше это отношение, тем меньше расхождение пучка. Оценим параметры и условия распространения ультразвукового пучка для наших сигналов.

Размер ближней зоны излучателя вычисляется по формуле $d^2/4\lambda$. В нашем случае поперечный размер квадратного датчика $d=8$ мм, длина сдвиговой волны на частоте 5 МГц $\lambda=0,6$ мм, а продольной волны 1 мм. Тогда размер ближней зоны для сдвиговых волн будет $\dots 64/2,4= 27$ мм, а для продольных волн $64/4= 16$ мм. Первый отраженный импульс, от которого мы ведем отсчет всех акустических параметров, уже прошел удвоенную толщину материала, т.е. 71,6 мм. Значит, при проведении акустических измерений мы находимся в дальней зоне, где ослабление сигнала обратно пропорционально пройденному им расстоянию.

Оценим расстояние в дальней зоне, на котором ультразвуковой пучок разойдется в два раза, по формуле d^2/λ . Для сдвиговых волн это расстояние будет $64/0,6= 107$ мм, а для продольных 64 мм. Т.е. ультразвуковой пучок сдвиговых волн расходится в два раза примерно посередине между 1 и 2 эхо-импульсами, а пучок продольных волн – там, где находится первый отраженный импульс.

Наши оценки говорят о том, что расхождение ультразвукового пучка играет существенную роль в ослаблении максимальной амплитуды ультразвукового импульса. Данные приведенных здесь таблиц указывают на ключевую роль этого эффекта в ослаблении амплитуды первых двух-трех импульсов, далее УЗ пучок приобретает более плавную форму и расходимость уменьшается. Для дальних импульсов увеличивается роль влияния микроструктуры материала на ослабление сигнала, что изучалось Меркуловым и другими авторами, преимущественно на более высоких частотах.

Результаты измерений в термообработанном образце. Проведены акустические измерения для трех типов упругих волн в отожженном образце. По вертикальной шкале осциллографа находили максимальные амплитуды эхо-импульсов и сравнивали их между собой. На рис. 2 представлены картины отраженных импульсов для волн параллельной (\parallel) и перпендикулярной (\perp) прокату поляризации, а также для продольных волн. Значение размаха амплитуды (в условных единицах) соответствует количеству клеток, занимаемых эхо-импульсом.

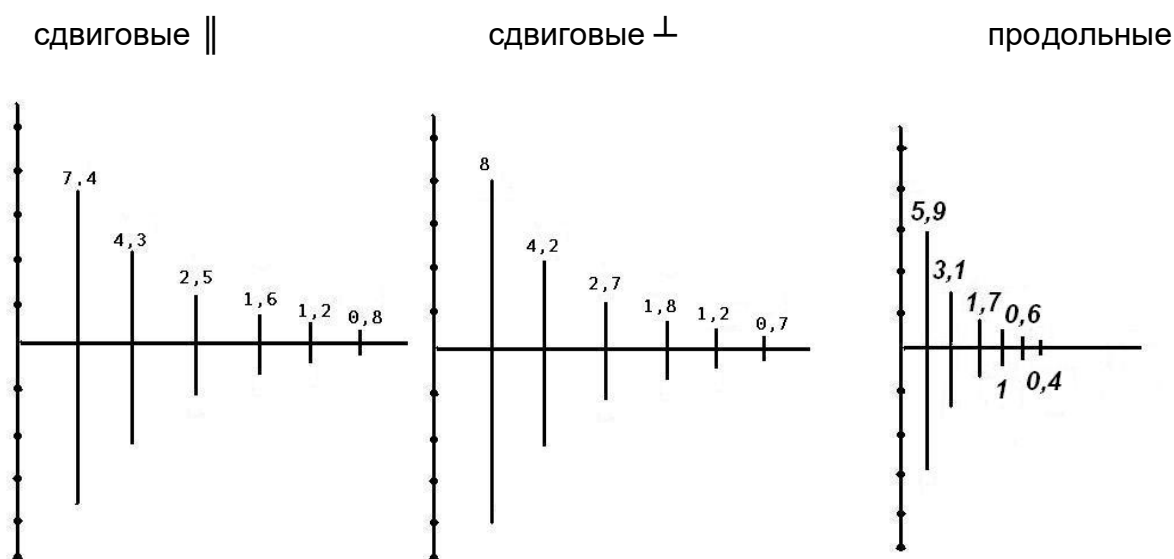


Рис. 2. Ослабление максимальной амплитуды импульса с несущей частотой 5 МГц при распространении в отожженном образце.

В соответствии с измеренными значениями максимальной амплитуды эхо-импульсов оценивали величину ослабления импульса в образце. Проведена проверка экспоненциального закона уменьшения амплитуды сигнала с расстоянием от излучателя. Коэффициент затухания определяли по формуле, аналогичной той, которая применялась для неотожженного образца

$$\alpha = \frac{-\ln \frac{A_n}{A_{n-1}}}{x} = \frac{\ln \frac{A_{n-1}}{A_n}}{x},$$

где n – номер отраженного импульса, x – двойная толщина образца, равная 58,6 мм.

Ниже приведены данные расчетов «коэффициента затухания» ультразвука (в нп/м) на основе сравнения амплитуд соседних эхо-импульсов.

Таблица 2.
Результаты определения коэффициента затухания упругих волн, отожженный образец

№№	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
α , сдвиговые	9,3	9,3	7,6	4,9	6,9
α , сдвиговые ⊥	11,0	7,5	6,9	6,9	9,2
α , продольные	11,0	10,3	9,1	8,7	6,9

Судя по результатам, приведенным в таблице, зависимости амплитуды сигнала от пройденного им расстояния здесь более похожи на экспоненциальные. Это говорит о том, что затухание упругих волн в материале здесь играет большую роль в ослаблении сигнала,

чем в ранее описанном эксперименте. Роль расхождения ультразвукового пучка, таким образом, становится меньшей в общем значении ослабления амплитуды эхо-импульса.

Согласно теоретическим представлениям и данным Л.Г. Меркулова [4] коэффициент затухания упругих волн в отожженных образцах должен быть больше, поскольку размеры структурных составляющих при термообработке обычно увеличиваются. По-видимому, это явление мы и наблюдаем, наложенное на эффект расхождения ультразвукового пучка, на которое не должна влиять термообработка материала.

Размер ближней зоны излучателя вычисляется по формуле $d^2/4\lambda$. В нашем случае поперечный размер квадратного датчика $d=8$ мм, длина сдвиговой волны на частоте 5 МГц $\lambda=0,6$ мм, а продольной волны 1 мм. Как мы определили ранее, ближняя зона для сдвиговых волн заканчивается на расстоянии 27 мм от излучателя, для продольных волн это расстояние составляет 16 мм. Первый отраженный импульс, от которого мы ведем отсчет всех акустических параметров, прошел удвоенную толщину материала 58,6 мм. Значит, при проведении акустических измерений мы также находимся в дальней зоне.

Расстояние в дальней зоне, на котором ультразвуковой пучок разойдется в два раза, составляет 107 мм для сдвиговых волн и 64 мм для продольных волн. Т.е. ультразвуковой пучок сдвиговых волн расходится в два раза примерно для второго эхо-импульса, а пучок продольных волн – примерно там, где находится первый отраженный импульс. Толщина отожженных образцов ненамного меньше, чем у образцов проката, поэтому эти оценки не сильно отличаются. Однако на картине отраженных импульсов расхождение ультразвукового пучка должно быть несколько менее заметно.

Конечно, судить о величине зерна даже термообработанных образцов на основе акустических измерений с помощью имеющейся у нас аппаратуры весьма затруднительно. Можно только найти отличия отожженных образцов проката от неотожженных. Конечно, путем сложных математических расчетов можно оценить влияние расхождения УЗ пучка на амплитуду эхо-импульсов, однако такой метод исследования микроструктуры материала вряд ли будет пригоден для практического применения.

Для оценки коэффициента затухания упругих волн, превышающего 10 Нп/м, можно использовать указанную ультразвуковую установку и датчики, практически пренебрегая влиянием расхождения ультразвукового пучка на результаты акустических измерений. Такие коэффициенты затухания на частотах 5-10 МГц характерны для чугуна, графита и некоторых менее качественных сталей, особенно термообработанных. Проведенная проверка экспоненциального закона уменьшения амплитуды сигнала с расстоянием от излучателя, аналогичная предпринятой нами, поможет выбрать те номера эхо-импульсов, которые наиболее верно позволят судить о величине коэффициента затухания продольных или сдвиговых упругих волн в исследуемом материале.

Список литературы

1. Соколов С.Я. Ультразвуковые методы изучения свойств закаленной стали и определения внутренних пороков металлических изделий // ЖТФ. 1941. Т. 2. С. 160-169.
2. Соколов С. Я. Поглощение ультразвуковых колебаний твердыми телами // Доклады АН СССР. 1948. Т. 59. № 5. С. 883-886.
3. Меркулов Л.Г. Исследование рассеяния ультразвука в металлах // ЖТФ. 1956. Т. 26. С. 64-75.
4. Меркулов Л.Г. Применение ультразвука для исследования структуры сталей // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 1386-1391.
5. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ. 2005. 208 с.
6. Ботаки А.А., Улянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение. 1983. 80 с.

Дата поступления статьи: 24 декабря 2015 года.