

УДК 534.21: 620.179.16

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МЕТАЛЛА

© Владимир Митрофанович Родюшкин, Елена Алексеевна Мотова

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия
vlkn2005@yandex.ru

Аннотация. В работе показана принципиальная возможность использования акустических эффектов для разработки технологии поиска и обнаружения нарушений структуры.

Ключевые слова: упругие волны, нелинейность, структура, неразрушающий контроль.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 г.г. по теме № 0035-2014-0402, № госрегистрации 01201458047 и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 19-08-00965-а, №18-08-00715-а).

METHODICAL BASES OF NONLINEAR ACOUSTIC METHODS OF ESTIMATES OF STRUCTURAL CHANGES OF METAL

© V.M. Rodyushkin, E. A. Motova

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia
vlkn2005@yandex.ru

Abstract. The paper shows the fundamental possibility of using acoustic effects to develop technology for finding and detecting structure violations.

Key word: elastic waves, nonlinearity, structure, non-destructive testing.

Acknowledgements. The work was carried out within the Russian state task for conducting fundamental scientific research for 2013-2020 on the topic No. 0035-2014-0402, state registration number 01201458047 and the work was supported by RFBR (projects 19-08-00965, 18-08-00715).

Акустические методы неразрушающего контроля, такие как, ультразвуковая дефектоскопия, акустические зондирование получают все большее распространение при оценке технического состояния конструкционных материалов.

Ультразвуковая дефектоскопия как один из методов неразрушающего контроля состояния материала, основанная на исследовании процесса распространения в контролируемом изделии ультразвуковых волн с частотой 0,5-25 МГц, используется достаточно давно [1].

Первый патент № 11371 на способ и устройство ультразвуковой дефектоскопии с приоритетом от 02 февраля 1928г. был выдан молодому ученому, впоследствии члену-корреспонденту АН СССР, профессору Ленинградского электротехнического института, Сергею Яковлевичу Соколову.

Ультразвуковая дефектоскопия, в классическом понимании, основана на эффектах линейной акустики, в частности на эффекте отражении волн от несплошностей (дефектов). Для обнаружения структурных изменений металла, когда физически существующей несплошности ещё нет, ультразвуковая дефектоскопия мало пригодна.

Акустическом зондирование заключается в возбуждении ультразвукового импульса и приеме его после прохождения через исследуемую среду. Упругая среда, как передающий зондирующий импульс от излучателя к приемнику элемент всей электромеханической схемы зондирования, несомненно, влияет на условия распространения волны в материале и вносит в сигнал свои изменения, обусловленные особенностями структуры. При соответствующей обработке сигнала формируется диагностический признак, чувствительный к структурным изменениям в металле [2].

1. Нелинейность металла. Несовершенства в структуре металла во много обуславливают его нелинейные свойства. Наряду с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия, приводящей к нелинейной связи между напряжением и деформацией, в поврежденном металле проявляется структурная нелинейность [3]. Эта нелинейность определяется надмолекулярной внутренней структурой твердого тела (дислокациями, микротрещинами, локальными внутренними напряжениями и т.д.) и может на 2-4 порядка превышать физическую нелинейность [4]. В связи с этим представляется перспективным рассмотреть возможность использования нелинейных акустических эффектов для контроля структурных изменений металла.

Нелинейность неповрежденных изотропных твердых сред, описывается в приближении квадратичной нелинейности уравнениями пяти константной теории упругости и определяется связью между компонентами тензоров напряжений σ и деформаций ϵ , где зависимость $\sigma = f(\epsilon)$ представляется в виде ряда, члены которого убывают по мере роста степени. Зависимость потенциальной энергии от расстояния между атомами позволяет пояснить физический механизм нелинейных акустических эффектов в твердых телах. При малых амплитудах смещения растяжения и сжатие одинаковы, т.к. дно потенциальной ямы можно аппроксимировать параболой. И состояние кристалла с достаточной точностью описывается линейным законом Гука:

$$\sigma = g^{\text{II}}\epsilon,$$

где g^{II} - линейный модуль упругости, то есть модуль упругости 2 порядка, называемый так в связи с тем, что получен из выражения для потенциальной энергии, содержащей только квадратичные члены по деформации.

Для больших амплитуд смещений сжатие и растяжение становятся неравноправными - зависимость потенциальной энергии от смещения атома уже не описывается параболой. В этом случае справедлив нелинейный закон Гука:

$$\sigma = g^{\text{II}}\epsilon + g^{\text{III}}\epsilon^2,$$

где g^{III} -нелинейный модуль упругости, то есть модуль упругости третьего порядка.

Нелинейность закона Гука приводит к зависимости фазовой скорости от деформации:

$$c = c_0 \left[1 + \frac{g^{III}}{g^{II}} \varepsilon \right]^{1/2}$$

Вследствие этого различные фазы волны имеют разную скорость, и форма волны по мере распространения изменяется. В пределе синусоидальная волна может вырождаться в пилообразную. Искажение формы волны приводит к изменению её спектра. Спектр волны обогащается гармониками, то есть нелинейность приводит к генерации гармоник в твердом теле. Если же в материале присутствуют две и больше волн, то они, взаимодействуя, порождают волны на новых комбинационных частотах [5].

Существует понятие геометрической нелинейности, которая обусловлена особенностями деформирования элементарного объема и характеризуется квадратичным членом выражении для деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial X_i \partial X_j} \right)$$

Существуют среды с дисперсией или с аномальной нелинейностью, к ним относятся твердые среды со сложной структурой, в которых кубические эффекты могут преобладать над квадратичными.

В работе [6] показано, что поры, полости обуславливают достаточно сильную нелинейность, в отличие от нелинейности неповрежденных, без полостей и пор, включений и т.д. изотропных твердых сред, описываемых в приближении квадратичной нелинейности уравнениями пятой константной теории упругости. Следовательно, измеряя параметр нелинейности можно получить информацию о концентрации полостей в среде. Разномодульность системы характерна для весьма широкого круга материалов: полимеры, металлы, композитные и др. [7]. Для понимания природы разномодульности представляется полезной простая модель, интерпретирующая дефект в виде щели, которая раскрывается при растяжении, что уменьшает жесткость среды по сравнению со сжатием. Не исключено, что за разномодульность реальных материалов ответственны микродефекты подобного рода. У различных материалов это свойство, именуемое разномодульностью, проявляется в разной степени. В основном явление разномодульности характерно для материалов с микронарушениями, а также для композитов. В [8,9] показано, что микроструктурные неоднородности (типа трещин, контактов, в ряде случаев полостей и т. п.) приводят к многократному возрастанию величины нелинейных акустических параметров, что открывает возможности для развития новых методов акустической диагностики.

Накопленные в исследованиях данные о существовании тесной связи нелинейных акустических параметров среды с её структурой и внутренними свойствами, убедительно свидетельствуют о перспективности использования нелинейных эффектов для создания новых диагностических методов.

2. Диагностический признак. Нелинейность упругой среды, при распространении в ней акустических волн, приводит к генерации в зондирующем сигнале спектральных составляющих на частотах, кратных основной частоте. Контролируя параметры нелинейности среды, возрастающей при появлении структурных изменений, «зародышей» процесса разрушения, можно косвенно оценивать состояние металла. В таком случае в качестве диагностического признака можно использовать уровень спектральной составляющей в зондирующей упругой волне на удвоенной частоте исходного сигнала.

Измерения нелинейности, как правило, проводятся в лабораторных условиях [4,5,13] и применяются скорее, как научный инструмент исследования, чем востребованный практикой способ неразрушающего контроля.

Современные тенденции в исследованиях в значительной степени определяются практическими потребностями. Для работы на реальных конструкциях необходим максимально простой компактный специализированный прибор, который можно использовать в качестве «индикатора» состояния металла при проведении диагностических работ

Для мониторинга металла в условиях производства [14] разработан прибор на базе волн Рэлея, обращение с которым не требует специальных радиофизических знаний, максимально прост и компактен. Блок-схема прибора приведена на рисунке 1.

В приборе для зондирования металла использовалась монохроматическая упругая поверхностная волна, создаваемая с использованием пары клиновых преобразователей, которые позволяли генерировать и обнаруживать тональный сигнал поверхностных волн. В качестве параметра, характеризующего акустическую нелинейность, использовано выраженное в дБ соотношение амплитуды основной гармоники на 1 МГц и кратной второй гармонике - соответственно на 2 МГц. Этот параметр контролируется с использованием устройства, работа которого заключается в следующем. По поступающей от компьютера по USB команде микроконтроллер запускает генератор, который формирует радиоимпульс с частотой заполнения 1 МГц и длительностью 3,5 мс, сигнал подаётся на пьезоизлучатель, имеющий резонансную частоту 1 МГц. Сигнал с исследуемого образца принимается пьезоприёмником, имеющим резонансную частоту 2 МГц, усиливается усилителем, имеющим для расширения динамического диапазона завал амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на частоте 1 МГц по сравнению с 2 МГц около 20 дБ, затем сигнал оцифровывается 16-разрядным аналого - цифровым преобразователем (АЦП) с частотой квантования 5 МГц, и запоминается в буферном оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). После этого микроконтроллер выполняет спектральный анализ полученного сигнала и вычисляет отношение амплитуд спектральных компонент на частотах 2 МГц и 1 МГц. Результат по USB передаётся в компьютер.

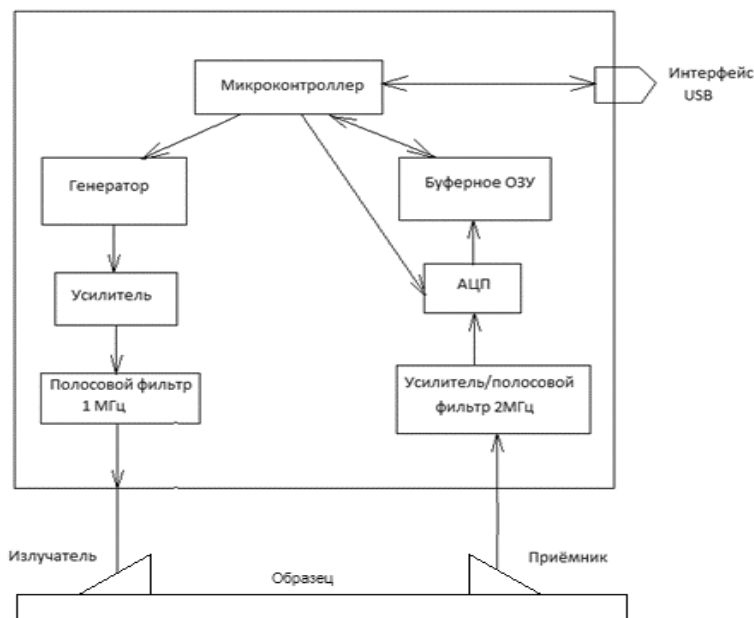


Рис.1. Блок-схема специализированного прибора для контроля состояния металла

3. Идентификация сплавов. Известно, что, наиболее распространенным методом идентификации поставляемой на промышленные предприятия металлопродукции является химический анализ. Химический анализ материалов относится к разрушающим методам контроля, требует использования большого количества оборудования и длительного времени исполнения. В настоящее время в промышленности все большее применение для идентификации марок сталей и сплавов находят методы неразрушающего контроля. Авторы работы [10] для идентификации марки, структуры и физико-механических свойств сплавов используют экспресс методы неразрушающего контроля: с помощью определения термо ЭДС, вихретоковый метод и магнитный.

Однако, перечисленные методы неразрушающего контроля имеют определенную область использования. Так, например, определение термо ЭДС чувствительно к химическому составу материала; установление удельной электропроводности вихретоковым методом применимо при контроле немагнитных материалов; измерение коэрцитивной силы с помощью магнитного метода возможно для магнитных сталей.

В то же время упругие волны, являясь волнами механической природы, распространяются в металле в независимости от его электромагнитных свойств. Они позволяют распознать структурные особенности материала. В связи с этим для идентификации марок сплавов в качестве дополнительного экспресс-метода неразрушающего контроля целесообразно использовать возможности нелинейных акустических эффектов. В [11] приведены данные, демонстрирующие, что показатель нелинейности, приведенный в логарифмических единицах, наиболее чувствителен к различным структурам металла, и, следовательно может быть использован для идентификации марок сплавов в качестве дополнительного экспресс-метода неразрушающего контроля.

4. Поврежденность металла. Акустическое зондирование как метод неразрушающего контроля получает все большее распространение при оценке технического состояния конструкционных материалов и конструкций. Важнейшими информативными характеристиками акустических методов контроля и диагностики конструкционных материалов являются скорость распространения и затухание ультразвука. Наиболее распространенный способ неразрушающего контроля изделий различного назначения - эхо-импульсный метод (около 90% объектов, контролируемых акустическим методом, проверяют эхо-методом).

Авторы работы [12] для оценки технического состояния конструкционных материалов использовали ультразвуковые методы неразрушающего контроля, в частности эхо-импульсный метод контроля с применением объемных волн. Как и в [12], изучение нелинейных акустических свойства сплавов авторы работы [13] проводили с помощью автоматизированного ультразвукового комплекса в лабораторных условиях на экспериментальных образцах. Однако в процессе эксплуатации изменение структурного состояния, накопление поврежденности, нарушение сплошности первоначально происходит преимущественно в поверхностных слоях, а затем распространяется в толщу металла. Поэтому применение поверхностных упругих волн Релея позволяет более адекватно контролировать техническое состояние металла не только на поверхности, но в его толще. Для работы на реальных деталях лабораторное оборудование не всегда пригодно. Поэтому разработанный прибор на базе волн Рэлея [14] более адекватен для решения поставленных задач в качестве неразрушающего метода контроля материала в условиях производства на промышленных объектах.

В [15] приведены, результаты демонстрирующие возможность использования нелинейных волн Рэля характеризовать поврежденность, связанную с пластической деформацией, что весьма актуально для прогнозирования ресурса.

Заключение. Свойства упругих волн проникать во внутреннее пространство практически всех конструкционных материалов и распространяться в них реагируя как на геометрические (размеры и форму частиц, топологию решетки), так и на физические (параметры силовых и моментных взаимодействий между частицами) характеристики позволили разработать технологии акустического зондирования. Показана принципиальная возможность обнаружения нарушений структуры методом акустического зондирования, который обладает высокой информативностью, компактностью, не требует применения большого количества оборудования, относительно прост в исполнении, а применяемое излучение является безвредным.

Список литературы

1. Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. - М.: Металлургия, 1965. - Т. 392.- С. 29.
2. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Родюшкин В.М. Пути повышения чувствительности метода акустического зондирования при исследовании структуры металлов // Дефектоскопия. - 2018. - №2. - С.11-14.
3. Зайцев В. Ю., Назаров В. Е, Таланов В. И. «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН. - 2006. - №176:1. - С.97–102.
4. Зарембо Л. К. и Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. – М.: 1966.
5. Горелик А.Г., Зверев В.А. К вопросу о взаимодействии звуковых волн // Акустический журнал. - 1955. - Т.1, Вып.4. - С.339-342.
6. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике / Под ред. А.В.Гапонова. - М.: Наука, 1990. - 237с.
7. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. - М.: Наука, 1982.
8. Зайцев В.Ю., Прончатов-Рубцов Н.В., Гурбатов С.Н. «Неклассическая» структурно-обусловленная акустическая нелинейность: эксперименты и модели. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применение». - Нижний Новгород: 2007. - 223 с.
9. Зайцев В. Ю., Назаров В. Е, Таланов В. И. «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // Успехи физических наук. - 2006. - № 176:1. - С. 97–102.
10. Кашубский А. Н., Крушенко Г. Г. Идентификация марок сплавов с использованием методов неразрушающего контроля // Известия вузов. Приборостроение. - 2011. - Т.54, №4. - С. 33-37.
11. Иляхинский А.В., Родюшкин В.М. О некоторых технологиях ультразвукового контроля технического состояния оборудования // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2019. - Т. 6, № 1-4. - С. 60-65.
12. Мотова Е.А., Никитина Н.Е. Ультразвуковое исследование поведения конструкционных материалов при циклическом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2015. - Т.77, №3. - С. 227-235.
13. Коробов А. И., Прохоров В. М. Нелинейные акустические свойства алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз // Акустический журнал. - 2016. - № 6. - С. 661–

667.

14. Ванягин А.В., Родюшкин В.М. Измерение акустической нелинейности поврежденного металла// Измерительная техника. - 2017. - №10. - С.42-44.
15. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Пахомов П.А., Родюшкин В.М. Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций // Физическая мезомеханика. - 2019. - Т. 22, №3. - С. 65-70.

Дата поступления: 11 ноября 2019 г.