

Измерение акустической нелинейности повреждённого металла

А. В. ВАНЯГИН¹, В. М. РОДЮШКИН²

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород,
Россия, e-mail: e678xk@mail.ru

²Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород,
Россия, e-mail: vlkn2005@yandex.ru

Предложена методика измерения показателя нелинейности зондирующего сигнала и описано ультразвуковое устройство, реализующее эту методику. Показана высокая чувствительность измеряемого показателя к повреждённости металла. Характеристики устройства позволяют использовать его в качестве средства неразрушающего контроля металла в условиях производства на промышленных объектах.

Ключевые слова: упругая волна, нелинейность, повреждённость, металл, неразрушающий контроль.

Measurement procedure of nonlinearity index in the probe signal is proposed, and the ultrasonic device for realization of that procedure is described. The high sensitivity of the measured index to distortion of the metal is shown. Characteristics of the device allow it to be used as a means of nondestructive testing of metal damage in production conditions at industrial facilities.

Key words: elastic wave, nonlinearity, damage, metal, nondestructive testing.

Методы исследования свойств материалов с помощью проникающего излучения в виде упругих волн всё интенсивнее внедряются в практику определения технического состояния металлов: разрабатываются новые принципы измерения, применяются современные схемные решения построения аппаратуры; обновляется элементная база; совершенствуются методы обработки информации. Этому способствуют высокая информативность методов акустического зондирования, сравнительная компактность, простота обслуживания и относительная дешевизна приборов, а также безвредность применяемого излучения. Акустическое зондирование опирается на методы моделирования динамики упругих сред и радиофизические способы и приёмы обработки сигналов. По особенностям распространения ультразвуковых (УЗ) волн (условия распространения волны меняются в зависимости от многих факторов, в том числе от накопившихся эксплуатационных повреждений) прослеживается связь технического состояния металла с акустическими характеристиками.

Накопление повреждений происходит при пластическом деформировании, динамическом разрушении, циклических воздействиях, к которым относятся много- и малоцикловая усталости, усталостное разрушение при переменной температуре, фрикционная усталость, коррозионное разрушение, радиационная повреждённость и т. д. [1]. Период зарождения усталостных микротрещин составляет 80 % общей долговечности материала до разрушения при как малоцикловой, так и многоцикловой усталости [2]. Поэтому важной является ранняя диагностика, основанная на взаимосвязи накопленной повреждённости с изменением акустических свойств материала. Цель такой диагностики – прогноз ресурса металлических изделий и конструкций задолго до начала процессов разрушения и физического износа металла.

Под повреждённостью обычно понимается сокращение упругого отклика тела вследствие сокращения его эффективной площади, передающей внутренние усилия от одной части тела к другой. Данное сокращение обусловлено появлением и развитием рассеянного поля микродефектов: микротрещин (упругость), дислокаций (пластичность), микропор (ползучесть), поверхностных микротрещин (усталость). Не измеряемая непосредственно повреждённость, т. е. деградация механических свойств тела, может быть обнаружена в результате анализа реакции тела на различные внешние воздействия. В частности, при акустическом зондировании внешние воздействия заключаются в возбуждении УЗ-импульса и его приёме после прохождения через исследуемую среду. Классическая УЗ-дефектоскопия, основанная на эффекте отражении волн от дефекта, для контроля за повреждённостью металла не годится, так как физически нецелостности ещё не существует.

Современные тенденции в исследованиях в значительной степени определяются практическими потребностями. В связи с этим представляется перспективным, опираясь на достижения нелинейной акустики, рассматривать возможность создания «индикатора повреждённости» для оценки технического состояния металла до его разрушения (до появления дефектов) [3].

Несовершенства структуры металла во многом обуславливают его нелинейные свойства. Наряду с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия (физическая нелинейность), приводящей к нелинейной связи между напряжением и деформацией, в повреждённом металле проявляется структурная нелинейность [4]. Эта нелинейность определяется надмолекулярной внутренней структурой твёрдого тела (дислокациями, микротрещинами, локальными внутренними напряжениями и т. д.) и может на 2–4 порядка превышать

физическую нелинейность. В то же время нелинейность упругой среды при распространении в ней акустических волн приводит к генерации спектральных составляющих зондирующего сигнала на частотах, кратных основной частоте. Контролируя параметры нелинейности среды, возрастающей при появлении «зародышей» процесса разрушения, можно косвенно оценивать поврежденность металла. В качестве диагностического признака поврежденности можно применять уровень спектральной составляющей зондирующей упругой волны на удвоенной частоте исходного сигнала. Измерения нелинейности, как правило, проводятся в лабораторных условиях [5, 6]. Их результаты используются скорее как научный инструмент исследования, чем востребованный практикой способ неразрушающего контроля. Поэтому для работы на реальных конструкциях необходимо было создать простой специализированный прибор, который можно применять в качестве «индикатора» степени поврежденности металла при проведении диагностики.

Был разработан и изготовлен «индикатор поврежденности» в виде максимально простого компактного устройства, обращение с которым не требует специальных радиофизических знаний. Зондирование металла осуществлялось монохроматической упругой поверхностной волной (так называемой волной Рэлея), создаваемой с использованием пары клиновых преобразователей, которые позволяли генерировать и обнаруживать тональный сигнал поверхностных волн. Параметром, характеризующим акустическую нелинейность (показателем нелинейности) принятого зондирующего сигнала служило выраженное в единицах децибел соотношение амплитуд основной гармоники на частоте 1 МГц и второй гармоники на частоте 2 МГц.

На рис. 1 приведена функциональная схема устройства. По команде из USB-порта компьютера микроконтроллер запускает генератор, который формирует радиоимпульс с частотой заполнения 1 МГц и длительностью 3,5 мс, поступающий на пьезоизлучатель, имеющий резонансную частоту 1 МГц. Спектральные характеристики радиоимпульсного сигнала измеряются прибором DPO4032 (Tektronix Inc., Beaverton, OR, USA), уровни второй и третьей гармоник составляют соответственно –83 и –53 дБ.

Монохроматическая упругая поверхностная волна, прошедшая исследуемый образец, принимается пьезоприёмником с резонансной частотой 2 МГц и затем усиливается. Для расширения динамического диапазона усилитель имеет завал амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на частоте 1 МГц около 20 дБ по сравнению с АЧХ на частоте 2 МГц. Затем сигнал оцифровывается 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (частота квантования 5 МГц) и запоминается в буферном оперативном запоминающем устройстве. После этого микроконтроллер выполняет спектральный анализ полученного сигнала и вычисляет отношение амплитуд спектральных составляющих на частотах 2 и 1 МГц. Результат по USB передается обратно в компьютер. Устройство выполнено в отдельном пластмассовом корпусе и питается от внешнего источника напряжением 9–30 В.

Апробация «индикатора поврежденности» проведе-

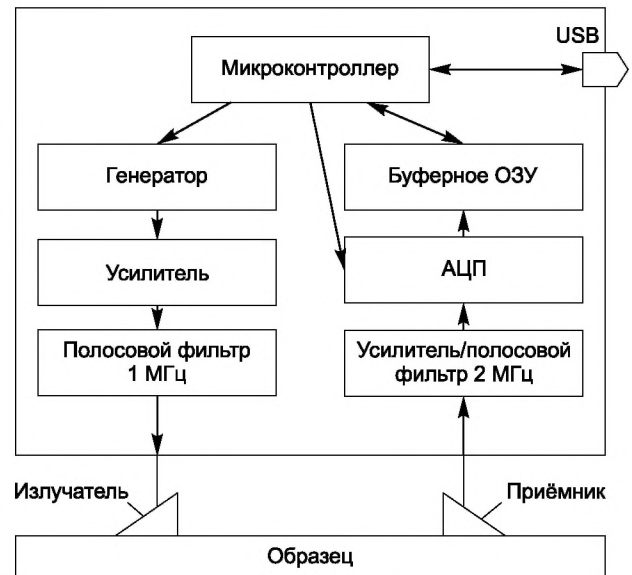


Рис. 1. Функциональная схема устройства для контроля параметра, характеризующего акустическую нелинейность: ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

на на трёх одинаковых образцах из металла марки Ст10, изготовленных согласно стандарту [7], с поврежденностью, внесенной путём пластического и малоциклового деформирования. Деформирования проводились на универсальной испытательной машине Н100КУ (Tinius Olsen Ltd, Horsham, PA, USA). Параметры машины: наибольшая предельная нагрузка 100 000 Н; погрешность измерения нагрузки 0,5 %; ход и скорость траверсы 1600 мм 0,001–500 мм/мин, соответственно; разрешающая способность системы измерения перемещения траверсы-деформации образца 0,001 мм.

Металл образца имел следующие характеристики: модуль упругости 182 ГПа; пределы текучести и прочности 246 и 383 МПа, соответственно. Параметр, характеризующий

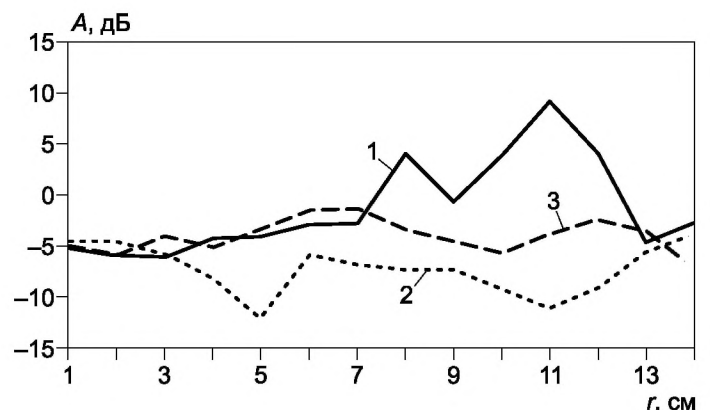


Рис. 2. Результаты измерения акустической нелинейности A для образцов с различной накопленной поврежденностью (различные режимы деформирования образцов): 1 – образец растянут до образования шейки; 2 – недеформированный образец; 3 – образец после 300 циклов нагружения

акустическую нелинейность, контролировался «индикатором поврежденности» вдоль всей поверхности образцов. На рис. 2 представлены результаты измерения показателя нелинейности A поверхностной волны при её распространении в трёх изначально одинаковых образцах. Разброс показаний, обусловленный как инструментальной погрешностью «индикатора поврежденности», так и внешними помехами при измерениях, составил ± 2 дБ.

Первый образец был в исходном недеформированном состоянии, как и следовало ожидать, показатель нелинейности оказался наименьшим. *Второй образец* был подвергнут малоциклового деформированию: 300 циклов одноосного мягкого нагружения при постоянной скорости 5 м/с и амплитудой нагружения $-0,6$ от предела текучести. Таким способом в металл вносилась незначительная (по сравнению с состоянием предразрушения) поврежденность. Показатель нелинейности в среднем по длине рабочей зоны образца повысился. *Третий образец* был подвергнут статическому нагружению до достижения предела прочности металла. Визуально было заметно образование «шейки» на образце на расстоянии 11 см от начала рабочей зоны образца (длина зоны 20 см), что свидетельствует о состоянии предразрушения и внесённой посредством пластической деформации «критической» поврежденности. Результаты измерения показателя акустической нелинейности упругой поверхностной волны, прошедшей зону образования «шейки», т. е. зону металла с наибольшей поврежденностью, подтвердили данные визуальных наблюдений. Показатель нелинейности в зоне образования шейки для третьего образца значительно выше показателя для недеформированного первого образца.

Таким образом, апробация «индикатора поврежденности» на лабораторных образцах наглядно демонстрирует возможности его применения на практике. Поврежденность второго образца, внесённая малоцикловым деформированием, привела к отличию его показателя нелинейности на 4–5 дБ от показателя для первого образца, а для третьего образца с «критической» поврежденностью это отличие составляет уже 6–10 дБ.

Наблюдаемая неравномерность распределения показателя нелинейности по длине образца обусловлена тем фактом, что концентрация повреждений при любом виде нагружения происходит в локальном объёме [8], при этом следует учитывать изначальную пространственную неоднородность свойств металла. Следует отметить, что показатель акустической нелинейности волны для различных видов накопленной поврежденности (различных режимов деформирования образцов) изменяется более существенно, чем скорость волны, по значению которой нередко контролируют поврежденности. Результаты, приведённые в [9], свидетельствуют, что при состоянии предразрушения металла, изменение скорости поверхностной волны составляет не более 1 %, а изменение её показателя акустической нелинейности – уже 6–10 дБ или в 2–3 раза по линейной шкале. Такое отличие с точки зрения разработки средств неразрушающего контроля для оценки технического состояния металла до его раз-

рушения говорит в пользу предложенного «индикатора поврежденности».

Необходимо отметить, что показатель акустической нелинейности отражает как искомую нелинейность поврежденной исследуемой среды, так и нелинейность всего измерительного тракта, включая контакт между преобразователем и средой (контактная акустическая нелинейность) [10]. Поэтому при выполнении работы особое внимание уделялось постоянству свойств контакта (прижим, шероховатость поверхности образцов).

Заключение. Полученные результаты демонстрируют возможность использования нелинейных волн Рэлея для характеристики поврежденностей металла, и эта количественная информация может быть полезной для моделей прогнозирования ресурса изделий. Апробированное малогабаритное устройство для вычисления отношения амплитуд первой и второй гармоник зондирующего сигнала, обращение с которым не требует специальных радиофизических знаний, может служить средством неразрушающего контроля за поврежденностью упругой среды.

Л и т е р а т у р а

1. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008.
2. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003.
3. Мишакин В. В., Родюшкин В. М. Нелинейность как индикатор преддефектного состояния // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 7. С. 48–53.
4. 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.
5. Коробов А. И., Прохоров В. М. Нелинейные акустические свойства алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз // Акустический журнал. 2016. № 6. С. 661–667.
6. Паздера Л., Коренска Л., Манычева М. Экспериментальное исследование нелинейных эффектов, происходящих в структуре из бетона с нарушениями сплошности // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 47–55.
7. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
8. Петров М. Г., Равикович А. И. Накопление повреждений при пластическом деформировании и ползучести алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 1. С. 172–182.
9. Зуев Л. Б., Данилов В. И. Физические основы прочности материалов. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2013.
10. Руденко О. В., Чинь Ань Ву. Нелинейные акустические свойства контакта шероховатых поверхностей и возможности акустодиагностики статистических характеристик неровностей // Акустический журнал. 1994. Т. 40. № 4. С. 668–672.

Дата принятия: 01.03.2017.