

УДК 621.0

## НЕЛИНЕЙНОСТЬ КАК ИНДИКАТОР ПРЕДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА

© В.В.Мишакин<sup>1)</sup>, В.М. Родюшкин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Нижегородский филиал Института машиноведения РАН, Россия, Нижний Новгород

<sup>2)</sup> ООО «Газнадзор» Волго-Камский ГТЦ, Россия, Нижний Новгород

**Аннотация.** Обнаружение зон структурной деградации, оценка структурного состояния длительно работающего металла – весьма актуальная задача, которая может быть решена с применением акустических методов, так как изменение микроструктуры, накопление структурной поврежденности в процессе эксплуатации приводит к изменению акустических характеристик.

**Ключевые слова:** непрерывный мониторинг, зоны структурной деградации.

При нынешнем состоянии российской промышленности, когда более 50% основного оборудования выработало свой ресурс, важнейшей задачей становится научно обоснованное продление срока службы оборудования вплоть до полной выработки его реального ресурса. На сегодняшний день применяемые для решения этой задачи методы экспертного технического диагностирования выявляют физически существующие повреждения материала, превышающие допустимые нормы на момент проведения обследования, что по существу является констатацией факта конечной стадии деградации материала. Реальное текущее техническое состояние материала до появления дефекта оценить не удастся, хотя с момента начала эксплуатации объекта и появления нагружения в конструкционном материале происходит накопление стабильных микроповреждений, которые, в конце концов, приводят к зарождению дефектов и разрушению материала. Таким образом, контроль зарождающихся повреждений является ключевым в оценке реального текущего технического состояния материала.

Используя современные технологии, такой контроль можно осуществить посредством непрерывного мониторинга объекта, в этом случае датчики должны быть установлены на объекте во время его изготовления, например, на трубопроводе еще до его укладки в грунт, и должны быть работоспособны на всем «жизненном» пути технического устройства. Задача непрерывного мониторинга – зафиксировать момент, когда растущий дефект превысит разрешенный норматив. Однако существующая нормативно-техническая база, как отмечается в [1], на стадии эксплуатации технических устройств практически не предусматривает проведение неразрушающего контроля. Существует менее затратный и, на наш взгляд, более эффективный путь – переход к ранней диагностике.

Задача ранней диагностики – выявить области зарождения дефектов; определить зоны преддефектного состояния материала, где на момент обследования технического устройства дефектов нет, но они непременно появятся в ближайшем будущем и могут привести к выходу из строя технических устройств, к авариям и травмам персонала.

Основными факторами, провоцирующими возникновение повреждений и определяющими их развитие, являются агрессивность внешней среды, в которой работает материал; качество материала и его деградация (изменение структуры и физико-механических свойств материала в процессе эксплуатации) и уровень статических и динамических деформаций, воздействующих во время эксплуатации на материал.

Таким образом, решение задачи ранней диагностики заключается как в контроле уровня напряжений в материале, на фоне которых процессы коррозии, усталости и ползучести развиваются наиболее интенсивно, так и в обнаружении зон, где происходит наиболее интенсивная структурная деградация металла.

Обнаружение зон структурной деградации, оценка структурного состояния длительно работающего металла – весьма актуальная задача, которая может быть решена с применением акустических методов, так как изменение микроструктуры, накопление структурной поврежденности в процессе эксплуатации приводит к изменению акустических характеристик. В [2] показано, что при длительной эксплуатации в материалах технических устройств происходят сложные физико-химические процессы, связанные с перестройкой микроструктуры, перераспределением внутренних напряжений, образованием и развитием микроповреждений, вызванных такими явлениями, как коррозия (химическая, электрохимическая, коррозия под напряжением и т.д.), усталость (много- и малоцикловая, коррозионная, коррозионно-термическая и т.д.), ползучесть различных типов, релаксация напряжений, а во многих случаях и их совместных действиях. Установлено, что скорость волн Релея – один из наиболее чувствительных параметров выявления поверхностных структурных несовершенств в металле. В [3,4] введен акустический критерий предельного состояния длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов. В [5] продемонстрирована возможность выявления стадии предразрушения металла конструкции, работающего в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. С помощью волн Релея [6] на частоте 1,5 МГц уверенно обнаруживается поверхностная риска длиной 10 мм и сечением 0,1\*0,1 мм на расстоянии 300 мм между преобразователем и рисккой. В Институте физики прочности и материаловедения СО РАН на основе оптико-телевизионного и акустического метода [7] предлагается осуществлять диагностику стадий накопления повреждений в материале задолго до появления в нем видимых трещин и состояния предразрушения (предельного состояния) при одностороннем доступе к техническому устройству в процессе его эксплуатации.

Вышеупомянутые методы оценки технического состояния материалов базируются на результатах измерения скорости импульса волн и применяются на практике достаточно давно [8-10]. Известны трудности как методологического [11], так и экспериментального характера [12] при интерпретации получаемых результатов.

Измерение уровня генерации гармоник в акустическом зондирующем сигнале, представляющем собой непрерывную монохроматическую волну, не содержит вышеупомянутых трудностей. Однако нелинейность материала, приводящая к генерации гармоник в зондирующей материал волне, позиционируется у многих исследователей скорее как научный факт [15,16], чем востребованный практикой диагностический признак.

В работах Руденко О.В. [13], Зарембо Л.К., Красильникова В.А. [14] предлагалось использовать нелинейные методы в акустической диагностике. Различают геометрическую, физическую и структурную нелинейность. Аномально высокая структурная нелинейность проявляется в материале с дефектами и определяется надмолекулярной структурой материала (дислокациями, остаточными внутренними напряжениями, микротрещинами и т.д.). В то же время от наличия микротрещин, микропор, скоплений дислокаций и других «зародышей» процесса разрушения зависит прочность твердых тел, что во многом определяет техническое состояние материала. При небольших концентрациях зародышей, малых по сравнению с длиной волны, линейные акустические характеристики (затухание и скорость звука) обычно малочувствительны к дефектам структуры. Напротив, нелинейность структурно-неоднородных материалов может намного (на два–три порядка) превышать их обычную молекулярную нелинейность. Поэтому контроль уровня нелинейности среды может стать эффективной процедурой в технологии поиска и обнаружения преддефектного состояния.

Физические механизмы, приводящие к большим нелинейностям из-за дефектов структуры, имеют разную природу. Причиной может служить микротрещина, толщина которой меньше или порядка амплитуды смещения в акустической волне; контакт между фрагментами структуры, меняющий свою площадь в зависимости от того, сжимается среда либо растягивается; несплошность с малым радиусом кривизны, являющаяся при деформации среды концентратором напряжений; наличие в структуре материала компонент с резко контрастирующими упругими свойствами и др. Причиной нелинейности материала являются усталостные повреждения: с увеличением числа циклов происходит увеличение нелинейности из-за прогрессирующего рождения дефектов. Таким образом, рост концентрации структурных неоднородностей обуславливает возрастание нелинейности и снижение прочности материала.

Существуют различные модели, описывающие нелинейность структурно-неоднородных сред. Модели возникновения нелинейности в пористой среде исследовались в работах Островского Л.А. [17], модели гистерезисного типа изучались в работах Сутина А.М., Назарова В.Е. [18], модель разномодульных сред использовалась в работах Ерофеева В.И. [19], обобщенная модель упругой нелинейности среды с микронеоднородной структурой описывается в работах Зайцева В.Ю. [20].

В нашу задачу не входит детальное изучение микромеханизмов, ответственных за нелинейные эффекты. Нередко эти механизмы не вполне ясны. Наша задача – попытаться оценить возможность создания эффективной технологии поиска и обнаружения преддефектного состояния длительно эксплуатируемых материалов на основе акустических эффектов, обусловленных нелинейностью среды.

Для того чтобы применить нелинейные эффекты, возникающие в деградирующих в процессе эксплуатации материалах, следует уметь точно и достаточно просто в техническом отношении измерять параметры этих эффектов. Тогда с одной стороны мы будем обладать приемлемой для пользователя процедурой измерения, с другой – иметь возможность контролировать по этим параметрам техническое состояние конструкций и материалов задолго до появления в них физически реализуемых дефектов. В защиту высказанного предположения приведем результаты исследований, полученные на образцах материала, подверженных различной степени пластического деформирования.

В исследованиях использовалась непрерывно генерируемая монохроматическая упругая волна, создаваемая генератором и пьезокерамическим преобразователем, работающим на частоте своего механического резонанса – в данном случае 1 МГц. Уровень нелинейных искажений генератора, нагруженного на преобразователь, перед работой на образцах проверялся, с тем, чтобы он не превышал значений нелинейности в поврежденном материале. В наших экспериментах использовался генератор (ГЗ-110) с кварцевой стабилизацией частоты и с уровнем второй гармоники в генерируемом сигнале порядка 80 дБ. Сконструированные призмы преобразователей с углом ввода 57 градусов позволяли вводить поверхностную волну в образец. На фиксированном расстоянии от излучателя поверхностных волн располагался аналогичный преобразователь, работающий в качестве приемника волн, но с пьезокерамической платиной, работающей на частоте механического резонанса – 2 МГц. Принимаемый сигнал поступал через широкополосный малошумящий усилитель УЗ-33 с коэффициентом усиления 25 дБ на селективный вольтметр SMV-11, позволяющий в полосе частот 0,2 кГц в диапазоне частот от 9 кГц до 30 МГц измерять уровень спектральных составляющих от 1,78 В до 1,00 мкВ, то есть диапазон измеряемых напряжений составлял 125 дБ.

Измерялся среднее логарифмическое значение уровня спектральных составляющих на основной частоте  $\omega$  и на второй гармонике -  $2\omega$ . Разница  $\Delta = A_{\omega} - A_{2\omega}$  [дБ] является относительной величиной и характеризует уровень нелинейности в материале в независимости от уровня основной гармоники.

Исследованы 6 образцов. Первый образец из стали 14ХГС толщиной 10 мм и шириной 20 мм в процессе пластического деформирования при одноосном нагружении был доведен до разрыва. Образец после разрыва подвергался фрезеровке и полировке с целью получения одинакового качества поверхности по всей длине образца, затем разделен на зоны 10 мм, всего было 14 зон. Длина образца – около 145 мм. На образце через каждые 20 мм производились измерения нелинейного параметра  $\Delta$  и через каждые 10 мм – акустические измерения с помощью эхо-импульсного метода. На каждую из зон устанавливались пьезокерамические преобразователи для возбуждения поперечных и продольных упругих волн, распространяющихся перпендикулярно поверхности материала. Центральная частота пьезоэлектрических преобразователей – около 4,6 МГц. Длительность сигнала составляла 800 нс. Точность измерения времени распространения составляла около 1,5 нс. Пять образцов из стали 08пс размерами 250\*20\*6 мм, деформированных на 0, 3,6, 5,6, 11,4 и 16,0 %, также исследовались акустическим методом. На рис.1 дано распределение нелинейного параметра  $\Delta$  по длине разрушенного образца из стали 14ХГС.

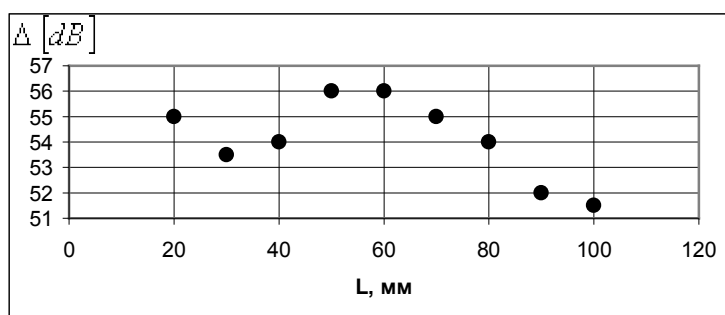


Рис.1. Распределение нелинейного параметра  $\Delta$  по длине образца из стали 14ХГС

На рис.1 L – расстояние от края образца, находящегося в зажимах нагрузочной машины.

Видно, что зоны концентрации нелинейности соответствуют наиболее деформированным зонам – в районе зажима и вблизи разрыва образца, где пластическое деформирование проходило наиболее интенсивно.

Изменение нелинейных характеристик при пластическом деформировании может происходить как в результате изменения упругой анизотропии, связанной с изменением кристаллографической текстуры, так и с накоплением микроповрежденности, например накоплением микропор, микротрещин. Скорости упругих волн в исследуемых текстурированных материалах (к ним относится большинство поликристаллических сплавов) также связаны с характеристиками кристаллографической текстуры, с изменением модулей упругости и плотности в результате накопления микродефектов.

Для листовых поликристаллических материалов с кубической симметрией решетки скорости объемных поперечных и продольных упругих волн, распространяющихся перпендикулярно поверхности материала, выражаются как [21]:

$$\rho V_{long}^2 = K + \frac{4\mu}{3} + \frac{32\sqrt{2}\pi^2}{35} c w_{400} \quad (1)$$

$$\rho V_{t//}^2 = \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c \left[ w_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} w_{420} \right] \quad (2)$$

$$\rho V_{t\perp}^2 = \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c \left[ w_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} w_{420} \right] \quad (3)$$

где  $V_{long}$  – скорость продольной волны,  $V_{t//}$  – скорость поперечной волны поляризованной вдоль направления проката,  $V_{t\perp}$  – скорость поперечной волны поляризованной поперек

направления проката,  $\sum V_i^2$  – сумма квадратов скоростей продольных и поперечных,  $\rho$  – плотность;  $w_{400}$ ,  $w_{420}$  – коэффициенты функции распределения ориентировок (ФРО) кристаллов в поликристаллическом материале,  $K$  и  $\mu$  – модуль всестороннего сжатия и модуль сдвига для изотропного материала соответственно (при  $w_{400} = w_{420} = 0$ ),  $c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$ ,  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  – упругие константы для кубических кристаллов.

Из выражений (1)-(3) можно получить:

$$A_1 = \frac{V_{t//}^2 - V_{t\perp}^2}{\sum V_i^2} = \frac{1/t_{//}^2 - 1/t_{\perp}^2}{\sum_i 1/t_i^2} = \frac{32\pi^2 c w_{420}}{7\sqrt{5}(K + 10\mu/3)}; \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{V_{t//}^2 + V_{t\perp}^2}{\sum V_i^2} = \frac{1/t_{//}^2 + 1/t_{\perp}^2}{\sum_i 1/t_i^2} = \frac{2}{K + 10\mu/3} \left( \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c w_{400} \right); \quad (5)$$

$$\sum V_i^2 = \left( K + \frac{10\mu}{3} \right) / \rho. \quad (6)$$

Параметры  $A_1$  и  $A_2$  удобно использовать для оценки состояния поврежденного материала, так как они определяются по соотношению времени распространения упругих волн относительно точности измерения которых на два три порядка выше чем точность измерения скоростей.

Параметр  $A_1$ , отражающий эффект двулучепреломления поперечных волн, зависит в основном от коэффициента ФРО  $w_{420}$ , параметр  $A_2$  – как от изменения модулей упругости при накоплении повреждений, так и из-за формирования текстуры деформации. Сумма квадратов скоростей не зависит от кристаллографической текстуры, ее изменение связано с изменением модулей упругости и плотности при накоплении повреждений.

Связь модулей упругости  $K$ ,  $\mu$ , с учетом результатов работы [22] можно записать в виде:

$$K = K_0 + k_1\psi; \quad \mu = \mu_0 + k_2\psi, \quad (7)$$

где  $\psi = (\rho - \rho_0)/\rho_0$  – относительное изменение плотности (поврежденность) материала в

результате накопления микронесплошностей;  $k_1 = \frac{8}{9} E_0 \frac{\nu_0^2 - 1}{(1 - 2\nu_0)^2}$ ;  $k_2 = \frac{32}{45} E_0 \frac{(\nu_0 - 5)(\nu_0 - 1)}{(1 + \nu_0)(\nu_0 - 2)}$ ;

$E_0$ ,  $\nu_0$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

С учетом выражений (7) получено:  $\psi = \frac{\rho_0}{k_1 + (10k_2/3)} \Delta \left( \sum V_i^2 \right)$ . Поврежденность  $\psi$

пропорциональна изменению суммы квадратов скоростей поперечных и продольных волн.

На рис.2 представлены зависимости параметра  $A_1$  и  $A_2$  от величины пластической деформации  $e$  для первого образца. На рис. 3 дана зависимость поврежденности, а также скорости продольных волн от  $e$ .

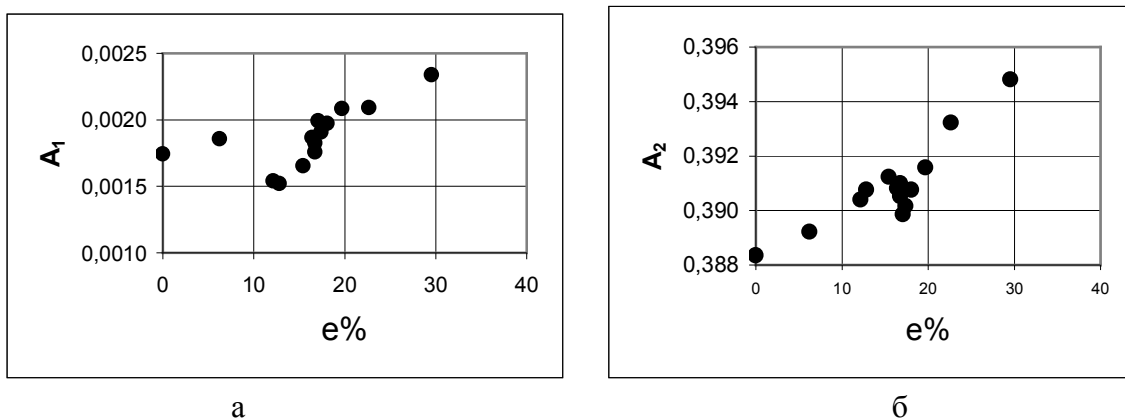


Рис. 2. Зависимости параметров  $A_1$  (а) и  $A_2$  (б) от величины пластической деформации

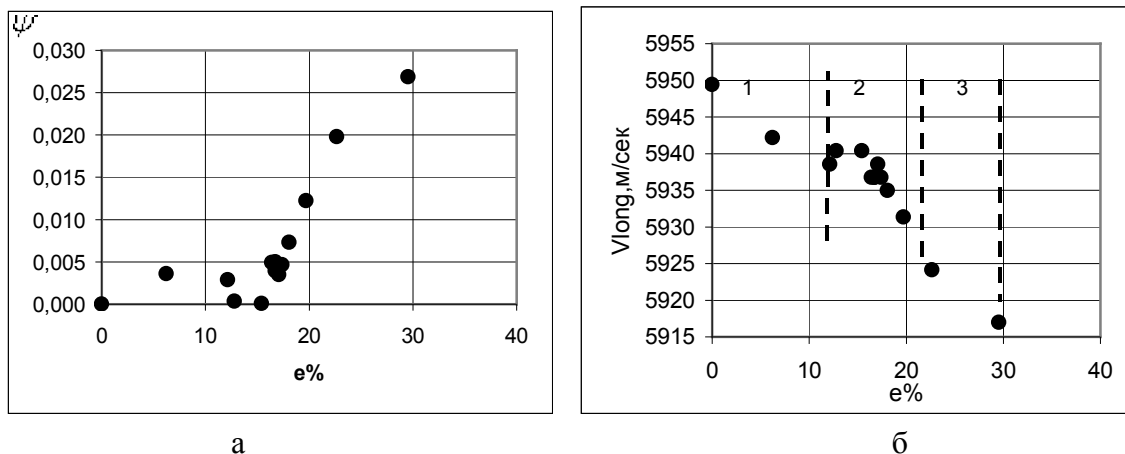
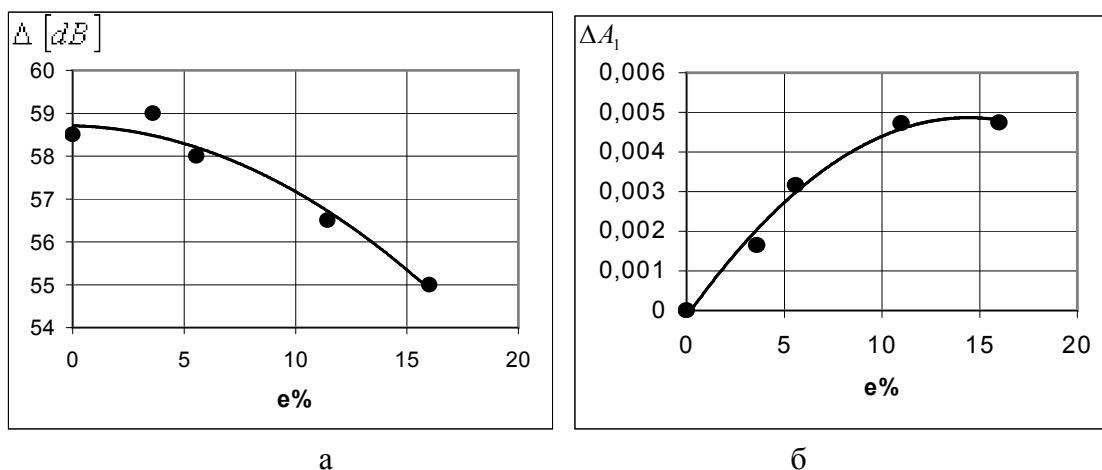


Рис.3. Зависимость поврежденности (а) и скорости продольной волны (б) от величины пластической деформации:  
1 – зона захвата образца, 2 – зона равномерной деформации, 3 – зона шейки

Точность измерения параметров  $A_1$  и  $A_2$  была не менее  $10^{-4}$ , точность измерения скорости – не менее 0,5 м/с.

Как видно из рис. 2,а, в процессе пластического деформирования происходит активное изменение текстуры деформации, а также накопление повреждений (рис. 3,а), что влияет на изменение скорости ультразвука в материале, так и на изменение нелинейности среды, что подтверждается полученными результатами.

На рис.4 дана зависимость нелинейного параметра  $\Delta$  и изменение усредненной по всем исследуемым зонам величины акустической анизотропии от величины пластической деформации для образцов, изготовленных из стали 08пс.



**Рис.4.** Зависимость нелинейного параметра  $\Delta$  (а) и изменение усредненной по всем исследуемым зонам величины акустической анизотропии (б) для образцов, изготовленных из стали 08пс, от величины пластической деформации

Как видим из рис.4 изменение упругой анизотропии, связанной с формированием кристаллографической текстуры, хорошо коррелирует с изменением нелинейного параметра  $\Delta$ .

Можно сказать, что акустические измерения позволяют качественно оценить пространственную картину распределения «проблемных» зон материала, текущее техническое состояние которого оценивается. Зоны с высоким риском появления дефекта, обнаруженные в результате контроля уровня нелинейности материала, подлежат соответствующей технологической профилактике и тщательному мониторингу существующими методами НК.

Как результат развития такого подхода видится создание прибора – акустического индикатора преддефектного состояния, которое может быть реализовано в достаточно компактном и энергонезависимом варианте, что позволит использовать его на месте установки технического устройства, непосредственно на объекте, без разрушения элементов технического устройства и вывода его из эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 06-08-00520, грант №06-02-17158, 08-08-97058-р\_поволжье\_a).

### Литература

1. Котельников В.С., Коновалов Н.Н., Шевченко В.П. Мониторинг технического состояния оборудования с истекшим сроком эксплуатации на опасных производственных объектах // В мире неразрушающего контроля. 2006. №4(34). С.21-23.
2. Смирнов А.Н., Хапонен Н.А., Челышев А.Н., Медведев С.Н. Оценка состояния длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов акустическим методом // Безопасность труда в промышленности. 2004. №3. С.28-32.
3. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Хапонен Н.А. Акустический критерий предельного состояния длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов // Контроль.Диагностика.2004.№5.С.19-23

4. Котельников В.С., Коновалов Н.Н., Шевченко В.П. Мониторинг технического состояния оборудования с истекшим сроком эксплуатации на опасных производственных объектах // В мире неразрушающего контроля. 2006. №4(34). С.21-23.
5. Чирков Ю.А., Кушнарченко В.М., Самигулов И.Н., Агишев В.Н. Оценка физико-механических свойств сталей акустическими поверхностными волнами // Вестник ОГУ.2002.№5. С.145-148.
6. Егоров Н.Н., Тоом К.Е. Использование поверхностных и нормальных волн в ультразвуковой дефектоскопии // Контроль и диагностика. 2004. №6. С.
7. Сырякин В.И. и др. Способ неразрушающего контроля механического состояния объектов и устройство для его осуществления // Патент № 2126523 . Приоритет от 28.10.96/
8. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. – М.: Машиностроение. 1983. 78с.
9. Демидик С.Д., Мишакин В.В. Акустический метод оценки поврежденности. Дефектоскопия. №9. 1991. с.92-93
10. Митенков Ф.М., Углов А.Л., Пичков С.Н., Попцов В.М. О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно - программных средств для её реализации. Проблемы машиноведения и надежности машин. 1998. №3. с.3-9.
11. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов.- Новосибирск.: Наука. 1996
12. Никитина Н.Е. Об одной составляющей погрешности измерения фазовой скорости ультразвука импульсным методом. Дефектоскопия. 1989. №8.с.23-29.
13. Руденко О.В. Нелинейные методы акустической диагностики. Дефектоскопия. 1993. №8. с.24-32
14. Зарембо Л.К., Красильников В.А., Школьник И.Э. Нелинейная акустика в проблеме диагностики прочности твердых сред. Проблемы прочности. 1989. №4. с.86-92
15. Коротков А.С., Славинский М.М., Сутин А.М. Измерение нелинейного акустического параметра стали при накоплении дефектов. Акуст. журн. 1994. т.40. №1. с.84-87.
16. Конюхов Б.А. Использование нелинейного взаимодействия ультразвуковых волн в задачах оценки неоднородных упругих напряжений. Дефектоскопия. 1988. №5. с.3-6
17. Островский Л.А. Нелинейные свойства упругой среды с цилиндрическими порами. Акуст. журн. 1989. т.35. №3. с.490-494.
18. Сутин А.М., Назаров В.Е. Нелинейные акустические методы диагностики трещин. Изв.Вузов. Радиофизика. 1995. т.38. №3-4. с.169-187.
19. Ерофеев В.И. Мишакин В.В., Родюшкин В.М., Шарабановы А.В. Генерация сдвиговых волн удвоенной частоты в материалах, по разному сопротивляющихся растяжению и сжатию. Дефектоскопия, №4, 2006.с.28-36.
20. Беляева И.Ю, Зайцев В.Ю. Структурно-порожденная нелинейность зернистых сред: теория и эксперимент. Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1995. №1-21. с.94-99
21. Allen, D., and Sayers, C. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // Ultrasonics, 1984. - V. 22.- P. 179-188.
22. Вавакин А.С., Салганик Р.Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями // Механика твердого тела. – 1975. - № 3. - С. 65-76.

*Поступила: 29.07.10.*