

На правах рукописи

Толстопятов Сергей Николаевич



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАТУХАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ
В ПЛАСТИЧНО ДЕФОРМИРУЕМОМ ОБРАЗЦЕ**

Специальность 01.02.04

«Механика деформируемого твердого тела»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тула - 2005

Работа выполнена на кафедре математики и физики в Белгородской государственной сельскохозяйственной академии.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент
Молодцов Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Матченко Николай Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор
Пшеничников Сергей Геннадьевич

Ведущая организация: НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится «14» июня 2005 г. на заседании диссертационного совета Д 212. 271. 02 при ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300600, г.Тула, пр. Ленина 92, 9-101,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «ТулГУ».

Автореферат разослан «6» мая 2005 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
докт. физ.-мат. наук, профессор



Л.А. Голоконников

2006-4
25580

2241922

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

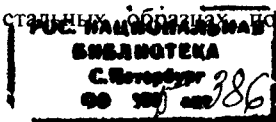
Актуальность исследования. Развитие современной техники характеризуется резким возрастанием нагрузок на рабочие органы машин и элементов конструкций, при этом требуется обеспечение запаса прочности и надежности при одновременном снижении материалоемкости, что невозможно без неразрушающего определения напряжений и деформаций во время эксплуатации изделия. Перспективными методами неразрушающего контроля являются ультразвуковые методы, которые обеспечивают безопасность применения, оперативность измерений и возможность определять не только упругие деформации, в отличие, например, от рентгеновского метода.

Современные промышленные технологии предполагают работу конструкционных материалов при высоких уровнях различных физических полей, когда возможны большие упруго-пластические деформации, требующие постоянного контроля. Наиболее разработанный ультразвуковой метод определения напряжений – по изменению скорости ультразвука – применяется в области малых упруго-пластических деформаций. Более общий метод – по затуханию ультразвука – оставляет много неясных вопросов при экспериментальных и теоретических исследованиях, в особенности относящихся к практическому применению.

В связи с этим совершенствование существующих методов ультразвукового контроля напряженно-деформированного состояния, создание и обоснование новых ультразвуковых методов является актуальной задачей.

Цель работы. Целью настоящей работы является: экспериментальное изучение влияния одноосных растягивающих напряжений на затухание ультразвуковых полей в образцах из низкоуглеродистой стали; построение математической модели сплошной среды, объясняющей наблюдаемый в эксперименте эффект затухания ультразвуковых волн.

Научная новизна работы. Разработана и обоснована методика определения затухания ультразвука в стальных образцах под действием одноосных растягивающих напряжений



Экспериментально изучено изменение затухания ультразвуковых колебаний в процессе «нагрузка-разгрузка». Предложен способ неразрушающего определения одноосного напряженно-деформированного состояния материала по методу затухания ультразвука.

На основе анализа выполненных экспериментов по затуханию ультразвука в стальных образцах под действием одноосных растягивающих напряжений предложена модель сплошной среды, объясняющая распространение и затухание ультразвука.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью использованных подходов и методов, применением поверенной в территориальном органе Госстандарта ультразвуковой аппаратуры, сравнением с результатами других авторов, совпадением аналогичных результатов, полученных другими методами, сравнением теоретических результатов с экспериментальными.

Практическая ценность работы и перспективность использования ее результатов состоит в предоставлении новых возможностей по определению напряженно-деформированного состояния материала неразрушающим ультразвуковым методом.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научно-практических конференциях и семинарах:

Международный симпозиум «Прочность при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения», Киев, 25-28 сентября 1984г.

Международная конференция «Передовые технологии в промышленности и строительстве на пороге XXI века», БелГТАСМ, Белгород, 15-17 октября, 1998г.

Научно-исследовательский семинар имени А.А. Ильюшина кафедры теории упругости МГУ под руководством профессора И.А. Кийко, декабрь 2003г.

Международная научная конференция «Современные проблемы математики, механики и информатики». ТулГУ, Тула, 17-19 ноября 2004г.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 7 работах автора, защищены авторским свидетельством на изобретение СССР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, трех Глав, Заключения, библиографии и Приложения. Основное содержание и библиография включают 15 страниц машинописного текста, работа содержит список литературы – 97 наименований, 17 рисунка, 3 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы, дан краткий анализ современного состояния исследуемой проблемы, сформулированы основные научные положения, которые представляются к защите.

В Главе 1 рассмотрены различные причины затухания ультразвуковых волн в металлах. Процесс затухания высокочастотных колебаний в металлах имеет очень сложную природу, причем в зависимости от частоты и амплитуды колебаний, строения рассматриваемого материала может преобладать та или иная причина затухания. Процесс пластического деформирования влечет за собой процесс изменения структуры материала, и как следствие, изменение его акустических характеристик.

В настоящее время изучение затухания ультразвуковых колебаний в металлах под действием приложенной нагрузки развивается по двум направлениям:

1) установление связи (функциональной или корреляционной) между изменением затухания и изменением какой-либо структурной характеристики материала вследствие его деформирования;

2) построение математической модели материала, адекватно отражающей накопленные экспериментальные данные по влиянию напряжений на затухание ультразвука в металлических образцах.

На возможность рассеяния ультразвука в поликристаллическом материале было указано еще в 40-х годах прошлого столетия в работах Д.С. Шрайбера и С.Я. Соколова. В дальнейшем в трудах Л.Г. Меркулова, Г. Мак-Скимина, У. Мэзона, Л. Рохлина, И.Н. Ермолова, И.М. Лифшица, Г.Д. Пархомовского и др. рассмотрены различные причины затухания ультразвука, связанные со структурными особенностями материала.

Затухание ультразвука может быть вызвано наличием в кристаллической решетке твердых тел дислокаций. Основополагающий вклад в теорию затухания упругих колебаний вследствие наличия дислокаций был сделан в работах Келера (1955г.) и Гранато и Люкке (1956г.). Теория Гранато-Люкке подтверждается многочисленными экспериментами.

При наложении механических напряжений на металлический образец изменяются его поликристаллическая структура, микропористость, плотность и количество дислокаций. Совокупность этих изменений является основной физической причиной изменения затухания волн.

В различных экспериментах по методу затухания ультразвука было установлено, что затухание ультразвука с повышением внутреннего напряжения сначала увеличивается линейно, а затем по достижении предела текучести значительно быстрее. Незадолго до достижения разрушающего напряжения наблюдается самое сильное ослабление регистрируемого акустического сигнала. Такую связь между распространением ультразвука и внутренними напряжениями можно объяснить тем, что эти факторы связаны с упругими свойствами материала, с процессами образования дислокаций в кристаллах, со скольжениями границ зерен и звуковой анизотропией.

Новый плодотворный подход к объяснению наблюдаемого увеличения затухания ультразвука с ростом напряжений и деформаций, использующий понятие очагов пластической деформации (ОПД) начат и развит в трудах П.М. Огibalова, Е.П. Тамбовцева, И.Н. Молодцова и др. (1985-2004).

Анализ известных экспериментальных и теоретических работ показал многообразие факторов, влияющих на затухание высокочастотных колебаний в

поликристаллическом материале. Обоснование изменения затухания колебаний в связи с напряженно-деформированным состоянием сводится, в основном, к исследованию и нахождению зависимостей между изменением затухания и изменением какой-либо структурной характеристики материала.

Подобный подход не позволяет прогнозировать величину затухания ультразвука в зависимости от механических свойств. Построение математической модели сплошной среды, описывающей увеличение затухания высокочастотных колебаний с ростом внутренних напряжений, представляется более перспективным подходом, т.к. механические характеристики образцов будут выступать в качестве параметров модели, и таким образом, варьируя эти параметры, можно прогнозировать связь затухания ультразвука с напряженно-деформированным состоянием материала.

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям, выполненным автором, по затуханию ультразвука под действием одноосных растягивающих напряжений в стальных образцах.

Экспериментальные исследования включали измерение эхо-импульсным методом относительного затухания среднечастотного ультразвука (5МГц) в длинных призматических стальных образцах под действием одноосной растягивающей нагрузки. Схема эксперимента показана на рис.1.

Для возбуждения ультразвуковых волн использовался ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66 ПМ с наклонными преобразователями с углом призмы 30° ; таким образом, в образце распространялась вертикально поляризованная, или SV-волна.

Общепринято считать, что в результате распространения в среде форма импульса не искажается, а его амплитуда уменьшается по закону $\exp(-\alpha x)$, где α - коэффициент затухания волн, x - путь, пройденный импульсом. Причем эти представления не распространяются на весь импульс, а справедливы только для некоторой его части. В среде с поглощением упругой энергии наблюдается дисперсия дисперсия волн, которая обуславливает размывание импульса вследствие того, что различные спектральные составляющие импульса

распространяются с различными скоростями. Амплитуда различных спектральных составляющих уменьшается по-разному. В силу этого измерения проводят по фронту сигнала.

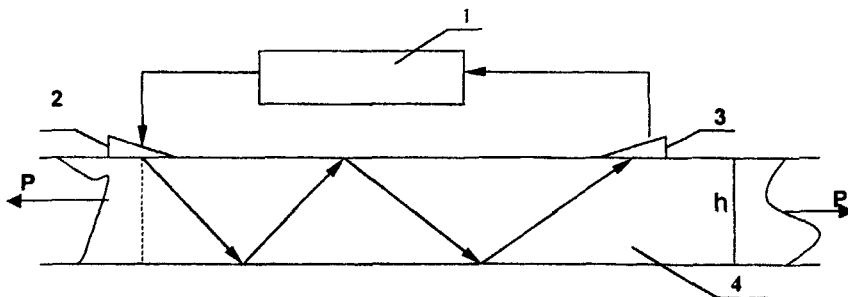


Рис.1. 1 – прибор ДУК – 66ПМ; 2 – ультразвуковой излучатель; 3 – ультразвуковой приемник; 4 – образец; P – растягивающее усилие; стрелками в образце обозначен путь ультразвуковой волны.

Характеристика образцов.

Образцы для испытаний вырезали по ГОСТ 1497-73.

Марка: Сталь 20, Сталь 45.

Состояние: состояние поставки, после термообработки с остыванием в печи.

Размеры: 10x20x400мм; h = 10мм.

Чистота обработки рабочих поверхностей $R_z = 20$.

Параллельность рабочих поверхностей – не хуже 0,02.

Лабораторные эксперименты заключались в следующем. Образец нагружался со скоростью 5мм/мин. При нулевой нагрузке ($P=0$) отмечали значение измеряемого параметра - амплитуду прошедшего ультразвукового сигнала A_0 . Затем, увеличивая нагрузку, отмечали значение P_i и соответствующую этому усилию величину A_i . Таким образом, получали

экспериментальные точки $\{A_i; \sigma_i\}$, где $\sigma_i = \frac{P_i}{S_0}$, S_0 – площадь поперечного сечения образца в ненагруженном состоянии. В части опытов аналогичные измерения проводились и при разгрузке. Значение амплитуды сигнала определяли по экрану ультразвукового дефектоскопа ДУК-66ПМ с точностью $\pm 0,5$ мм, используя масштабную сетку экрана.

Машина МР-100 обеспечивает точность $\pm 1\%$ от измеряемой нагрузки и $\pm 2\%$ от измеряемого удлинения Δl .

Обработанные результаты приведены на графиках (рис.2 и рис.3).

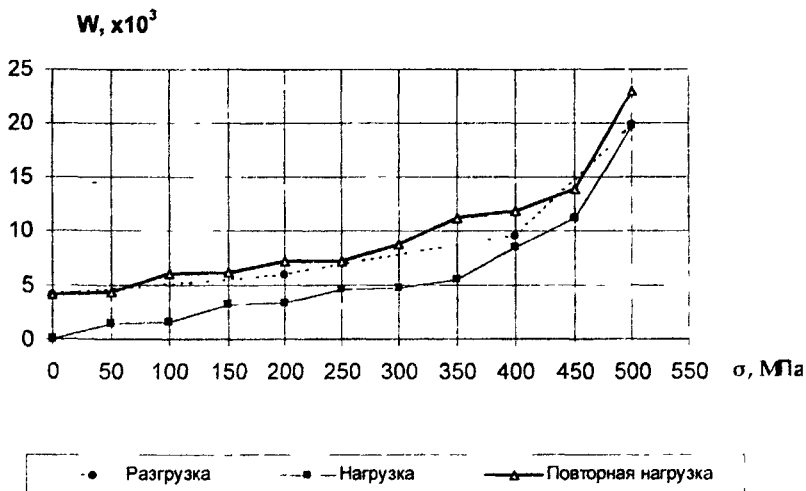


Рис. 2. Связь затухания ультразвука с одноосными растягивающими напряжениями. Материал - Сталь 45 в состоянии поставки;

На графике (рис.3) по оси абсцисс отложена пластическая деформация

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E}$$

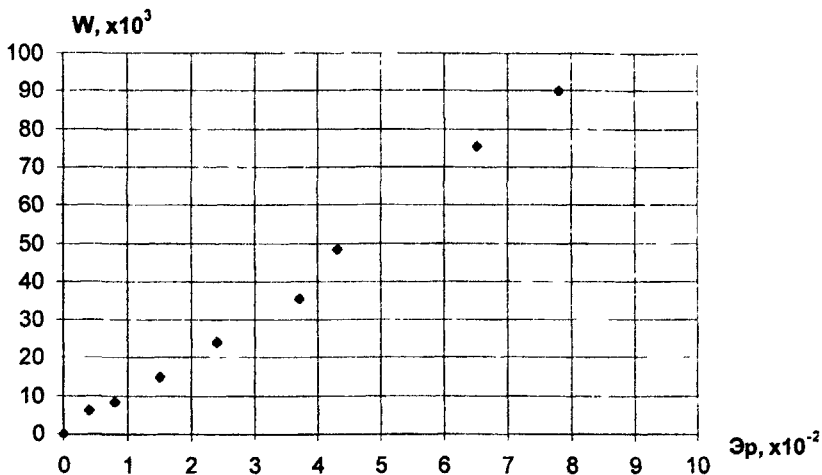


Рис. 3 Связь затухания ультразвука с одноосными растягивающими деформациями, Сталь 20, нормализованная

В экспериментах применялся способ сравнительного измерения затухания по амплитудам импульсов, проходящих одинаковый путь в образцах одинаковой формы при одинаковых условиях контакта с ультразвуковыми преобразователями.

В качестве меры относительного затухания взят параметр $W = \frac{v}{L} \ln \frac{A_0}{A}$, где v – скорость сдвиговой волны в образце, A_0 – амплитуда волны, прошедшей путь L в ненагруженном образце, A – амплитуда волны, прошедшей тот же путь в нагруженном образце. Чтобы обеспечить постоянство базы прозвучивания, применялся следующий способ: преобразователь-приемник при каждом отсчете A , небольшими перемещениями вдоль оси растяжения образца устанавливался в точку максимума принятого сигнала, а затем фиксировался на образце.

Установка преобразователя-приемника происходила во время остановки испытательной машины при достижении значения P_1 . Время остановки разрывной машины для измерения амплитуды не регламентировалось и

составляло в среднем 1-2 мин. Время остановки машины перед началом разгрузки также не регламентировалось и составило до 10 мин.

Если в процессе нагружения достигалось значение напряжения большее, чем σ_T , то при повторной нагрузке относительное затухание оказывалось больше (рис.2), что можно объяснить появившейся структурной анизотропией (рис.4,5). Фактически, при повторной нагрузке мы имеем дело уже с другим материалом.

В экспериментах были достигнуты большие (7-12%) пластические деформации. Микрофотографии структуры образцов до и после снятия нагрузки приведены на рис.4,5.

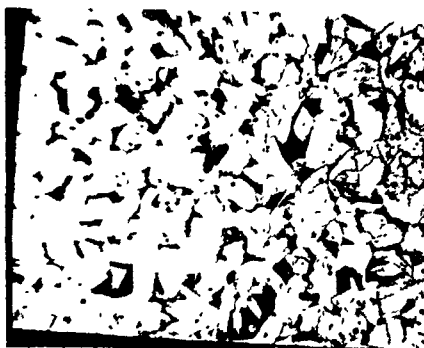


Рис.4. Структура Стали 20 в исходном состоянии, нормализованный образец, $\times 800$



Рис.5. Структура Стали 20 после растяжения, нормализованный образец, $\times 800$, остаточная деформация 7,2%.

Все внешние параметры процесса прозвучивания образцов можно разбить на две группы:

- 1) меняющиеся в процессе растяжения на одном образце;
- 2) меняющиеся от образца к образцу.

К группе 1 можно отнести: разную силу прижима ультразвуковых преобразователей к поверхности образца; смещение преобразователей при деформации образца.

К группе 2 относятся факторы: различная непараллельность поверхностей; разная сила прижима преобразователей; локальная разнородность структуры, различная относительно друг друга установка преобразователей.

Специально разработанные и изготовленные зажимные устройства для ультразвуковых преобразователей, одновременная термообработка всех образцов позволили свести к минимуму влияние вышперечисленных источников погрешностей, и наибольшее различие в уровне сигнала в ненапряженных образцах не превышало 3% по отношению к осредненному значению амплитуды сигнала.

Проведенные эксперименты, а также данные других авторов (О.М. Карнаш, И.Г. Мигаль, В.Н. Максимов, И.Н. Ермолов и др.) позволяют сделать выводы: зависимость затухания ультразвуковой волны от одноосного напряженно-деформированного состояния носит сложный характер; при разгрузке затухание приблизительно линейно зависит от напряжения. В случае выхода материала образца за предел текучести затухание в разгруженном образце всегда больше затухания в исходном образце. В пределах упругости этот эффект с точностью до ошибки измерения не обнаружен.

Для образцов одной и той же марки стали существенную роль играет состояние образца: без термообработки или с термообработкой. Для образцов в состоянии поставки при первом нагружении относительное уменьшение амплитуды сигнала в процессе нагрузки значительно больше, нежели в термообработанном образце.

После разгрузки при повторной нагрузке различие уже незначительное. Надо полагать, что одноосное растяжение образца в состоянии поставки вызывает значительно более сильное изменение его поликристаллической структуры, микропористости, плотности и количества дислокаций, т.е. всех тех причин затухания ультразвука рассмотренных в Главе 1, чем в нормализованном образце.

Глава 3 посвящена математическому моделированию затухания ультразвука в поликристаллическом твердом теле.

Анализ выполненных экспериментов и результаты других авторов показывают, что

- 1) «догрузочные» волны распространяются со скоростью звука в недеформированном теле;
- 2) в нагруженном теле затухание «догрузочных» волн увеличивается с ростом одноосных растягивающих напряжений;
- 3) статические диаграммы $\sigma - \varepsilon$ одноосного состояния имеют выраженный упругий участок для малоуглеродистых и конструкционных сталей.

В математической модели не учитывается реально наблюдаемое в экспериментах затухание ультразвуковых волн в упругой области.

Одномерное напряженно-деформированное состояние в образце описывается уравнениями математической модели в виде

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \mathcal{D}(\varepsilon, \sigma) \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

где приняты обычные в МДТГ обозначения величин; $[\mathcal{D}] = \left[\frac{1}{c} \right]$.

Предположим, что под действием приложенных нагрузок в образце реализуется основное состояние, характеризуемое величинами σ^0, ε^0 .

Измененное состояние от действия возмущающих нагрузок (ультразвуковые волны), характеризуется добавочными напряжениями σ^* и деформациями ε^* , т. е. в данный момент времени: $\varepsilon = \varepsilon^0 + \varepsilon^*$, $\sigma = \sigma^0 + \sigma^*$. Линеаризация системы уравнений (1) в окрестности основного состояния приводит к уравнению 4-го порядка в частных производных для «догрузочных» деформаций ε^* :

$$\rho p^2 \left(\frac{p^2}{E} - E \right) \varepsilon^* = (p^2 - 2\alpha p + \xi^2) \frac{\partial^2 \varepsilon^*}{\partial x^2}, \quad \text{где} \quad p \equiv \frac{\partial}{\partial t}, \quad \text{и} \quad \text{обозначено}$$

$$2\alpha = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} + E \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \quad \xi^2 = E \left(\frac{\partial^2 f}{\partial \sigma \partial \varepsilon} + f \frac{\partial^2 f}{\partial \sigma \partial \varepsilon} \right), \quad \eta = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^2 + f \frac{\partial^2 f}{\partial \sigma^2}.$$

Все производные вычисляются в основном состоянии $(\varepsilon_0, \sigma_0)$.

Принимая решение этого уравнения в виде $\varepsilon^* = A \exp(\omega t + kx)$, получаем

$$\text{спектральное уравнение: } k^2 = \frac{\rho \omega^2 \left(\frac{\omega^2}{E} - E \eta \right)}{\omega^2 - 2\alpha \omega + \xi^2}, \quad \text{которое после преобразований}$$

приводится к виду

$$k^2 = \frac{\rho}{E} (\omega^2 + 2\alpha \omega + 4\alpha^2 - E^2 \eta - \xi^2) + \frac{C_1}{\omega^2 - 2\alpha \omega + \xi^2} + \frac{C_2}{\omega^2 - 2\alpha \omega + \xi^2},$$

$$\text{где } C_1 = \frac{8\alpha^3 \rho}{E} - \frac{4\alpha \rho \xi^2}{E} - 2\alpha \rho E \eta, \quad C_2 = \frac{\rho \xi^4}{E} + \rho \xi^2 E \eta - \frac{4\xi^2 \alpha^2 \rho}{E}.$$

Т.к. образец догружался ультразвуковыми волнами высокой частоты $\nu = 5 \text{ МГц}$, то в полученном выражении для k^2 при больших значениях ω первое слагаемое будет главной частью.

$$\text{Поэтому при } \omega \rightarrow \infty \text{ получим } k^2 \approx \frac{\rho}{E} (\omega^2 + 2\alpha \omega + 4\alpha - E^2 \eta - \xi^2)$$

С другой стороны, из исходной системы уравнений получено уравнение 4-го порядка для «догрузочных» напряжений σ^* :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \gamma' \right) \frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{1}{E} \frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{E} \frac{\partial \sigma^*}{\partial t} + \frac{\xi^2}{E} \sigma^* \right), \quad \text{и соответствующее ему}$$

спектральное уравнение:

$$k^2 = \frac{\rho}{E} (\omega^2 + 2\alpha \omega + \xi^2 + \gamma') + \frac{2\alpha \rho \gamma' \omega}{\omega^2 - \gamma'} + \frac{\rho \gamma'}{\omega^2 - \gamma'}; \quad \gamma' = \frac{\partial^2 f}{\partial \varepsilon^2} f + \left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right)^2$$

При $\omega \rightarrow \infty$ аналогично получим $k^2 \approx \frac{\rho}{E}(\omega^2 + 2\alpha\omega + \xi^2 + \gamma^2)$.

Сравнивая полученные выражения для k^2 можно сделать вывод: на высоких частотах характер затухания переднего фронта волн деформаций, перемещений и напряжений одинаков. Таким образом, в экспериментах можно применять ультразвуковые преобразователи различных типов — это не сказывается на интерпретации экспериментов.

Итак, «догрузочные» напряжения и деформации удовлетворяют уравнению Г. Бэйтмана:

$$\frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial t^2} + 2\alpha \frac{\partial \sigma^*}{\partial t} + \beta^2 \sigma^* = c^2 \frac{\partial^2 \sigma^*}{\partial x^2}$$

Спектральное уравнение для уравнения Бэйтмана: $k^2 = \frac{1}{c^2}(\omega^2 + 2\alpha\omega + \beta^2)$, где

α - коэффициент затухания волны. Поэтому и величина $2\alpha = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} + E \frac{\partial f}{\partial \sigma}$ в уравнении для «догрузочных» деформаций также имеет смысл затухания. Таким образом, построенная математическая модель адекватно описывает проведенные эксперименты.

В общем случае определяющее соотношение вида

$$\sigma_y = \frac{p^2}{(p + \alpha)^2} (\lambda u_{k,k} \delta_y + 2\mu \varepsilon_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad p \equiv \frac{\partial}{\partial t}$$

Г. Бэйтмана для перемещений:

$$\frac{p^2}{(p + \alpha)^2} ((\lambda + \mu) \text{grad div } \bar{u} + \mu \Delta u_i) = \rho p^2 \bar{u}$$

Откуда окончательно получим

$$(\lambda + \mu) \text{grad div } \bar{u} + \mu \Delta \bar{u} = \rho (p + \alpha)^2 \bar{u}.$$

Поэтому для новой функции $U: \bar{u} = \bar{U} e^{-\alpha t}$ получается уравнение Ламэ:

$$(\lambda + \mu) \text{grad div } \bar{U} + \mu \Delta \bar{U} = \rho^2 \bar{U}.$$

Это означает, что в рассматриваемой модели волны распространяются со скоростью упругих волн, но затухают во времени, а, следовательно, и в пространстве.

Для адаптации модели используем аппроксимацию статической диаграммы $\sigma - \varepsilon$ двузвенным линейным сплайном (Рис. 6), т.е., в уравнении состояния

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \varphi(\sigma) F(\varepsilon, \sigma) \text{ полагаем } F(\varepsilon, \sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_r + \frac{E E'}{E - E'} \left(\varepsilon - \frac{\sigma}{E} \right)} - 1, \text{ где}$$

E' - касательный модуль.

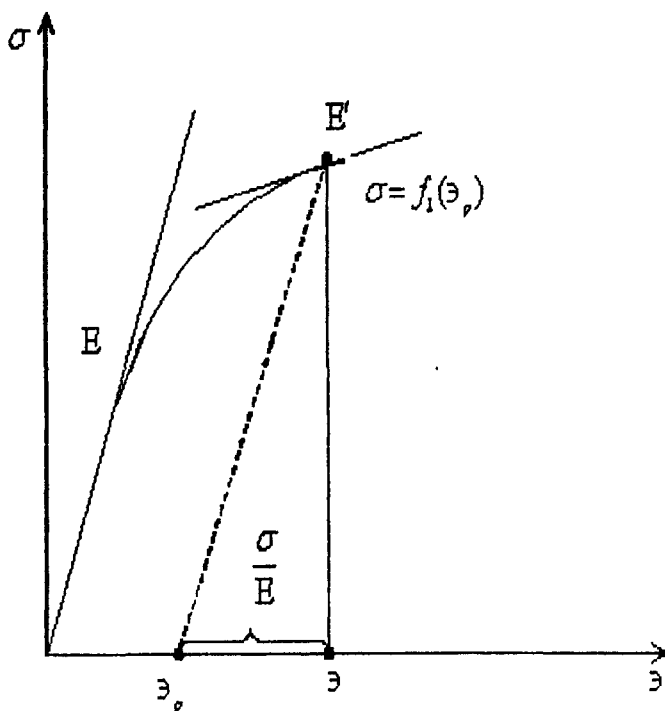


Рис. 6. Диаграмма растяжения $\sigma - \varepsilon$ малоуглеродистой стали

Анализ проведенных экспериментов показывает, что коэффициент затухания α возрастает с ростом σ .

Набор экспериментальных данных и диаграмма растяжения материала позволяют корректно подобрать реализующую этот эффект функцию $\varphi(\sigma)$. В случае одноосного напряженно-деформированного состояния при линейной аппроксимации достаточно положить $\varphi(\sigma) = B\sigma(\sigma - \sigma_s)$, где B определить из эксперимента.

Вычисления

$$\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} = B\sigma(\sigma - \sigma_s) \left[-\frac{\sigma \gamma E}{(\sigma_s + \gamma(E\varepsilon - \sigma))^2} \right],$$

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma} = (2B\sigma - B\sigma_s) \left[\frac{\sigma}{\sigma_s + \gamma(E\varepsilon - \sigma)} - 1 \right] + B\sigma(\sigma - \sigma_s) \times$$

$$\times \left[\frac{1}{\sigma_s + \gamma(E\varepsilon - \sigma)} + \frac{\gamma\sigma}{(\sigma_s + \gamma(E\varepsilon - \sigma))^2} \right]$$

и подстановка результатов в выражение для α приводит к явной зависимости α от параметров модели: $\alpha = \frac{1}{2} \delta B \gamma E^2 \varepsilon_p$, где $\gamma \equiv \frac{E'}{E - E'}$.

Для образца из стали марки Сталь 20, $E = 2 \cdot 10^4$ МПа; $E' = 10^3$ МПа, получена теоретическая зависимость коэффициента затухания α от ε_p : $\alpha = 0,105 \cdot B \cdot 10^8 \varepsilon_p$. Методом наименьших квадратов получено значение $B = 0,1073$, таким образом, $\alpha = 1,127 \cdot 10^6 \varepsilon_p$. На рис. 7 приведены экспериментальные данные и полученная теоретическая кривая.

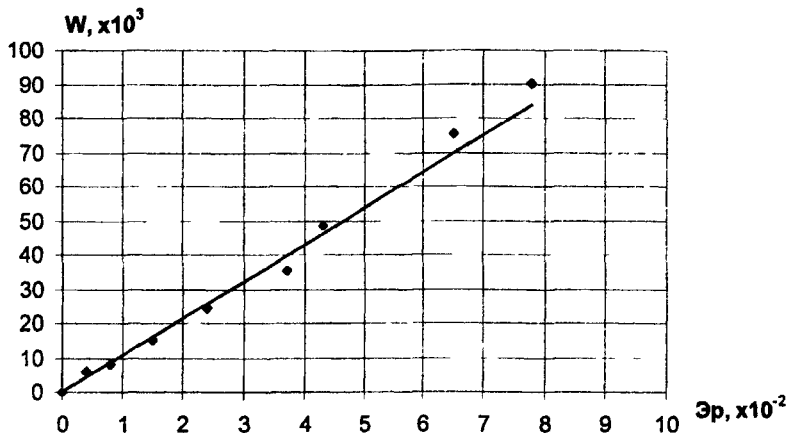


Рис. 4. Связь затухания ультразвука с одноосными растягивающими деформациями, Сталь 20, нормализованная. Сплошная линия соответствует теоретической зависимости.

Имея эталонную (тарировочную) кривую $W = W(\varepsilon_p)$ или $W = W(\sigma)$ для конкретного образца можно оценить внутренние напряжения в элементе конструкции, находящемся в условиях одноосного напряженно-деформированного состояния, в случае если в нем можно выделить участок, идентичный тарировочному образцу с базой прозвучивания L . Для того, чтобы можно было использовать построенную эталонную кривую для конкретных изделий с другой базой измерения L_1 , достаточно масштабировать эталон:

$$W_1 = W \frac{L_1}{L}.$$

В Приложении приведены статические диаграммы $\sigma - \varepsilon$ одноосного растяжения малоуглеродистой стали, микрофотографии структуры образцов, результаты экспериментов по измерению относительного затухания ультразвука в стальных образцах, оформленные в виде таблиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследовано ослабление ультразвука под действием одноосных растягивающих напряжений в упруго-пластической области в стальных образцах. Установлено, что после разгрузки из состояния в пластической области наблюдается остаточное ослабление ультразвука, по величине которого можно судить о достигнутой в процессе нагружения пластической деформации.

2. Предложен и защищен авторским свидетельством СССР способ определения напряженного состояния образца по методу затухания ультразвука.

3. Построена математическая модель, адекватно описывающая явление роста относительного затухания высокочастотных колебаний с увеличением пластической деформации.

4. Установлена аналитическая формула зависимости относительного затухания высокочастотных колебаний от пластической деформации.

5. Предложена методика идентификации параметров модели по результатам экспериментальных измерений и на этой основе показана возможность экспресс-оценки одномерного напряженно-деформированного состояния методом затухания ультразвука.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Толстопятов С.Н. О связи затухания ультразвука с внутренними напряжениями в образце. / ПО «Белэнергомаш». – Белгород, 1987. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ, №391 – эм. 87 Деп.

2. Толстопятов С.Н. К вопросу о связи затухания ультразвука с остаточными напряжениями. // Энергомашиностроение, №7, 1987, С.20-21.

3. Толстопятов С.Н. Зависимос
напряженно-деформированного сост
№2, 1988, С.27-28.

РНБ Русский фонд

2006-4
25580

4. А.с. СССР № 1201756, G 01 N
состояния / С.Н. Толстопятов (СССР
01.02.89.

5. Дудченко Н.И., Павлов В. возможности
неразрушающего контроля конструкционных материалов методом затухания
ультразвуковых волн. // В кн.: Передовые технологии в промышленности и
строительстве на пороге XXI века: сб. докл. Межд. конференция, часть 2,
Белгород; Изд-во БелГТАСМ, 1998, С.506-510.

6. Толстопятов С.Н., Богатырев И.Ф. Исследование затухания ультразвука
при прозвучивании элементов конструкций. // Тезисы докладов международной
научно-производственной конференции «Проблемы сельскохозяйственного
производства на современном этапе и пути их решения», Белгород, 2003. – Изд-
во Белгородской ГСХА, С.126.

7. Молодцов И.Н., Толстопятов С.Н. Возможность контроля одноосного
напряженного состояния деталей горных машин методом затухания
ультразвука. // Сб. докл. научной конференции. Москва; Изд-во Московского
горного университета, 2005, С.7-15.

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97 Подписано в печать
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная
Усл-печ л. 1,0 Уч-изд л. 0,9
Тираж 98 экз. Заказ 98.

Тульский государственный университет
300600, г.Тула, просп.Ленина, 92.

Отпечатано в редакционно-издательском центре
Тульского государственного университета.
300600, г Тула, ул.Болдина, 151