

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

АРУТЮНЯН АЛЕКСАНДР РОБЕРТОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ  
АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В  
ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

01.02.04 – Механика деформируемого  
твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2009

Работа выполнена на кафедре теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
СУДЬЕНКОВ Юрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
ЛОКОЩЕНКО Александр Михайлович  
(Московский государственный университет)

доктор технических наук, профессор  
МЕЛЬНИКОВ Борис Евгеньевич  
(Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет)


Ведущая организация: Институт проблем машиноведения  
Российской академии наук

Защита состоится “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_ часов на заседании совета Д.212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

 С.А. Зегзда

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Согласно мировой статистике основная доля разрушений в инженерной практике происходит по причине усталости. Поэтому проблема усталости является одной из наиболее актуальных научно-технических проблем. Несмотря на многочисленные исследования, полного решения проблемы усталости до сих пор не найдено. Решение этой проблемы требует дополнительных комплексных экспериментальных и теоретических исследований. При этом возникает необходимость разработки новых и совершенствования уже существующих методов неразрушающего контроля материалов на различных стадиях изготовления и, в особенности, в процессе эксплуатации элементов конструкций и изделий. Этими обстоятельствами определяется актуальность выбора темы диссертационной работы.

В работе представлены результаты исследования изменения физико-механических свойств материалов методом оптико-акустической диагностики в ходе циклических нагружений.

Приведены исследования чувствительности и разрешающей способности усовершенствованной методики оптико-акустической диагностики механических и физических характеристик, обусловленных перестройкой структуры конструкционных материалов. Предложенные методы обработки и анализа эволюции формы субмикросекундных акустических импульсов, распространяющихся в материале, позволили получать информацию и об изменении масштабов структурной перестройки в материалах в процессе циклических испытаний.

Результаты исследований обнаружили общность изменения акустических свойств различных материалов (металлы, полимеры, композиты) в ходе циклических испытаний, а также наличие качественно отличных этапов этих изменений.

В работе предложен новый критерий определения усталостной прочности материалов. При формулировке критерия используется энергетический подход, который, наряду с силовым, является фундаментальной основой получения и обоснования закономерностей деформирования и разрушения материалов и конструкций.

### **Цели работы:**

1. Исследование возможностей применения оптико-акустического метода для диагностики акустических свойств материалов. Выбор оптимальной схемы и разработка макета оптико-акустического дефектоскопа.

2. Экспериментальное исследование чувствительности и разрешающей способности оптико-акустического дефектоскопа на модельных образцах с естественными и искусственными дефектами с целью определения эффективности метода для диагностики состояния элементов конструкций в процессе эксплуатации.

3. Проведение экспериментальных исследований изменений акустических свойств различных конструкционных материалов, вызванные изменениями их структуры при испытаниях на циклический изгиб.

4. Формулировка критерия усталостной прочности, основанного на использовании результатов усталостных испытаний и литературных данных по измерению скрытой энергии деформации.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Усовершенствована методика оптико-акустической диагностики физико-механических свойств материалов и на ее основе создан макет оптико-акустического дефектоскопа. Предложены методы обработки акустических сигналов, позволяющие связать изменения механических свойств с изменениями структуры материалов.

2. Получены экспериментальные зависимости изменения скорости звука, затухания, дисперсии спектрального распределения передаточной функции от числа циклов нагружения в опытах на циклический изгиб образцов из инструментальной стали, ПММА, стеклопластика.

3. Установлено наличие качественно различных этапов в изменении модулей упругости материалов в процессе циклических испытаний, обусловленных принципиальным различием этапов перестройки структуры.

4. Введен параметр поврежденности, основанный на изменении скрытой энергии деформации. Предложено кинетическое уравнение для параметра поврежденности, решением которого является логистическая функция. Сформулирован критерий усталости, основанный на введенном параметре поврежденности и учитывающий частоту нагружения.

**Практическая и теоретическая ценность.** Практическая ценность работы определяется полученными экспериментальными закономерностями изменения механических характеристик различных конструкционных материалов, обусловленных перестройкой структуры в процессе циклических нагружений.

Полученные зависимости изменения упругих модулей материалов различного класса от числа циклов нагружения могут быть полезны как для более глубокого понимания физических процессов, происходящих при циклических нагружениях, так и для анализа состояния инженерных объектов.

Разработанная оптико-акустическая методика дефектоскопии, дающая возможность с высокой точностью отслеживать изменения физико-механических свойств материалов, позволяет рекомендовать метод для экспресс-анализа состояния элементов конструкций в процессе эксплуатации.

Теоретическая ценность работы состоит в использовании понятия скрытой энергии деформации при формулировке критерия усталости и возможном прогнозировании работоспособности конструкционных материалов в области многоциклового и гигациклового усталости.

**Достоверность основных научных положений.** Достоверность исследований базируется на применении высокоточной методики оптико-акустической диагностики с использованием современных приборов для регистрации сигналов, а также проведением серии испытаний и применением стандартных статистических методов обработки экспериментальных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается корреляцией изменения таких независимых характеристик как затухание и скорость звука в образцах в процессе испытаний, а также качественно сходным характером изменения модулей упругости различных материалов в ходе циклических испытаний.

Критерий усталостной прочности сформулирован с учетом скрытой энергии деформации по результатам опытов, полученных известными в физике и механике материалов методами.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ возможностей применения оптико-акустического метода для исследования изменений физико-механических свойств материалов вследствие изменения их структуры и методика спектральной обработки сигналов для оценки масштабов структурных перестроек.

2. Результаты исследования закономерностей изменения акустических свойств, в том числе и модуля упругости, различных конструкционных материалов в условиях циклических нагружений.

3. Выявлено наличие различных этапов изменения физико-механических свойств материалов, обусловленное принципиальным различием этапов структурной перестройки материалов в процессе циклических испытаний: этапа адаптации к изменению внешних условий и этапа накопления повреждаемости.

4. Критерий усталостной прочности, основанный на понятии скрытой энергии деформации. Частотная зависимость кривых усталости в рамках предложенного критерия.

**Апробация работы.** Результаты научных исследований докладывались на XXXIII, XXXIV, XXXV, XXXVI Международных летних школах “Актуальные проблемы механики”, Санкт-Петербург, 2005, 2006, 2007, 2008; Научной конференции молодых ученых по механике сплошных сред “Поздеевские чтения”, Пермь, 2006; Международной конференции “Механика композитов и оптимальное проектирование”, посвященной памяти профессора В.Ц. Гнуни, Армения, Ереван, 2006; XXII Международной конференции “Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов”, Санкт-Петербург, 2007; Международной конференции “Актуальные проблемы механики сплошной среды”, посвященной 95-летию академика НАН Армении Н.Х. Арутюняна, Армения, Ереван, 2007; VI Международной конференции “Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред”, Армения, Горис-Степанакерт, 2008; Семинаре кафедры теории упругости мат.-мех. факультета СПбГУ под руководством академика РАН Н.Ф. Морозова, Санкт-Петербург, 2008; Секции строительной механики и надежности конструкций Санкт-Петербургского Дома ученых РАН им. А.М. Горького, Санкт-Петербург, 2009; Семинаре лаборатории прочности материалов мат.-мех. факультета СПбГУ, Санкт-Петербург, 2009.

**Публикации.** Результаты научных исследований опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 7 статьях. В изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликована одна статья. В работах [1, 5, 6, 13] диссертанту принадлежит формулировка критерия усталостного разрушения с учетом параметра поврежденности и сравнение с результатами опытов; соавтору принадлежит идея использования логистической функции для описания накопления скрытой энергии деформации. В работах [2-4, 7-11] диссертанту принадлежат участие в разработке оптико-акустического дефектоскопа, исследования его чувствительности и разрешающей способности, разработка методики проведения циклических испытаний, проведение экспериментальных исследований, обработка данных и участие в анализе полученных результатов; Ю.В. Судьенкову принадлежит разработка оптико-акустического дефектоскопа и идеология его применения для исследований изменения структуры материалов, в частности, в ходе циклических испытаний, участие в анализе и трактовке результатов исследований; Б.А. Зимину принадлежит методика

обработки акустических измерений с позиций передаточной функции, характеризующей изменение внутренней структуры материала.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 129 наименований. Текст работы изложен на 145 страницах, содержит 63 рисунка и 1 таблицу.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи работы, формулируются основные результаты, выносимые на защиту, отражается их научная новизна.

**В первой главе** приводится краткий обзор исторического развития и современных тенденций проблемы усталостной прочности, а также основных методов исследования изменения внутренней структуры материалов, определяющие их физико-механические свойства. Проведенный обзор литературных источников показывает необходимость проведения исследований в области многоциклового и гигациклового усталости, где напряжения малы и, следовательно, разрушения подготавливаются за счет перестройки структуры материалов. Это и определяет необходимость разработки новых и совершенствования уже существующих методов неразрушающего контроля материалов и конструкций.

**Вторая глава** посвящена исследованию возможностей применения оптико-акустического метода для измерения упругих свойств и контроля структурных перестроек материалов.

В основе оптико-акустического (ОА) метода лежит ОА эффект, под которым понимают термооптическое возбуждение акустических волн в среде при поглощении в ней модулированного по интенсивности светового (лазерного) излучения. Основные принципы лазерного термооптического возбуждения звука описаны в монографиях Жарова и Летохова, Гусева и Карабутова, Лямшева, Бондаренко.

Анализ эффективности ОА-преобразования позволил выбрать оптимальную методику и разработать оптимальную конструкцию ОА дефектоскопа.

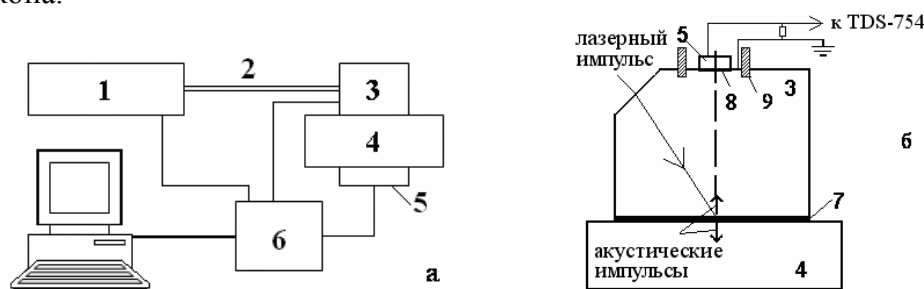


Рис. 1. Блок-схема оптико-акустического дефектоскопа (ОАД) (а) и схема оптико-акустической (ОА) ячейки (б): 1 – лазер, 2 – оптическое волокно, 3 – оптико-акустическая ячейка, 4 – исследуемый образец, 5 – пьезодатчик из ПВДФ пленки, 6 – цифровой осциллограф TDS–754, 7 – поглощающий слой, 8 – отражающий слой, 9 – канавка.

На рис. 1, а приведена блок-схема макета оптико-акустического дефектоскопа (ОАД), основным элементом которого являются разработанная оптико-акустическая (ОА) ячейка (рис. 1, б), совмещающая функции

оптического и акустического волноводов, а также эффективного термоакустического преобразователя свет-звук. ОАД позволяет проводить измерения при одностороннем доступе к исследуемому объекту или при одновременном контроле проходящих и отраженных акустических импульсов. Для возбуждения акустических сигналов используется лазер 1 (рис. 1) с модулированной добротностью на неодимовом стекле. Длительность импульса излучения равна  $15 \cdot 10^{-9}$  с, длина волны – 1,06 мкм, энергия  $\leq 3$  мДж. Ширина спектра, воспроизводимая датчиком, была не менее 70 МГц.

Исследования разрешающей способности ОАД проводились на модельных образцах с естественными и искусственными дефектами. Одним из таких образцов был образец из кварцевого стекла размером  $21 \times 30 \times 30$  мм с естественным дефектом в виде газового пузырька. Размеры дефекта  $0,25 \times 0,4$  мм. На рис. 2, а, б приведены осциллограммы акустических импульсов и увеличенные фрагменты эхо-импульсов (отраженных от свободной поверхности образца) для бездефектной и дефектной областей этого образца.

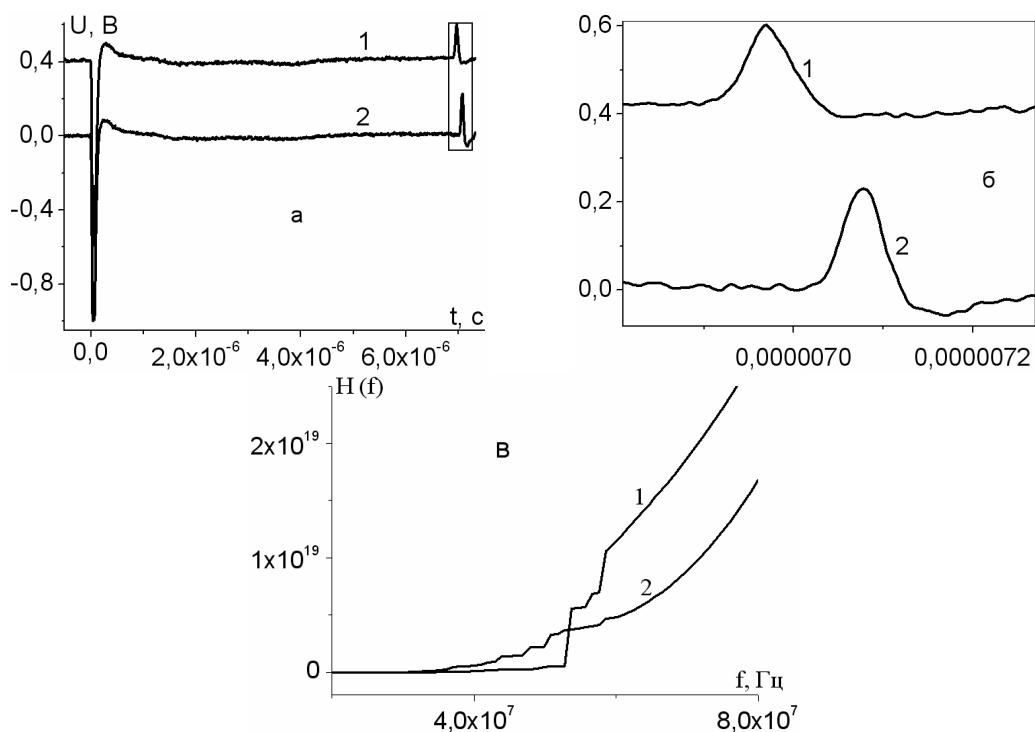


Рис. 2. Осциллограммы акустических импульсов (а), увеличенный фрагмент выделенной области (б) и частотные зависимости передаточной функции  $H(f)$  (в) для образца из кварцевого стекла: 1 – бездефектная область образца, 2 – дефектная область образца.

Отраженных от дефектов сигналов в образце из кварцевого стекла (рис. 2, а, б) практически не наблюдается. В тоже время заметны различия формы донных импульсов для бездефектных и дефектных областей образца (рис. 2 б), обусловленные изменением спектров эхо-импульсов за счет рассеяния акустической волны на дефекте. Но эти изменения формы не дают количественной информации, что не позволяет однозначно определить наличие или отсутствие дефектов в образце. В этой связи была предложена методика спектрального анализа, позволяющая однозначно выявлять наличие дефектов в образце.

В общем виде исследование структуры материала сводится к решению следующего интегрального уравнения:

$$F(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) H(y-x) dx, \quad (1)$$

где для нашего случая  $f(x)$  – это зондирующий сигнал “вход”,  $F(y)$  – прошедший, или донный сигнал – “выход”,  $H$  – передаточная функция – характеристика исследуемой среды.

Можно показать, что отношение спектров мощности “донного” или прошедшего акустического импульса и зондирующего сигнала позволяют определить зависимость дисперсии спектрального распределения передаточной функции от частоты ( $H(f)$ ), характеризующую структуру исследуемого материала:

$$H(f) = \int \frac{P(f)}{P_z(f)} f^2 df, \quad (2)$$

где  $P(f)$  – спектр мощности “донного” или прошедшего акустического импульса,  $P_z(f)$  – спектр мощности зондового акустического импульса.

На рис. 2, в приведены частотные зависимости  $H(f)$  бездефектных областей и областей с дефектами для образца из кварцевого стекла. Как видно, наблюдается сильное влияние дефектов на характер этих зависимостей.

Анализ осциллограмм дает возможность определять: скорость звука, затухание, а также изменение спектров акустических сигналов при распространении по образцу. Проведенные оценки погрешностей определения этих величин показали, что погрешность определения скорости звука в образцах не превышала 0,1%, а затухания – 0,2%.

**Третья глава** посвящена исследованию закономерностей изменения акустических свойств материалов при циклических испытаниях с использованием оптико-акустического метода.

Были проведены испытания на циклический изгиб образцов в виде пластин из различных конструкционных материалов с размерами нагружаемой части  $\sim 3 \times 30 \times 150$  мм. Частоты нагружения были равны 15 Гц и 27 Гц. Длительность воздействия нагрузки (10–15) мс. Через каждые  $\sim 5 \cdot 10^4$  циклов нагружения проводился контроль акустических свойств образца с помощью ОАД в режиме на отражение. Область контроля располагалась на расстоянии  $\sim 10$  мм от заделки. В исследуемых образцах измерялись зависимости скорости звука, затухание акустических импульсов и анализировалось изменение их спектральных характеристик  $H(\Delta f, N)$ .

Величины напряжений в заделке для образцов из инструментальной стали, ПММА и стеклопластика находились в упругой области. Образцы из инструментальной стали и оргстекла были доведены до разрушения, при этом число циклов составило  $\sim (8-9) \cdot 10^5$  и  $\sim (8-9) \cdot 10^6$ . Для образцов из стеклопластика эксперименты останавливались с появлением признаков расслоения при числе циклов нагружения  $\sim (12-13) \cdot 10^6$ .

Для рассматриваемых образцов экспериментально определялись зависимости относительных изменений скорости звука  $\Delta c/c_0$ , затухания  $\Delta \alpha/\alpha_0$  и дисперсии спектрального распределения передаточной функции  $(H_N - H_0)/H_0 \cdot H_{max}$  от числа циклов нагружения. На рис. 3 представлены



экспериментальные зависимости  $\Delta c/c_0$  и  $\Delta \alpha/\alpha_0$  для образца из ПММА. Каждая экспериментальная точка соответствует усреднению по 10 измерениям. Как видно (рис. 3), наблюдается существенный разброс экспериментальных точек, что обусловлено немонотонностью процесса структурных перестроек. Для выявления общей тенденции изменения измеряемых характеристик проводилось сглаживание экспериментальных данных методом текущего среднего (жирные линии). Отметим также достаточно хорошую корреляцию измеряемых в эксперименте зависимостей от числа циклов, в частности для зависимостей изменений скорости звука и затухания.

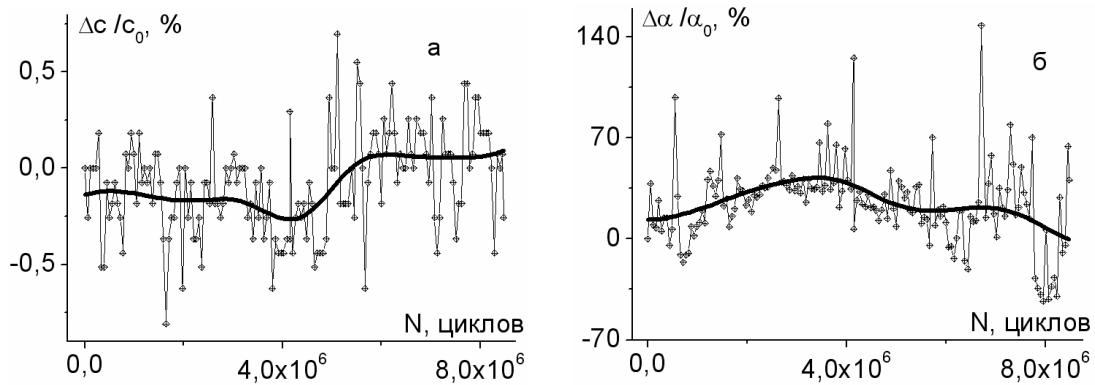


Рис. 3. Зависимость относительных изменений скорости звука и затухания от числа циклов нагружения для образца из ПММА.

Значения нормированного модуля упругости для каждого из рассматриваемых материалов представлены на рис. 4. Наблюдается общность в поведении рассматриваемых характеристик для столь различных материалов: металлы, полимеры, композиты.

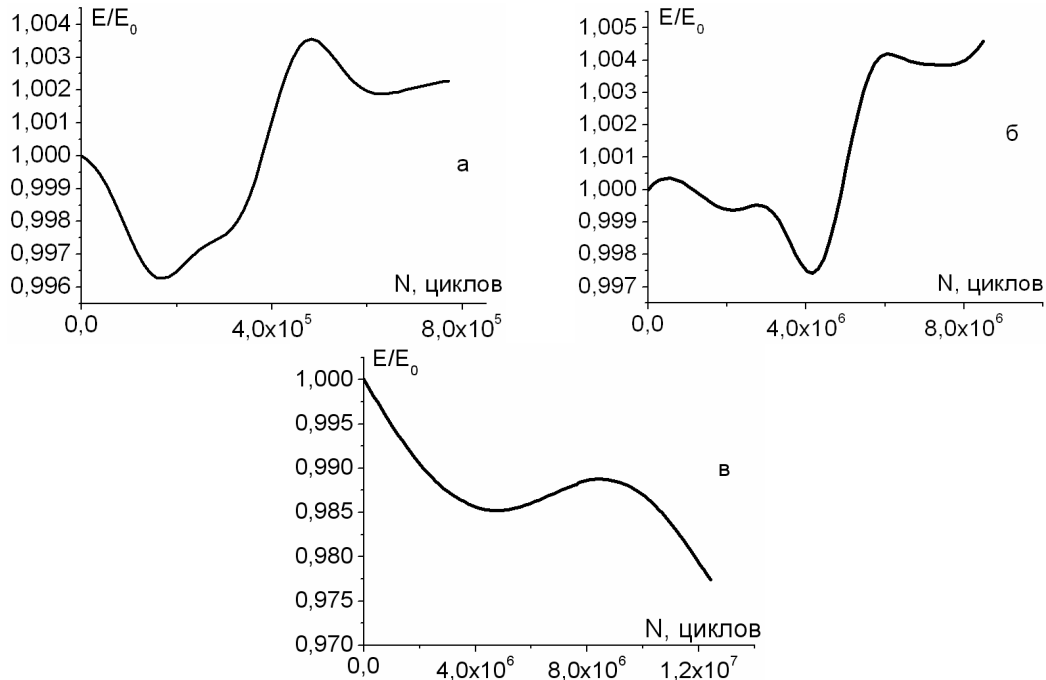


Рис. 4. Зависимости изменения нормированного модуля упругости для образцов из инструментальной стали (а), ПММА (б) и стеклопластика (в) от числа циклов нагружения.

Анализ результатов экспериментов (рис. 3, 4) показывает, что для инструментальной стали, ПММА и стеклопластика наблюдаются два достаточно четко выраженных этапа при циклических нагружениях, в которых поведение рассматриваемых характеристик существенно различается. Поэтому можно предположить, что долговечность материалов при циклических нагружениях определяется двумя этапами – этапом адаптации к внешней нагрузке и этапом накопления повреждений. Продолжительность этих этапов определяется как исходной структурой образцов, так и параметрами внешней нагрузки.

Применение оптико-акустической методики диагностики открывает дополнительные возможности при анализе частотных зависимостей затухания, что позволяет оценить характер изменения масштабных уровней перестройки структуры материалов.

Предполагая, что существенные изменения частотных зависимостей затухания определяются в основном изменением процесса рассеяния акустических волн на внутренней структуре образцов и, выбрав в качестве модели рассеяния модель Релея, частотную зависимость затухания можно связать с масштабом элементов структуры соотношением:

$$\alpha(f) \sim \frac{n(D)D^3 f^4}{c^4}, \quad (3)$$

где  $n(D)$  – распределение дефектов,  $D$  – размер дефектов,  $f$  – частота,  $\alpha(f) = \ln(P(f)/P_z(f))$ ,  $P(f)$  – спектр мощности “донного” или прошедшего акустического импульса,  $P_z(f)$  – спектр мощности зондового акустического импульса. Эти зависимости для образца из инструментальной стали представлены на рис. 5.

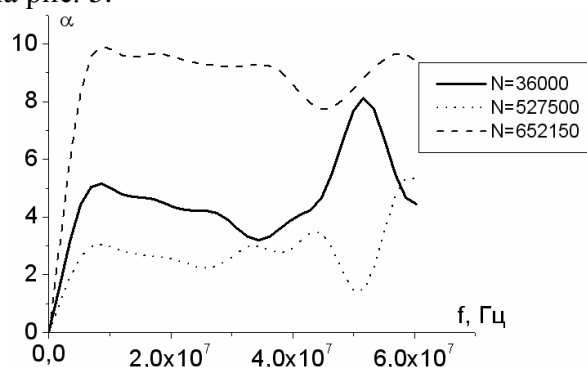


Рис. 5. Частотные зависимости затухания для различного числа циклов нагружения для образца из инструментальной стали.

Так как при циклических испытаниях нас интересуют изменения внутренней структуры, то информативнее является относительное распределение дефектов, которое для образцов из стали и ПММА представлено на рис. 6. Различный характер зависимостей относительного распределения дефектов от их размера для металлов (рис. 6, а) и полимеров (рис. 6, б) определяется значительным отличием их внутренних структур. Для материалов, имеющих ярко выраженную структуру, например, сталь, основные изменения структуры происходят на размерах, сопоставимых со средним размером зерна. Для стали пик зависимости относительного распределения дефектов от их размера наблюдается при размере  $D \approx 27$  мкм. В оргстекле изменения происходят на всем интервале размеров структурных элементов.

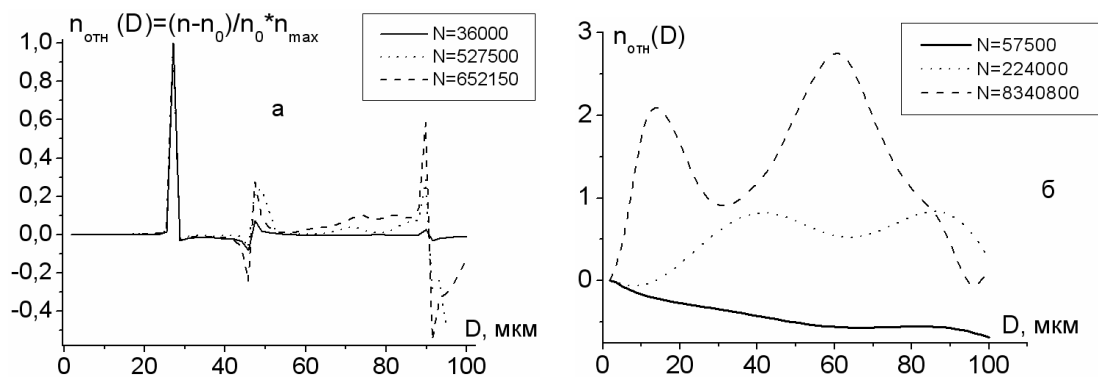


Рис. 6. Относительное распределение дефектов от их размера для различных циклов нагружения для образца из инструментальной стали (а) и ПММА (б).

Анализ этих результатов показывает, что на этапе накопления повреждаемости с ростом числа циклов для всех материалов наблюдается увеличение количества крупномасштабных структурных элементов.

Таким образом, предложенный и проведенный анализ изменения частотных зависимостей затухания позволяет выявить изменение масштабов перестройки структуры материалов в процессе циклических испытаний.

**В четвертой главе** разрабатывается критерий усталостного разрушения, учитывающий величину скрытой энергии деформации.

В процессе деформации в материалах происходят значительные изменения, приводящие к увеличению внутренней энергии, при этом часть энергии деформации выделяется в виде тепла. Таким образом, работа деформации идет на изменение внутренней энергии (скрытая энергия) и на нагревание образца. Как показывают литературные данные (Треска, Хорт, Тейлор, Феррен, Квини, М.А. Большанина, В.Е. Панин и др.), скрытая энергия деформации в среднем составляет 10-15 % от общей энергии деформации. Согласно уточненным экспериментальным данным Хоткевича, поглощенная энергия при малых деформациях составляет величину, близкую к 100% от затраченной на деформирование работы и монотонно уменьшается с увеличением степени деформации.

Как следует из результатов исследований (рис. 3, 4), зависимости различных физико-механических характеристик от числа циклов нагружения имеют два четко выраженных участка и точку перегиба, которые могут быть описаны логистической функцией. Можно предположить, что циклическая прочность определяется количеством накопленной в образце скрытой энергии деформации, которая в момент разрушения достигает критической величины. Это положение используется при формулировке критерия усталостной прочности.

Известно, что логистическая функция является решением кинетического уравнения следующего вида

$$\frac{d\gamma}{d\varepsilon} = A \gamma (\gamma_* - \gamma), \quad (4)$$

где \$A\$, \$\gamma\_\*\$ – параметры, которые в работе считаются функциями напряжения \$A = A(\sigma)\$, \$\gamma\_\* = \gamma\_\*(\sigma)\$.

Считаем, что параметр  $\gamma$  в уравнении (4) характеризует относительное изменение скрытой энергии деформации  $\gamma = W / W_*$ , где  $W$  – текущая,  $W_*$  – предельная величины скрытой энергии деформации. Причем  $\gamma_0 \leq \gamma \leq \gamma_*$ , где  $\gamma_0$ ,  $\gamma_*$  – соответственно, начальное и предельное значения параметра  $\gamma$ ,  $\gamma_0 < \gamma_* \leq 1$ .

Решение уравнения (4) при начальном условии  $\varepsilon = 0$   $\gamma = \gamma_0$  имеет вид

$$\gamma = \frac{\gamma_*}{1 + \left( \frac{\gamma_*}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot e^{-A\varepsilon\gamma_*}} \quad (5)$$

Таким образом, в начальном состоянии  $\varepsilon = 0$ ,  $\gamma = \gamma_0 = W_0 / W_*$ , где  $W_0$  – начальная величина скрытой энергии деформации, которая может быть определена экспериментально.

Соотношение (5) показано на рис. 7 сплошной линией, кривой с точками отмечены результаты соответствующих экспериментов для образцов из алюминиевого сплава 2024-T351 согласно работе Розакиса. Аналогичные экспериментальные кривые были получены В.Н. Куниным.

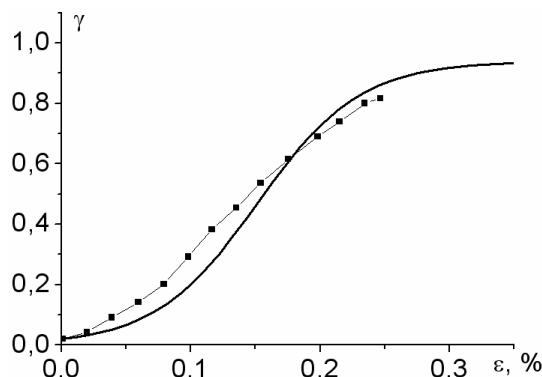


Рис. 7. Логистическая функция согласно соотношению (5) – сплошная линия, точки – результаты экспериментов для образцов из алюминиевого сплава 2024-T351.

Наблюдается хорошее согласие опытных данных накопления скрытой энергии деформации и теоретической зависимости. Считая, что в момент разрушения  $\varepsilon = \varepsilon_*$ ,  $\gamma = k \cdot \gamma_*$ , где  $k$  – постоянная,  $0,5 \leq k \leq 1$ , из (5) получим деформационный критерий разрушения

$$\varepsilon_* = \frac{1}{A\gamma_*} \ln \left( \frac{k}{k-1} \left( \frac{\gamma_*}{\gamma_0} - 1 \right) \right) \quad (6)$$

Формула (6) может быть использована для формулировки критерия разрушения при циклических нагружениях.

В случае гармонического циклического нагружения с ростом частоты время нахождения образца под нагрузкой в течение одного цикла сокращается, поэтому уменьшается величина остаточной деформации, накопленной за один цикл нагружения. Для учета этого обстоятельства вводится приведенное время  $z = t \cdot f^{-a}$  ( $t$  – обычное время,  $f$  – частота нагружения,  $a$  – постоянная).

Для описания кривых накопления остаточной деформации при циклических нагружениях используется степенной закон, связывающий скорость продольной деформации  $\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dz}$  ( $\varepsilon = \ln l/l_0$ , где  $l_0, l$  – начальная и текущая длины образца соответственно) с напряжением  $\sigma$

$$\frac{1}{l} \frac{dl}{dz} = B\sigma^m = B\sigma_0^m \left( \frac{F_0}{F} \right)^m, \quad (7)$$

где  $B, m$  – постоянные,  $F_0, F$  – соответственно, начальная и текущая площади поперечного сечения образца,  $\sigma = P/F = \sigma_0 F_0/F$ ,  $\sigma_0 = P/F_0$ ,  $P$  – растягивающая сила.

Для рассмотрения общего случая вязко-хрупкого разрушения вводится текущий коэффициент поперечной деформации  $\nu = -\varepsilon_y/\varepsilon_x = -\varepsilon_z/\varepsilon_x$ . Учитывая геометрическое соотношение  $F_0/F = (l/l_0)^{2\nu}$ , уравнение (7) можно записать в виде

$$\frac{1}{l} \frac{dl}{dz} = B\sigma_0^m \left( \frac{l}{l_0} \right)^{2m\nu}. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) при начальном условии  $z=0$  ( $t=0$ ),  $l=l_0$  и рассматривая момент разрушения  $z=z_p$ , получим следующую зависимость для предельной деформации  $\varepsilon = \varepsilon_*$

$$\varepsilon_* = \frac{1}{2\nu_* m} \ln \left( 1 - 2\nu_* m B \sigma_0^m z_p \right)^{-1}. \quad (9)$$

Сравнивая формулы (6) и (9) и, переходя от времени к числу циклов, получим следующий критерий усталостной прочности

$$N\sigma_0^m = \frac{f^{(1+a)}}{2\nu_* m B} \left[ 1 - \left( \frac{k}{1-k} \left( \frac{\gamma_*}{\gamma_0} - 1 \right) \right)^{\frac{2m\nu_*}{A\gamma_*}} \right]. \quad (10)$$

Из формулы (10) можно получить критерии малоциклового и многоциклового разрушения. В первом случае следует считать  $\nu_* = 0,5$ . Во втором случае выполняются приближенные соотношения  $F_0/F \approx 1$ ,  $\nu_* \approx 0$ . В этом случае критерий усталости запишется в виде

$$N\sigma_0^m = \frac{f^{(1+a)}}{A\gamma_* B} \ln \left[ \frac{k}{1-k} \left( \frac{\gamma_*}{\gamma_0} - 1 \right) \right]. \quad (11)$$

Результаты экспериментальных исследований по поглощению энергии при циклических нагружениях показывают, что с увеличением напряжения величина скрытой энергии деформации в момент разрушения будет уменьшаться. Учитывая это обстоятельство,  $\gamma_*$  будем задавать в виде убывающей степенной или экспоненциальной зависимости от напряжения:

$$\gamma_* = (1 + c \cdot \sigma)^{-\beta}, \quad (12)$$

$$\gamma_* = e^{-\alpha \sigma}, \quad (13)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $c$  – постоянные.

С учетом (12) и (13), критерий усталости (11) запишется, соответственно

$$N\sigma_0^m = \frac{f^{(1+a)} \cdot (1 + c\sigma_0)^\beta}{AB} \ln \left( \frac{k}{k-1} \left( \frac{(1 + c\sigma_0)^\beta}{\gamma_0} - 1 \right) \right), \quad (14)$$

$$N\sigma_0^m = \frac{f^{(1+a)}}{AB \cdot e^{-\alpha\sigma_0}} \ln \left( \frac{k}{k-1} \left( \frac{e^{-\alpha\sigma_0}}{\gamma_0} - 1 \right) \right). \quad (15)$$

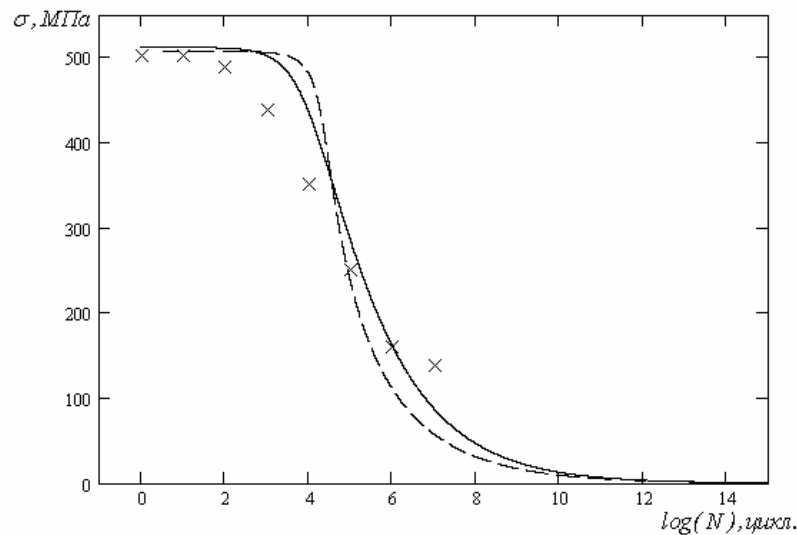


Рис. 8. Кривые усталости согласно критериям (14) (сплошная линия) и (15) (пунктирная линия), крестики – результаты экспериментов для образцов из алюминиевого сплава 2024-Т3.

Теоретические кривые усталости, согласно критериям (14), (15), сравнивались с результатами опытов на осевое циклическое растяжение листовых образцов из алюминиевого сплава 2024-Т3. Эти кривые показаны на рис. 8, соответственно, сплошной и пунктирной линиями. Как видно, теоретические кривые хорошо описывают экспериментальные точки на всем диапазоне кривых усталости.

Предварительные расчеты показывают, что предложенный критерий усталости описывает наблюдаемую в опытах зависимость циклического поведения металлических материалов от частоты нагружения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты и выводы.

1. Разработан макет высокочувствительного оптико-акустического дефектоскопа, позволяющий проводить измерения при одностороннем доступе к исследуемому объекту или при одновременном контроле проходящих и отраженных акустических импульсов. Показана перспективность его применения для исследований изменения физико-механических свойств

материалов вследствие структурных перестроек в процессе циклических испытаний.

2. Исследования при циклических испытаниях на изгиб изменений физико-механических свойств (скорости звука, затухания, дисперсии спектрального распределения передаточной функции и модуля упругости) материалов показали, что зависимости этих изменений от числа циклов нагружения для различных материалов (металлы, полимеры и композиты) имеют качественно сходный характер.

3. Полученные зависимости изменения физико-механических свойств материалов при циклических нагрузках позволили выделить два различных этапа структурных преобразований, определяющих эти зависимости. Этап структурных перестроек, обусловленный стремлением системы придти к состоянию с минимумом внутренней энергии – этап адаптации. Второй этап – этап накопления повреждений, обусловленный стремлением системы к образованию более мощных каналов диссипации, например, за счет создания дополнительной сети свободных поверхностей.

4. Предложенная методика анализа эволюции акустических импульсов дала возможность отслеживать изменения характерных масштабов структурных перестроек в процессе циклических испытаний. Показано, что с увеличением числа циклов нагружения для исследованных материалов (на этапе накопления повреждений) наблюдается увеличение количества крупномасштабных структурных элементов.

5. Введен энергетический параметр поврежденности как отношение текущей величины скрытой энергии деформации к ее предельной величине. Для этого параметра сформулировано кинетическое уравнение и получено его решение в виде логистической функции. В предположении, что разрушение образца наступает при достижении параметром поврежденности критической величины, сформулирован критерий усталостной прочности.

6. Конкретизированы функции и параметры полученного критерия и дано сравнение с результатами опытов на осевое циклическое растяжение листовых образцов из алюминиевого сплава. Получено хорошее согласие теоретических и экспериментальных кривых усталости. Показано, что предложенный критерий описывает наблюдаемую в опытах зависимость циклического поведения металлических материалов от частоты нагружения.

#### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Alexander R. Arutyunyan, Robert A. Arutyunyan. The frequency dependence of fatigue fracture criterion // Proceedings of XXXIII Summer School conference “Advanced problems in mechanics”. 28 June – 05 July. 2005. St.-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME. RAS. 2005. P. 7-8.
2. A.R. Arutyunyan, Z.A. Valisheva, B.A. Zimin, Yu.V. Sud'enkov. Investigation of materials structure rearrangements during cyclic experiments // Book of Abstracts. XXXIV Summer School Conference “Advanced Problems in Mechanics” 25 June – 01 July 2006, Saint-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME. RAS. 2006. P. 18.
3. A.R. Arutyunyan, Z.A. Valisheva, B.A. Zimin, Yu.V. Sud'enkov. Rearrangements of materials structure due to cyclic loadings // Proceedings of XXXIV Summer School Conference “Advanced Problems in Mechanics” 25 June – 01 July 2006, Saint-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME. RAS. 2006. P. 33-40.

4. Арутюнян А.Р., Валишева З.А., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Исследования перестройки структуры образцов стали и ПММА в ходе циклических испытаний // Сборник трудов Научной конференции молодых ученых по механике сплошных сред, посвященной 80-летию чл.-корр. АН СССР А.А. Поздеева “Поздеевские чтения” 23-24 марта 2006 г., Пермь. Пермь: Институт механики сплошных сред УрО РАН. 2006. С. 7.
5. Alexander R. Arutyunyan, Robert A. Arutyunyan. Fatigue fracture in the high cycle regime // Тезисы докладов Международной конференции “Механика композитов и оптимальное проектирование”, посвященной памяти профессора В.Ц. Гнуни 25-28 сентября 2006 г., Ереван, Армения. Ереван: Институт механики НАН РА. 2006. С. 60-61.
6. Alexander R. Arutyunyan, Robert A. Arutyunyan. Fatigue fracture in the high cycle regime // Изв. НАН Армении. Механика. 2007. № 1. С. 15-18.
7. A.R. Arutyunyan, B.A. Zimin, Yu.V. Sud'enkov. Investigation of mechanical properties of PMMA in cyclic loadings experiments using an optical-acoustic spectroscopy method // Book of Abstracts. XXXV Summer School Conference “Advanced Problems in Mechanics” 25-28 June 2007, Saint-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME. RAS. 2007. P. 25.
8. Арутюнян А.Р., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Исследование механических свойств конструкционных материалов методом оптико-акустической спектроскопии // Тезисы XXII Международной конференции “Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов” 24-27 сентября 2007 г., Санкт-Петербург. СПб. 2007. Т. 1. С. 18.
9. Арутюнян А.Р., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Приложение метода оптико-акустической спектроскопии к исследованию усталости конструкционных материалов // “Актуальные проблемы механики сплошной среды” Труды Международной конференции, посвященной 95-летию академика НАН Армении Н.Х. Арутюняна 25-28 сентября 2007 г., Цахкадзор, Армения. Ереван: Институт механики НАН Армении. 2007. С. 63-68.
10. Арутюнян А.Р., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Исследование циклической долговечности конструкционных материалов методом оптико-акустической спектроскопии // Вестник С.-Петерб. ун-та. 2008. Сер. 1. Вып. 3. С. 88-96.
11. A.R. Arutyunyan, B.A. Zimin, Yu.V. Sud'enkov. The investigation of materials adaptation possibilities under high-cycle loadings // Book of abstracts XXXVI Summer School conference “Advanced problems in mechanics”. 06–10 July. 2008. St.-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME. RAS. 2008. P. 18-19.
12. Alexander R. Arutyunyan. The energy approach to formulate the criterion of fatigue strength // Proceedings of XXXVI Summer School conference “Advanced problems in mechanics”. 06–10 July. 2008. St.-Petersburg (Repino). St.-Petersburg: IPME. RAS. 2008. P. 67-71.
13. Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А. О роли скрытой энергии деформации в процессах усталостного разрушения металлов // Труды VI международной конференции “Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред”. Горис-Степанакерт, 21-26 сентября 2008 г. Ереван: Институт механики НАН РА. 2008. С. 85-92.