

На правах рукописи



БРИККЕЛЬ Дмитрий Максимович

**ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С
УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ИХ МАТЕРИАЛОВ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» и в Институте проблем машиностроения РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ерофеев Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Шоркин Владимир Сергеевич,**
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБОУ ВО «Орловский
государственный университет
им. И.С.Тургенева», профессор кафедры
технической физики и математики.
Тарасов Иван Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»,
доцент кафедры подъемно-транспортных
машин и машиноремонта

Ведущая организация: ЗАО «Научно-исследовательский центр
контроля и диагностики технических
систем»

Защита диссертации состоится «16» сентября 2022 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при ННГУ имени Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1281>

Автореферат разослан «14» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Анализ причин технических аварий и даже техногенных катастроф многих ответственных объектов показывает, что значительного их числа, если не всех, можно было бы избежать при наличии необходимых средств неразрушающего контроля и диагностики состояния материала, а также соответствующих методов математического моделирования процессов истощения ресурса материала объектов.

Поэтому весьма актуальна разработка эффективных неразрушающих методов с соответствующими аппаратно-программными средствами поддержки, которые позволяют оперативно, в реальном масштабе времени оценить текущее состояние материала объектов и, используя данные предварительно проведенных обучающих экспериментов и специализированную базу данных, позволяют дать обоснованное заключение о возможности дальнейшей его эксплуатации, о величине предполагаемого остаточного ресурса или о необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ.

Для построения эффективных математических моделей, которые можно положить в основу методик неразрушающего контроля материалов и конструкций необходимо комплексное использование методов механики поврежденных сред и волновой динамики механических систем.

Степень разработанности темы

Как правило, в механике деформируемого твердого тела задачи динамики рассматривают отдельно от задач накопления повреждений. При разработке таких методов принято заранее постулировать, что скорость упругой волны является заданной функцией поврежденности, а затем экспериментально определять коэффициенты пропорциональности. Фазовая скорость волны и ее затухание считаются обычно степенными функциями частоты и линейными функциями поврежденности. При несомненных достоинствах (простота) такой подход обладает целым рядом недостатков, как и любой подход, не опирающийся на математические модели процессов и систем.

В работе В.И. Ерофеева и Е.А. Никитиной (2010 г.) сформулированы и исследованы самосогласованные задачи, включающие в себя, кроме уравнения развития поврежденности, динамическое уравнение теории упругости.

Цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является развитие волновой динамики механических систем в приложении к решению задач неразрушающего контроля элементов конструкций в процессе накопления повреждений в их материалах.

Достижение цели планируется осуществить путем решения следующих задач:

- формулировки математических моделей (линейных и нелинейных), позволяющих описывать распространение продольных и изгибных волн в стержнях, сдвиговых волн в пластинах с учетом поврежденности их материалов;
- оценки влияния поврежденности материала на процессы дисперсии, затухания и пространственной локализации волновых полей.

Научная новизна

Получены и проанализированы новые математические модели, описывающие распространение линейных и нелинейных волн в балке, сдвиговых волн в пластине, лежащий на упругом основании, нелинейных продольных волн в стержне модели Бишопа с учетом поврежденности материалов перечисленных элементов конструкций.

Получено новое эволюционное уравнение, обобщающее известное в нелинейной волновой динамике уравнение Кортевега – де Вриза – Бюргерса. Найдено аналитическое решение этого уравнения.

Впервые поставлена и решена задача о возбуждении движущейся нагрузкой сдвиговой волны в пластине на упругом основании, изготовленной из материала, обладающего накопленной поврежденностью.

Предложен новый практический подход определения степени поврежденности материала цилиндрического образца ультразвуковым эхо-акустическим методом, основанный на самосогласованной динамической задаче оценки поврежденности.

Теоретическая значимость работы

Развиваемый подход позволяет сформулировать новые зависимости, учитывающие физическую нелинейность поврежденного материала, а также нелинейную связь деформации – перемещения.

Практическая значимость работы

При определении экспериментальными методами соответствующих констант, характеризующих поврежденность материала, расчетные зависимости могут быть использованы при диагностировании длительно эксплуатируемых конструкций акустическими методами.

Методология и методы диссертационного исследования

При проведении исследований применялись методы теории упругости, механики поврежденных сред, волновой динамики механических систем. Для получения нелинейных эволюционных уравнений применен асимптотический метод многих масштабов. Экспериментальное определение степени поврежденности материала производилось эхо-акустическим методом.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

- математические модели (линейные и нелинейные), включающие в себя взаимосвязанные уравнение динамики элемента конструкции (стержень, пластина) и кинетическое уравнение накопления повреждений в материале, из которого этот элемент конструкции изготовлен;
- результаты оценки влияния поврежденности материала на процессы дисперсии, диссипации и пространственной локализации изгибных и продольных волн, распространяющихся в стержне;
- результаты решения задачи о возбуждении движущейся нагрузкой сдвиговой волны в пластине, изготовленной из материала, обладающего накопленной поврежденностью, и лежащей на упругом основании модели Винклера;
- результаты экспериментальных исследований зависимости скорости продольной упругой волны, распространяющейся в стержне, от поврежденности его материала.

Апробация работы

Основные положения и полученные в диссертационной работе результаты докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- IV Международная студенческая научно-практическая конференция «Перспективное развитие системы диагностики, мониторинга и обслуживания объектов транспортной инфраструктуры», Нижний Новгород, 2016 г.

- Международная научно-практическая конференция «Наука сегодня: Задачи и пути их решения», Вологда, 2017 г.
- 4-я Международная научно-техническая конференция, посвященная 80-летию ИМАШ РАН. Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ – 2018). Москва, 2018 г.
- XLIV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, 2018 г.
- Научная конференция 16-го российского архитектурно-строительного форума, Нижний. Новгород, 2018 г.
- Международная научная конференция «Проблемы прочности, динамики и ресурса», Нижний Новгород, Россия, 25-29 ноября 2019г.
- Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019» (ICMTMTE 2019), Севастополь, Россия, 9-13 сентября 2019г.
- Международных инновационных конференциях молодых учёных и студентов по современным проблемам машиноведения «МИКМУС-2019» и «МИКМУС-2021», Москва, Россия, 4-6 декабря 2019г.; 30 ноября – 2 декабря 2021 г.
- Международная летняя школа-конференция «Актуальные проблемы механики», Санкт-Петербург, Россия, 21-27 июня, 2020г. / International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”, St. Petersburg, Russia, June 21-27, 2020.
- XX Международная конференция и молодежная школа "Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии", Нижний Новгород, Россия 23-27 ноября 2020г.
- 27-й международный конгресс по звуку и вибрации, Прага, Чехия, 12-16 июля, 2021г. / The 27th International Congress of Sound and Vibration, Prague (CZ) from 12-16 July 2021.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ [1–15], в том числе 6 из них [1–6] в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, в журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна, практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования.

Первая глава диссертации, имеющая обзорный характер, включает в себя анализ современных подходов к оценке повреждаемости материалов, общие сведения о неразрушающих методах контроля конструкций, описание спектрально-импульсного метода оценки степени поврежденности.

Механика поврежденного континуума интенсивно развивается, начиная с основополагающих работ Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова. Ценность этих первых работ, признанных ныне классическими, заключается в возможности применения единой схемы представления поврежденности для описания процессов в упругих и упругопластических телах.

Под поврежденностью обычно понимается сокращение упругого отклика тела вследствие сокращения эффективной площади, передающей внутренние усилия от одной части тела к другой его части, обусловленного, в свою очередь, появлением и развитием рассеянного поля микродефектов (микротрещины – в упругости, дислокации – в пластичности, микропоры – при ползучести, поверхностные микротрещины – при усталости).

Не измеряемая непосредственно (как, например, скорость, сила или температура), поврежденность, т.е. деградация механических свойств тела, может быть обнаружена в результате анализа реакции тела на различные внешние воздействия. Согласно экспериментальной практике, наличие поля повреждений в материалах может быть косвенно обнаружено и отчасти количественно представлено, через уменьшение скорости прохождения ультразвукового сигнала, уменьшение модуля Юнга («дефект модуля»), уменьшение плотности («разрыхление»), изменение твердости, падение амплитуды напряжений при циклическом испытании, ускорение ползучести в третьей стадии.

В традиционных расчетах за меру повреждаемости в процессе развития деформации принимается скалярный параметр повреждаемости, характеризующий относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов. Этот параметр равен нулю, когда повреждений нет, и близок к единице в момент разрушения. Процесс накопления повреждений в материале исследуемой конструкции рассчитывается путем последовательного решения на каждом этапе нагружения кинетического уравнения повреждаемости. Исследование

процесса накопления повреждений в элементе конструкции продолжается до достижения параметром поврежденности заданного предельного значения, близкого к единице.

Весомый вклад в развитие теоретических основ механики поврежденных сред, в решение прикладных задач этого научного направления внесли отечественные ученые: Астафьев В.И., Баженов В.Г., Березин А.В., Бондарь В.С., Ботвина Л.Р., Вакуленко А.А., Васин Р.А., Вильдеман В.Э., Волков В.М., Волков И.А., Горохов В.А., Гусенков А.П., Ерофеев В.И., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г., Локощенко А.М., Ломакин Е.В., Лурье С.А., Маковкин Г.А., Махутов Н.А., Мишакин В.В., Мовчан А.А., Морозов Н.Ф., Никитина Е.А., Радаев Ю.Н., Романов А.Н., Садырин А.И., Углов А.Л., Хлыбов А.А., Шоркин В.С. и другие, а также зарубежные исследователи, среди которых: Bazant Z.P., de Borst R., Collins J.A., Geers M.G.D., Hirao M., Karihaloo B.L., Krajcinovic D., Lemetre J., Maugin G.A., Murakami S., Needleman A., Oka F., Pezzyna P., Placidi L., Sidoroff F., Twerdaard V., Wang J. и другие.

Как правило, в механике деформируемого твердого тела задачи динамики рассматривают отдельно от задач накопления повреждений. При разработке таких методов принято заранее постулировать, что скорость упругой волны является заданной функцией поврежденности, а затем экспериментально определять коэффициенты пропорциональности. Фазовая скорость волны $V(\omega)$ и ее затухание $\alpha(\omega)$ считаются обычно степенными функциями частоты и линейными функциями поврежденности $V(\omega) = V_0(1 - k_3\Psi - k_4\Psi^2)$, $\alpha(\omega) = (k_1 + k_2\Psi)\omega^4$. При несомненных достоинствах (простота) такой подход обладает целым рядом недостатков, как и любой подход, не опирающийся на математические модели процессов и систем.

В работе Ерофеева В.И., Никитиной Е.А. (2010) задача считается самосогласованной, включающей в себя, кроме уравнения развития поврежденности $\frac{\partial\Psi}{\partial t} + \alpha\Psi = \beta_2 E \frac{\partial u}{\partial x}$, динамическое уравнение теории упругости $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \beta_1 \frac{\partial\Psi}{\partial x}$. Здесь $u(x, t)$ – продольное перемещение, C_0 – скорость распространения продольной упругой волны.

Во второй главе диссертации на основании подхода Ерофеева – Никитиной сформулирована самосогласованная математическая модель, включающая в себя уравнение изгибных колебаний балки (стержня) и кинетическое уравнение накопления повреждений в ее материале:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + c_s^2 r_y^2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} - \frac{c_s^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^3 \right] = \beta_1 \frac{\partial \Psi}{\partial x}; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \alpha \Psi = \beta_2 E \frac{\partial W}{\partial x}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Модель учитывает геометрическую нелинейность. Здесь введены обозначения: $W(x, t)$ – перемещение частиц срединной линии балки при изгибе, $c_s = \sqrt{E\rho^{-1}}$, $r_y = \sqrt{J_y F^{-1}}$, где E – Модуль Юнга, ρ – плотность материала, J_y – осевой момент инерции, F – площадь поперечного сечения балки, α , β_1 , β_2 – константы, характеризующие поврежденность материала (среди которых $\alpha = T^{-1}$, где T – время релаксации, физический смысл других коэффициентов не столь очевиден; $\beta_1 \cdot \beta_2 < 0$).

В линейном приближении в рамках уравнений (2.1) исследовано влияние поврежденности материала на параметры изгибной волны, распространяющейся в балке. Показано, что если в классической балке Бернулли–Эйлера для изгибных волн имеется одна дисперсионная ветка $k_1 = \sqrt{\omega}$, $k_2 = 0$ при любом значении ω (пунктирная линия на рис. 2.1), то для волн в балке, описываемой уравнением (2.1), во всем частотном диапазоне существуют две дисперсионные ветки для k_1 , характеризующей распространение волны и две дисперсионные ветки для k_2 , характеризующей ее частотно - зависимое затухание.

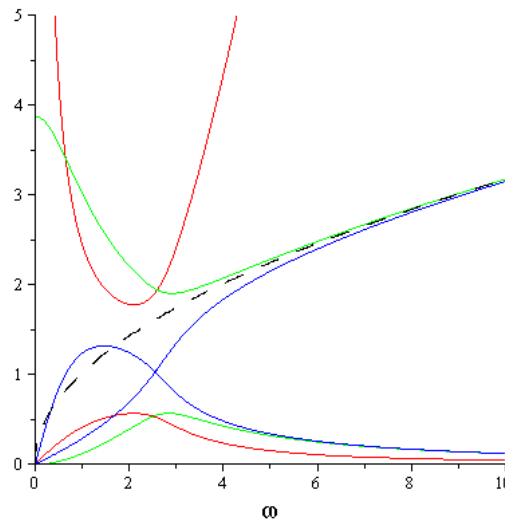


Рис. 2.1. Зависимости действительной (зеленый), мнимой (синий) частей волнового числа и коэффициента затухания (красный) от частоты.

Далее рассматривается случай распространения по балке интенсивных вибраций, когда уже нельзя ограничиться изучением гармонических или квазигармонических процессов, а необходимо учитывать широкополосность

изгибных волн. Решения уравнений (2.1) ищутся в классе стационарных волн, т.е. функций, зависящих от «бегущей» координаты $\xi = z - V\tau$, где $V = \text{const}$ – скорость волны. Такие существенно несинусоидальные волны могут быть как периодическими, так и уединенными (локализованными в пространстве). С ростом параметра поврежденности материала амплитуды периодической и уединенной волн увеличиваются, в то время как длина периодической волны и ширина уединенной волны уменьшаются.

В третьей главе рассматривается задача о возбуждении движущейся нагрузкой плоской сдвиговой волны в пластине, изготовленной из материала, обладающего накопленной поврежденностью. Пластина при этом лежит на упругом основании модели Винклера.

Поперечные колебания пластины удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - c_{\perp}^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \omega_0^2 u = \beta_1 \frac{\partial \Psi}{\partial x}; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \alpha \Psi = \beta_2 N \frac{\partial W}{\partial x}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Здесь $W(x, t)$ – поперечное смещение пластины, $\Psi(x, t)$ – функция поврежденности, $c_{\perp} = \sqrt{N/\rho}$, $\omega_0 = \sqrt{k/\rho}$, N , ρ – натяжение и погонная плотность пластины, k – коэффициент упругости основания, α , β_1 , β_2 – коэффициенты, характеризующие поврежденность.

Если продифференцировать первое уравнение системы (3.1) по t , а второе – по x , и решить данную систему относительно поперечного перемещения частиц пластины $W(x, t)$, получим единое уравнение вида:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - c_{\perp}^2 \left(1 + \frac{\beta_1 \beta_2 \rho}{\alpha} \right) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \omega_0^2 W + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} - \frac{c_{\perp}^2}{\alpha} \cdot \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\omega_0^2}{\alpha} \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

В случае использования безразмерных переменных $U = W/W_0$, $y = x/X$, $\tau = t/T$, $X = c_{\perp}/\alpha\sqrt{\gamma}$, $T = 1/\alpha\gamma$, $\gamma = 1 + (\beta_1 \beta_2 \rho/\alpha)$, уравнение (3.2) будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\omega_0^2}{\alpha^2 \gamma^2} U + \gamma \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} - \frac{\partial^3 U}{\partial y^2 \partial \tau} + \frac{\omega_0^2}{\alpha^2 \gamma} \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0 \quad (3.3)$$

Здесь $\gamma = 1 + (\beta_1 \beta_2 \rho/\alpha)$ – параметр, характеризующий степень поврежденности системы, равный единице в абсолютно неповрежденной структуре и близкий к нулю в структуре с критическим накоплением повреждений.

Упростим уравнение (3.3) таким образом, чтобы для больших частот степень затухания определялась только параметром поврежденности γ в соответствие с формулой:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \tilde{\omega}_0^2 U + \frac{(1-\gamma)}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial U}{\partial \tau} = 0 \quad (3.4)$$

Пусть вдоль пластины по равномерному закону движется нагрузка, представляющая собой массу m , на которую действует постоянная поперечная сила G . В движущейся точке контакта выполняются условия непрерывности:

$$U = {}^I U(\tilde{V}\tau, \tau) = {}^{II} U(\tilde{V}\tau, \tau) \quad (3.5)$$

и баланс сил:

$$\begin{cases} m {}^0 \ddot{U} = \frac{\rho c_{\perp}}{\alpha \gamma \sqrt{\gamma}} \left[U_y + \tilde{V} \gamma U_{\tau} \right]_{\tilde{V}\tau-0}^{\tilde{V}\tau+0} - \frac{G}{W_0 \alpha^2 \gamma^2}; \\ m \ddot{l} = -\frac{\rho W_0^2}{2\gamma} \left[\gamma U_{\tau}^2 + U_y^2 + 2\tilde{V} \gamma U_{\tau} U_y \right]_{\tilde{V}\tau-0}^{\tilde{V}\tau+0} + \frac{Q}{\alpha^2 \gamma^2}. \end{cases} \quad (3.6)$$

При отсутствии поврежденности материала в системе существует так называемая «зона непропускания», где действительным частотам не соответствуют действительные волновые числа, а волны излучаются лишь при частотах, больших частоты отсечки. Наличие поврежденности приводит к существованию волн с комплексными волновыми числами во всем частотном диапазоне. Кроме того показано, что если при отсутствии повреждений в материале пластины, сдвиговая волна в ней генерируется лишь нагрузкой, движущейся со скоростью, превышающей скорость сдвиговой волны, то при наличии повреждений в материале сдвиговую волну способна генерировать нагрузка, движущаяся со сколь угодно малой скоростью.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию распространения продольной волны в стержне и экспериментальному определению степени поврежденности его материала эхо-акустическим методом. Рассматривается образец материала, выполненный в виде стержня. Динамика стержня описывается моделью Бишопа, дополнительно учитывающей нелинейности: геометрическую (нелинейная связь деформации и перемещения) и физическую (нелинейный закон Гука). Считается, что стержень подвергался статическим или циклическим испытаниям и в его материале могла накопиться поврежденность. Нелинейная динамика стержня с учетом поврежденности его материала описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \left(1 + \frac{\alpha_0}{E} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - v^2 r_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_\tau^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = \beta_1 \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \\ \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \alpha \Psi = \beta_2 E \frac{\partial u}{\partial x}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Здесь $u(x, t)$ – перемещение его срединной линии, $C_0 = \sqrt{E\rho^{-1}}$ – скорость, с которой распространялась бы продольная упругая волна в материале стержневого образца, если в нем не было бы повреждений; E – модуль Юнга; ρ – плотность материала, $r_0 = \sqrt{I_0 F^{-1}}$ – полярный радиус инерции поперечного сечения стержня, F – площадь поперечного сечения, $c_\tau = \sqrt{G\rho^{-1}}$ – скорость распространения упругой сдвиговой волны, G – модуль сдвига. Через выражение $\alpha_0 = 3E + v_1(1 - 6v) + 6v_2(1 - 2v) + 2v_3$ обозначен коэффициент, характеризующий геометрическую и физическую упругие нелинейности стержня; $v_{1,2,3}$ – упругие модули Ламе третьего порядка.

Система (4.1) легко сводится к одному уравнению относительно продольного перемещения $u(x, t)$. Отыскивая решение этого уравнения в виде асимптотического разложения по малому параметру: $u = u_0 + \varepsilon u_1 + \dots$ и вводя при этом новые переменные: $z = x - ct$; $\tau = \varepsilon t$, в первом приближении по ε приходим к эволюционному уравнению относительно осевой деформации $U = \frac{\partial u_0}{\partial z}$:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial \tau} + a_1 \frac{\partial^3 U}{\partial z^3} + a_2 \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - a_3 \frac{\partial^4 U}{\partial z^4} + \\ & + \alpha_1 U \frac{\partial U}{\partial z} - \alpha_2 \frac{\partial}{\partial z} \left(U \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Полученное уравнение (4.2) обобщает уравнение Кортевега – де Вриза – Бюргерса одним диссипативным (с коэффициентом α_3) и одним нелинейным (с коэффициентом α_2) слагаемыми.

Уравнение (4.2) имеет точное аналитическое решение, выражающееся через гиперболический косинус:

$$U = A \operatorname{ch}^{-2} \left(\frac{z - V\tau}{\Delta} \right) + B \quad (4.3)$$

График функции (4.3) имеет колоколообразную форму и характеризует нелинейную уединенную стационарную волну – солитон деформации, распространяющийся со скоростью V , имеющий амплитуду A и ширину Δ . Физически реализуемым является лишь тот случай, когда в волне деформации

отсутствует постоянная составляющая (т.е. когда $B = 0$). Параметры солитона зависят от коэффициента $\gamma = \frac{\beta_1 \beta_2 E}{\alpha}$, характеризующего поврежденность

материала, а именно: амплитуда солитона $A = \frac{\gamma \rho}{2\alpha_0}$ линейно растет с

увеличением γ ; ширина солитона (Δ) будет уменьшаться как γ^{-1} , а скорость солитона (V) будет линейно увеличиваться с ростом γ . Уже говорилось, что первое приближение по ε сводит исходную систему уравнений к эволюционному уравнению (4.2), при этом нулевое приближение по ε дает

значение скорости распространения продольной волны $V_N = c_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma}{c_0^2}}$,

которая должна уменьшаться по мере накопления дефектов и микроповреждений, т.е. по мере увеличения коэффициента γ .

Для оценки степени поврежденности было решено исследовать распространение в стержне продольных волн, причем внутренние повреждения исследуемых образцов достигались за счет деформаций кручения, как одного из наиболее точных методов для испытания металлов в пластической области. В качестве образцов было представлено несколько одинаковых стальных элементов с рабочей частью в виде цилиндра. В качестве аппаратного обеспечения была использована машина КМ-50-1. Измерения скорости продольных волн производились на специальной экспериментальной установке (Рис. 4.1). Выбор образцов был сделан из расчета работы на частоте 5 МГц.



Рис. 4.1. Блок-схема экспериментальной установки.

Полученные зависимости скорости продольной волны и коэффициента, характеризующего накопление повреждений, от количества оборотов закручивания образцов представлены на рис. 4.2 и 4.3.

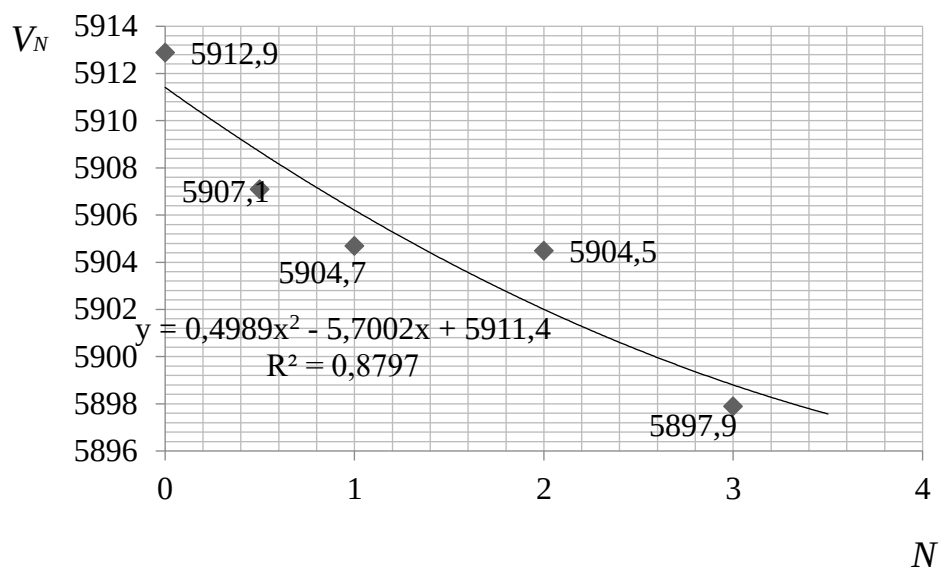


Рис.4.2. График зависимости скорости продольной волны от количества оборотов закручивания образца

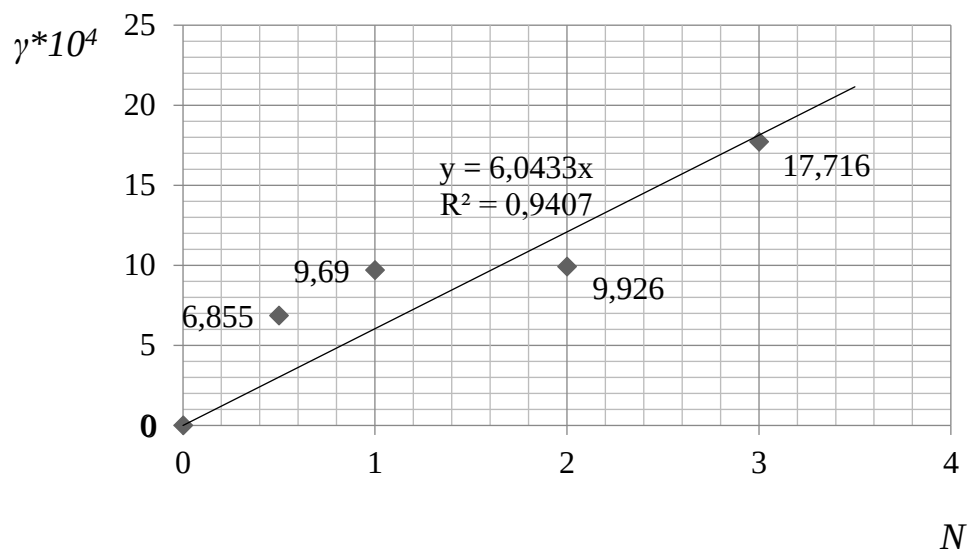


Рис.4.3. График зависимости коэффициента поврежденности от степени закрутки образца

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В линейной и нелинейной постановках сформулирована самосогласованная математическая модель, включающая в себя уравнение изгибных колебаний балки (стержня) и кинетическое уравнение накопления повреждений в ее материале. В результате аналитических исследований и численного моделирования, показано, что поврежденность материала привносит частотно-зависимое затухание и существенно изменяет характер дисперсии фазовой скорости изгибной упругой волны. Если в классической балке Бернулли-Эйлера у изгибных волн имеется одна дисперсионная ветка при любом

значении частоты, то для балки, материал которой накапливает повреждения, во всем частотном диапазоне существует две пары дисперсионных веток, при этом одна пара описывает распространение волны, а другая - ее затухание. В рамках геометрически нелинейной модели поврежденной балки исследовано формирование интенсивных изгибных волн стационарного профиля. Показано, что такие существенно несинусоидальные волны могут быть как периодическими, так и уединенными (локализованными в пространстве). Определены зависимости, связывающие параметры волн (амплитуду, ширину, длину волны) с поврежденностью материала. Выявлено, что с ростом параметра поврежденности материала амплитуды периодической и уединенной волн увеличиваются, в то время как длина периодической волны и ширина уединенной волны уменьшаются.

2. Рассмотрена задача о возбуждении движущейся нагрузкой сдвиговой волны в пластине, изготовленной из материала, обладающего накопленной поврежденностью. Пластина при этом лежит на упругом основании модели Винклера. При отсутствии поврежденности материала в системе существует так называемая «зона непропускания», где действительным частотам не соответствуют действительные волновые числа, а волны излучаются лишь при частотах, больших частоты отсечки. Наличие поврежденности приводит к существованию волн с комплексными волновыми числами во всем частотном диапазоне. Кроме того показано, что если при отсутствии повреждений в материале пластины, сдвиговая волна в ней генерируется лишь нагрузкой, движущейся со скоростью, превышающей скорость сдвиговой волны, то при наличии повреждений в материале сдвиговую волну способна генерировать нагрузка, движущаяся со сколь угодно малой скоростью.
3. Исследована динамика стержня (модель Бишопа), по которому может распространяться продольная упругая волна. В избранной модели дополнительно учитываются нелинейности: геометрическая (нелинейная связь деформации и перемещения) и физическая (нелинейный закон Гука) и то обстоятельство, что в материале стержня при его эксплуатации могла поврежденность. Показано, что нелинейная динамика стержня с учетом поврежденности его материала описывается системой двух связанных между собой дифференциальных уравнений. Введены новые переменные, выбор которых объясняется тем, что возмущение, распространяясь с постоянной скоростью вдоль стержня, медленно эволюционирует во времени из-за нелинейности, дисперсии и диссипации. Первое приближение по малому параметру приводит исходную систему уравнений к одному эволюционному уравнению относительно осевой деформации, обобщающему уравнение Кортевега – де Вриза – Бюргерса одним диссипативным и одним нелинейным

слагаемыми. Найдено точное аналитическое решение этого уравнения, выражающееся через гиперболический косинус. График этой функции имеет колоколообразную форму и характеризует нелинейную уединенную стационарную волну – солитон деформации. Кроме самого решения найдены соотношения, позволяющие установить, как зависят параметры солитона (амплитуда, скорость, ширина) от коэффициента, характеризующего поврежденность материала.

4. Предложен практический подход определения степени поврежденности материала цилиндрического образца ультразвуковым эхо-акустическим методом, основанный на самосогласованной динамической задаче оценки поврежденности. Получены зависимости изменения скорости продольной волны, и, как следствие, коэффициента поврежденности от изменения степени закрутки образца. Показано, что при увеличении степени закрутки образца, скорость продольных волн в материале уменьшается. В свою очередь, коэффициент, характеризующий поврежденность материала, увеличивается.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, в журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

1. Бриккель Д.М., Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Распространение изгибных волн в балке, материал которой накапливает повреждения в процессе эксплуатации // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13 – №1. – С. 108-116.
2. Brikkel D., Erofeev V., Leonteva A. Dispersion and attenuation of bending waves propagating in a beam in the material there of damages accumulate during the operation // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 709. Article ID: 033059. 6 pages. (**Scopus**).
3. Brikkel D., Erofeev V., Nikitina E. Influence of material damage on the parameters of a nonlinear longitudinal wave which spread in a rod // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 747. Article ID: 012048. 5 pages. (**Scopus**).
4. Brikkel D., Erofeev V. Influence of material damage on the parameters of a nonlinear flexible wave which spread in a beam // Communications in Computer and Information Science (CCIS). – 2020. – Vol. 1413. – P. 105-116. (**Scopus**).
5. Brikkel D., Erofeev V., Nikitina E. Effect of damage in the material on the parameters of nonlinear flexural waves // Advances in Acoustics, Noise and Vibration – 2021. Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration. The Annual Congress of the International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 11-16 July, 2021 / edited by: E. Carletti, M. Crocker, Pawelczyk M., Tuma J. Published by: Silesian University Press, Gliwice, Poland. – 2021. – Article 1116. 6 pages. (**Scopus**).

6. Brikkel D.M., Erofeev V.I., Leonteva A.V. Propagation of bending waves in a beam the material of which accumulates damage during its operation // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2121. Vol. 62. No 7. P.1097-1105. (*Web of Science, Scopus*).

Статьи в других журналах и сборниках трудов научных конференций

7. Никитина Е.А., Хазов П.А., Бриккель Д.М. Определение остаточного ресурса подкраново-подстропильной фермы с учетом накопления повреждений в реальных условиях эксплуатации // Приволжский научный журнал. – 2018. – №1(45) – С. 9-14. (*входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ по специальностям: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения; 05.23.05 – Строительные материалы и изделия; 05.23.22 – Гидротехническое строительство*).
8. Бриккель Д.М., Ерофеев В.И. Влияние поврежденности материала на параметры нелинейной изгибной и продольной волн, распространяющихся в балке // Проблемы информатики. – 2021. – №1(50). – С. 6-14. (*входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ по специальностям: 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей; 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения; 05.13.17 – Теоретические основы информатики*).
9. Лампси Б.Б., Хазов П.А., Маркина Ю.Д., Бриккель Д.М. Влияние жесткости элементов решетки на податливость ездового пояса подкраново-подстропильной фермы (ППФ) // Приволжский научный журнал. – 2022. – №1(45) – С. 9-14. (*входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ по специальностям: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения; 05.23.05 – Строительные материалы и изделия; 05.23.22 – Гидротехническое строительство*).
10. Бриккель Д.М., Хазов Д.А. Определение срока эксплуатации и остаточного ресурса подкраново-подстропильных ферм (ппф) на стадии роста усталостной трещины. Статический расчёт // Перспективное развитие системы диагностики, мониторинга и обслуживания объектов транспортной инфраструктуры. Материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции. Нижний Новгород. Изд-во: «Стимул-СТ». – 2016. – С. 72-77.
11. Бриккель Д.М. Анализ НДС подкраново-подстропильной фермы (ппф) на стадии роста усталостной трещины // Наука сегодня: задачи и пути их решения. Материалы международной научно-практической конференции. г. Вологда, Научный центр «Диспут». 31 мая 2017. Вологда: Изд-во «Маркет». – 2017. – С. 10-11.
12. Бриккель Д.М. Определение остаточного ресурса подкраново-подстропильной фермы с учетом накопления повреждений в реальных условиях эксплуатации // Сборник трудов Международной молодёжной научной конференции «XLIV Гагаринские чтения». Серия: «Механика и

- моделирование материалов и технологий». М.: ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН. – 2018. – С. 369-370.
- 13.Ерофеев В.И., Никитина Е.А., Хазов П.А., Бриккель Д.М. Влияние поврежденности на остаточный ресурс и несущую способность подкрановой конструкции при эксплуатационных режимах нагружения // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ-2018). Научные труды 4-ой Международной конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2018. С. 112-114.
- 14.Бриккель Д.М., Ерофеев В.И., Никитина Е.А. Влияние поврежденности материала на параметры нелинейной продольной волны, распространяющейся в стержне // Материалы XXXI международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС – 2019». М.: ИМАШ им. А.А. Благоднарова РАН. – 2020. – С. 286-289.
- 15.Бриккель Д.М., Ерофеев В.И. Определение степени поврежденности материала стержня ультразвуковым эхо - акустическим методом // Материалы XXXIII международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения «МИКМУС – 2021». М.: ИМАШ им. А.А. Благоднарова РАН. – 2021. – С. 496-501.

Подписано в печать 30.06.2022 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 1. Заказ № 810. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе дизайна и цифровой печати
РИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37