

На правах рукописи

БАЯНОВ Евгений Викторович

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В КОРОТКИХ СПЛОШНЫХ
ЦИЛИНДРАХ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ УДАРЕ**

Специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на кафедре «Самолето- и вертолетостроения»

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор

Гулидов Александр Иванович,

доктор технических наук, доцент

Курлаев Николай Васильевич

Официальные оппоненты:

Кривошеина Марина Николаевна, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Александрова Надежда Ивановна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». Обособленное подразделение «Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВМ СО РАН).

Защита состоится " " февраля 2019 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д003.054.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (ИГиЛ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15.

Тел.: (383)333-21-66, e-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИГиЛ СО РАН www.hydro.nsc.ru.

Автореферат разослан " " января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

Кургузов В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При решении многих задач, связанных с распространением волн вдоль цилиндра, часто применяется ряд приближений. В частности, из решения задачи о продольном ударе цилиндра в одномерной постановке определена скорость распространения упругой волны. Однако, рассматривая осесимметричную задачу, скорость распространения волны в цилиндре принимается равной скорости звука в цилиндре, полученной из одномерной теории. Данное предположение дает удовлетворительные решения, но не отражает полной волновой картины, в особенности при ударе коротких цилиндров.

Задача о распространении упругих волн в цилиндрах конечной длины при продольном ударе, с точки зрения волновых процессов при движении фронта волны, является недостаточно исследованной. Поэтому, актуальным представляется изучение факторов, влияющих на изменение скорости распространения упругой волны.

Цель диссертационной работы.

Исследование упругой волны, возникающей при продольном ударе цилиндра, и выявление факторов, влияющих на скорость ее распространения.

Задачи исследований.

1. В трехмерной осесимметричной постановке численно исследовать взаимовлияние продольных и поперечных волн в цилиндрах различной длины при ударе об абсолютно жесткую преграду.

2. Измерить среднюю скорость прохождения волны в цилиндрах разной длины с помощью ультразвукового дефектоскопа.

3. Проанализировать параметры цилиндра, влияющие на скорость распространения волны при продольном ударе.

Научная новизна.

1. Подробно описано явление повторного отскока однородного цилиндра от преграды при продольном ударе и проанализированы причины его возникновения.

2. Предложен метод определения отскока упругого цилиндра от жесткой преграды.

3. Исследовано влияние длины цилиндра на время контакта с абсолютно жесткой преградой при продольном ударе.

4. Показано, что упругая волна в осесимметричном цилиндре распространяется со скоростью, отличной от скорости звука в стержнях.

5. С помощью ультразвукового дефектоскопа подтверждено, что скорость волны в коротких цилиндрах выше, чем скорость распространения в стержнях большей длины.

Научная и практическая значимость.

Предложенная закономерность изменения (повышения) скорости упругой волны на малом удалении от торца цилиндра может использоваться для уточнения методов неразрушающего акустического контроля при определении расстояния до дефекта.

Полученный алгоритм визуализации волн напряжений в цилиндре можно использовать в других задачах механики сплошной среды, в которых используется метод конечных элементов.

Достоверность научных результатов.

Обеспечивается использованием строгого математического аппарата и законов механики деформируемого твердого тела; использованием двух апробированных программных комплексов для получения численного решения задачи; совпадением предельных случаев полученных решений с известными решениями и результатами проведенного эксперимента.

Апробация работы.

Основные научные положения и результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры самолето- и вертолетостроения НГТУ (2008, 2009) и института гидродинамики СО РАН (2016, 2018); Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс" (2008); Всероссийской научно-практической конференции "Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности" (2009–2013); Международной научно-практической интернет-конференции "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития" (2011); Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (2013); научно-практической конференции "Современные тенденции развития науки и технологий" (2015-2016); международной научной конференции «Тенденции развития науки и образования» (2017); 13й международный форум по стратегическим технологиям IFOST (2018).

Публикации.

Основное содержание диссертации изложено в 15 печатных работах, в том числе в одном журнале, входящем в список ВАК и одном журнале, зарегистрированный в системе SCOPUS.

Личный вклад автора состоит в разработке алгоритма визуализации результатов численного решения; анализе влияния геометрии стержня на время контакта с преградой; описании волновой картины при продольном ударе цилиндра.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объем работы составляет 91 страницы, в том числе 28 рисунков. Список литературы содержит 122 наименования.

Во введении дано обоснование актуальности диссертации, указана цель и научная новизна исследований. Приведены положения, выносимые на защиту и краткая структура диссертации.

В первой главе приведен подробный обзор работ, связанных с распространением волн в стержнях и других средах, описаны основные типы волн и методы решения волнового уравнения.

В безграничной среде возможно распространение двух типов возмущений: волна дилатации и волна сдвига. Эти волны также называют продольными и поперечными, соответственно. В волне дилатации направление перемещения частиц среды совпадает с направлением перемещения волны. В волне сдвига перемещения частиц перпендикулярны направлению распространения волны.

Если на свободную от напряжений границу падает продольная или поперечная волна под произвольным углом, то отраженное возмущение будет представлять собой сумму продольной и поперечной волн. При взаимной трансформации волн может возникнуть такая комбинация продольной и поперечной волн, что возмущение будет представлять собой волну, бегущую вдоль границы и резко затухающую при удалении вглубь полупространства. Такая волна называется волной Релея.

Пусть в стержне, свободном от нагрузки на боковой поверхности, распространяется продольная волна в направлении его оси. Если радиус стержня очень мал по сравнению с длиной волны, получается следующее выражение для фазовой скорости волны:

$$c \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (1)$$

Основой для рассмотрения задач об упругих волнах является задача о колебаниях струны. Эта задача заключается в нахождении решения одномерного волнового уравнения с начальными условиями:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad u|_{t=0} = f(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = F(x). \quad (2)$$

Одним из методов решения такой задачи является метод Даламбера или метод бегущих волн. Решение Даламбера представляется в виде

$$u(x, t) = \frac{f(x - at) + f(x + at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} F(x) dx. \quad (3)$$

Вторым методом решения волнового уравнения является метод Фурье или метод разделения переменных. В случае рассмотрения задачи о колебаниях струны, закрепленной на обоих концах, решение представляется в виде

$$u(x, t) = X(x) \cdot T(t). \quad (4)$$

После нахождения собственных функций при применении граничных условий решение записывается в виде

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{\pi k a t}{l} + b_k \sin \frac{\pi k a t}{l} \right) \sin \frac{\pi k x}{l}. \quad (5)$$

Исследования распространения волн проводятся с конца XIX-го века. Область этих исследований охватывает как изотропные, так и анизотропные среды. В основном, процесс отскока стержней от преграды в литературе рассматривается в одномерном приближении, что упрощает волновой анализ.

Значимый вклад в исследования колебаний стержней внес Кри. В своей работе Кри рассматривал систему уравнений равновесия в цилиндрической системе координат. Большую часть статьи автор посвятил решению уравнений равновесия для бесконечных цилиндров и оболочек, а так же для случая их колебаний.

Относительно точные результаты задачи осевого колебания стержней были получены Миндлином и Германом. Бэнкрофт одним из первых изучил нижние моды корней дисперсионного уравнения Похгаммера и получил зависимость между фазовой скоростью и волновым числом. Позже Хадсон подтвердил эти результаты.

В своей статье М. Шаталов и И. Федотов рассматривали дифференциальные уравнения для продольных колебаний стержня, решение которых основано на вариационном принципе Гамильтона. Приведен сравнительный анализ моделей Релея-Лява, Релея-Бишопа, Миндлина-Германна с моделью Похгаммера-Кри. Дейвис вплотную занимался теоретическим и экспериментальным исследованиями распространением коротких импульсов в цилиндрических стержнях. Он показал, что решения Похгаммера и Кри не точны для стержней конечной длины, но для большинства случаев эти решения близки к точным.

В. К. Манжосов в работе представляет модели продольного удара стержней, описываются этапы их разработки и развития и методы для приближенного решения задач об ударе.

В монографии В. М. Фомина, А. И. Гулидова и др. рассмотрены задачи отскока различных тел с разными скоростями от твердых преград в двумерной постановке. Здесь приводятся системы уравнений, методика и описание разностной схемы численного решения таких задач. Описаны результаты задач об ударе цилиндрических и конических стержней, а так же двухслойных цилиндрических стержней. В последнем случае было обнаружено явление повторного отскока, т.е. повторное касания стержня преграды после выхода всех точек стержня из контакта.

Распространение волны в стержнях произвольного сечения, является более сложной задачей. Наряду с изучением круглых стержней значительный интерес вызывает исследование волн в прямоугольных стержнях и пластинах. Релей и Лэмб одни из первых занимались изучением упругих волн в изотропных пластинах.

Морзе приводит подробные экспериментальные результаты исследования дисперсии волны для прямоугольных стержней. Но показывает результаты только для случая, когда отношение поперечных размеров стержня велико, т.е. стержень близок к пластине. Автор также показал, что результаты, полученные для квадратного стержня, близки к результатам задачи для круглого стержня аналогичной площади поперечного сечения. Используя модель Морзе, Кинч и Грин изучали деформацию стержня эллиптического сечения.

К широкому классу задач относятся вопросы распространения волн в тонких трубах. Решение этих задач строится на предположении о том, что волновая картина в тонких трубах аналогична распространению волн в тонком слое. На основе

этого Газис доказал, что в трубах распространяются волны Лэмба. Современное применение исследований волн Лэмба находится в области неразрушающего метода контроля на предмет обнаружении повреждений труб или наличия несплошностей в их материале.

Анализ вышеупомянутых работ показывает, что перечень задач механики деформируемого твердого тела, связанных с распространением волн, довольно обширен. Каждая из них представляет либо теоретический интерес, либо находит применение в практических областях. Во многих работах авторы используют различные приближения, в частности, рассматривают задачи в одномерной постановке. В подавляющем большинстве случаев такие решения хорошо согласуются с реальными экспериментами. Однако, не всегда это может подробно отражать физические явления и процессы, происходящие в телах при ударном воздействии.

В частности открытым остается вопрос об определении времени контакта цилиндра с преградой при продольном ударе и установление его зависимости от длины и материала цилиндра. Остается практически открытым вопрос о достоверности компьютерных моделирования процессов распространения волн в цилиндрах и его выхода из контакта с жесткой стенкой путем сравнения результатов этих моделирования с экспериментальными данными. Ответы на эти вопросы и являются главной целью настоящего исследования.

Во второй главе представлены этапы вывода характеристического уравнения, На основе полученного характеристического уравнения построены и дисперсионные кривые для поставленной задачи.

Введем систему координат для круглого стержня таким образом, что ось z направлена вдоль оси стержня, а ось r – в радиальном направлении. Будем искать перемещения $\mathbf{u}(r, z, \theta)$ для полубесконечного осесимметричного стержня ($0 < z < \infty$) конечного радиуса R ($0 < r \leq R$) в любой момент времени $t \geq 0$.

Разложим вектор перемещения \mathbf{u} на две составляющие с помощью скалярного Φ и векторного Ψ потенциалов:

$$\mathbf{u} = \text{grad } \Phi + \text{rot } \Psi. \quad (6)$$

Применим метод разделения переменных для нахождения функций:

$$\begin{aligned} \Phi(r, z, t) &= P(r) \cdot Q(z) \cdot T(t), \\ \Psi(r, z, t) &= R(r) \cdot S(z) \cdot N(t). \end{aligned} \quad (7)$$

После всех выкладок частные решения для потенциалов запишутся в виде

$$\begin{aligned} \Phi_k &= M_k e^{ikz} e^{-i\omega_k t} J_0(\alpha_k r), \\ \Psi_k &= N_k e^{ikz} e^{-i\omega_k t} J_1(\beta_k r), \end{aligned} \quad (8)$$

Частные решения компонент перемещения с учетом этого определяются по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{u}_r(r, z, t) &= e^{-i(\omega_k t - kz)} \left(\frac{dJ_0(\alpha_k r)}{dr} M_k - ikJ_1(\beta_k r) N_k \right), \\ \bar{u}_z(r, z, t) &= e^{-i(\omega_k t - kz)} \left(ikJ_0(\alpha_k r) M_k + \left(\frac{dJ_1(\beta_k r)}{dr} + \frac{J_1(\beta_k r)}{r} \right) N_k \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Применим следующие граничные условия для этой задачи: радиальные и касательные напряжения в стержне на свободной цилиндрической границе равны нулю, т.е.

$$\sigma_r = \lambda \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} \right) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \quad \sigma_{rz} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \Big|_{r=R} = 0. \quad (10)$$

В результате получаем систему уравнений

$$\begin{vmatrix} (\lambda + 2\mu)\alpha_k^2 J_0'' + \frac{\lambda}{R}\alpha_k J_0' - \lambda k^2 J_0 & -2\mu i k \beta_k J_1' \\ 2\mu i k \alpha_k J_0' & \mu \left[\beta_k^2 J_1'' + \frac{1}{R}\beta_k J_1' + \left(k^2 - \frac{1}{R^2} \right) J_1 \right] \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} M_k \\ N_k \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

Для упрощения дальнейших выкладок представим функции Бесселя в виде рядов с помощью формулы

$$J_m(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{x}{2} \right)^{2n+m} \frac{1}{n!(n+m)!}. \quad (12)$$

Возьмем лишь первые два члена этих рядов, т.е.

$$J_0(\alpha_k r) = 1 - \frac{1}{4}(\alpha_k r)^2, \quad J_1(\beta_k r) = \frac{1}{2}(\beta_k r) - \frac{1}{16}(\beta_k r)^3. \quad (13)$$

Таким образом, характеристическое уравнение запишется в виде

$$\begin{aligned} & \left\{ -k^2 \lambda \left[1 - \frac{1}{4} R^2 \left(\frac{\omega_k^2}{c_1^2} - k^2 \right) \right] - (\lambda + \mu) \left(\frac{\omega_k^2}{c_1^2} - k^2 \right) \right\} \times \\ & \times \left\{ k^2 \left[1 - \frac{1}{8} R^2 \left(\frac{\omega_k^2}{c_2^2} - k^2 \right) \right] - \left(\frac{\omega_k^2}{c_2^2} - k^2 \right) \right\} + \\ & + 2\mu k^2 \left(\frac{\omega_k^2}{c_1^2} - k^2 \right) \left[1 - \frac{3}{8} R^2 \left(\frac{\omega_k^2}{c_2^2} - k^2 \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение представляет собой зависимость частоты ω от волнового числа k . Эта зависимость называется дисперсионным уравнением.

На рис. 1 представлены дисперсионные кривые для алюминиевого стержня. График полученной зависимости построен в безразмерных величинах. Для этого по оси ординат отложим отношение скорости волны c к стержневой скорости c_E . По оси абсцисс вместо частоты ω отложим отношение радиуса стержня R к длине волны L

$$\frac{R}{L} = \omega / \frac{2\pi}{cR}. \quad (15)$$

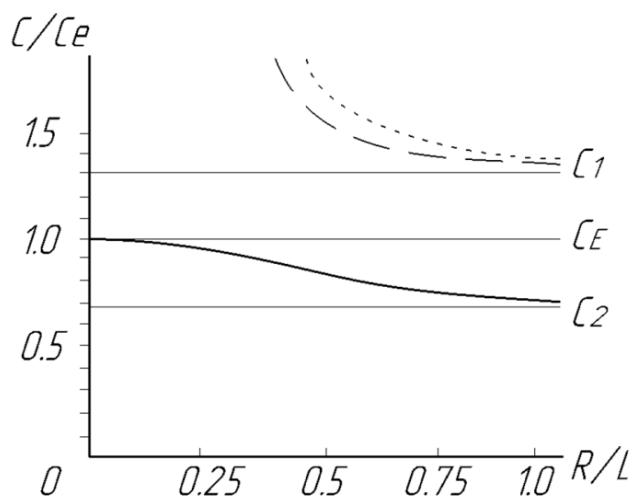


Рис. 1

Первая кривая на рис. 1 (сплошная линия) стремится к значению скорости поперечных волн c_2 . Вторая и третья кривые (штриховая линия) существует лишь с некоторого значения относительной длины волны, а затем стремится к значению скорости продольных волн c_1 .

Как видно из графика (рис. 1), при стремлении радиуса цилиндра к нулю скорость волны стремится к c_E , что соответствует результатам задачи в одномерной постановке и подтверждает достоверность полученных результатов.

Со значительным увеличением радиуса стержня, по сравнению с длиной волны, преобладают значения скоростей продольных и поперечных волн.

В третьей главе проведен численный расчет для задачи о распространении упругой волны в цилиндре при продольном ударе. Изучено влияние геометрических и физических параметров стержня на среднюю скорость волны.

В качестве программ для решения задачи об ударе стержня в данной работе были выбраны программные комплексы KRUG24 и AutoDYN.

Рассмотрим задачу о соосном соударении двух одинаковых цилиндров. При симметричном соударении таких цилиндров плоскость контакта можно рассматривать как жесткую преграду, и задача соударения становится эквивалентна задаче удара цилиндра длиной L и радиусом R по жесткой преграде со скоростью V_0 . Материал цилиндра принимается абсолютно упругим.

При ударе цилиндра по жесткой преграде в начальный момент времени все точки торца цилиндра приходят в соприкосновение с преградой и остаются с ней в контакте некоторое время, после чего все сразу или по частям отделяются от преграды. В качестве времени контакта выбирается время от начала контакта до момента времени, когда все точки торца цилиндра отойдут от преграды.

В одномерном случае скорость волны равна c_E . Тогда время контакта t_K равно

$$t_K = \frac{2L}{c_E}. \quad (16)$$

В общем случае в цилиндре, как твердом теле, распространяются несколько типов волн с разными скоростями. На основании формулы (16) предположим, что по стержню распространяется волна с некоторой неизвестной средней скоростью

c такой что, после ее прохождения двух длин стержня за время t_K происходит отскок стержня. Таким образом, среднюю скорость волны будем искать по формуле:

$$c = \frac{2L}{t_K}, \quad (17)$$

а время контакта определим из решения осесимметричной задачи численно.

На рисунке 2 приведены графики зависимости относительной скорости волны c' от калибра для однородных цилиндров из алюминия (а) и вольфрама (б). Здесь и далее, относительной скоростью c' , будет называться отношение скорости волны c , вычисляемой по формуле (2), к стержневой скорости c_E .

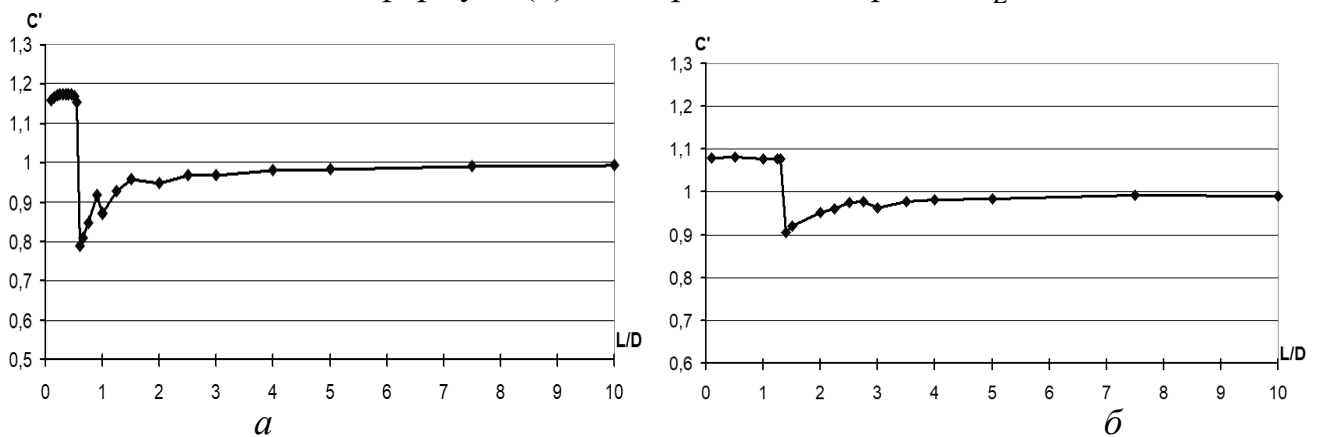


Рис. 2

Из графиков, представленных на рис. 2, следует, что:

- при малых значениях калибра цилиндра ($L/D < 1$) средняя скорость распространения волны близка к скорости продольных волн c_1 за счет того, что поперечные волны не успевают повлиять на продольную волну;
- средняя скорость волны стремится к стержневой скорости c_E уже при $L = 3D$;
- существует такое значение калибра ($L/D = 0.5 \dots 1.5$), при котором средняя скорость минимальна. Это объясняется большим влиянием поперечных колебаний на продольную волну.

Для некоторых размеров цилиндра наблюдались повторные касания цилиндра с преградой, т.е. после отскока цилиндра часть его точек входила в контакт с преградой при отсутствии силы тяжести. Рассмотрим влияние повторного отскока на изменение сил на контакте цилиндра с преградой.

На рис. 3 представлено изменение сил на контакте алюминиевого цилиндра со временем, полученное из численного эксперимента. Для длинных цилиндров (рис. 3 а) в момент, когда сила становится равной нулю, цилиндр отскакивает от преграды.

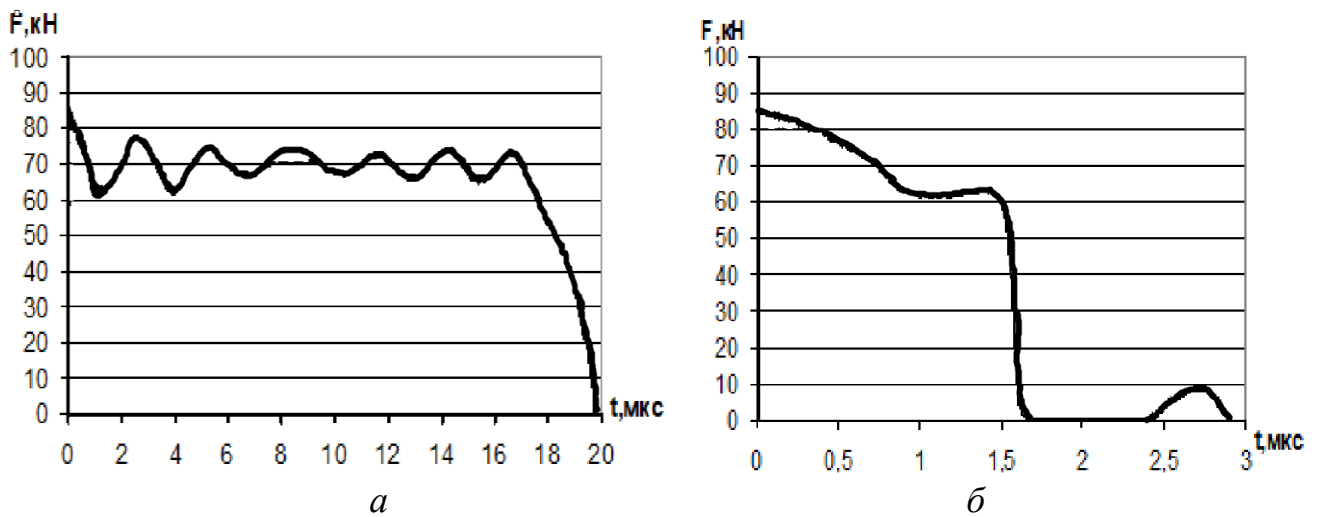


Рис. 3.

В коротких цилиндрах (рис. 3 б) понижение силы на контакте до нуля так же приводит к выходу всех точек торца цилиндра из контакта с преградой, но затем часть этих точек снова касается преграды на определенный промежуток времени и сила на контакте становится отличной от нуля до момента окончательного отскока. Явление повторного отскока ранее наблюдалось лишь в цилиндрах, состоящих из нескольких материалов.

Для анализа причин повторного касания цилиндра с преградой рассмотрим баланс энергии в процессе распространения волны на примере алюминиевого цилиндра.

На рис. 4 изображен график зависимости относительных значений энергии от времени. На рисунках сплошной линией показан график для потенциальной энергии, штрихпунктирной – для полной кинетической энергии. Значения вышеупомянутых энергий взяты отнесенными к значению полной энергии ξ_0 , равной начальной кинетической энергии цилиндра. На графиках вертикальные линии показывают время выхода из контакта всех точек цилиндра.

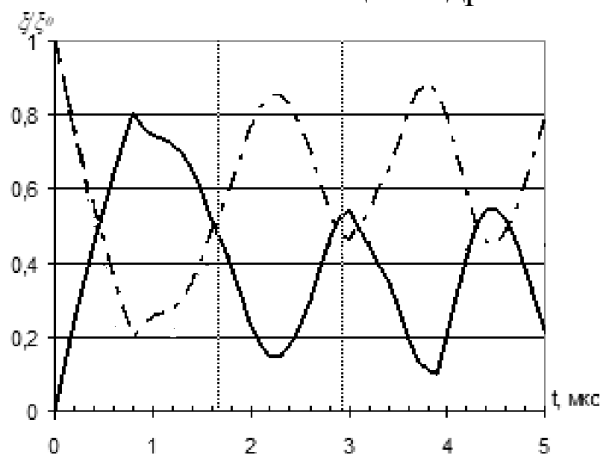


Рис. 4

На рис. 4, соответствующим цилиндру размером 0,5 калибра левая вертикальная линия показывает время первого отскока, а правая – время последнего отскока. В таком цилиндре после момента соприкосновения с преградой начинает возрастать потенциальная энергия, и уменьшаться кинетическая. Потенциальная и кинетическая энергии достигают своих максимального и минимального значений,

соответственно, в момент прихода волны к верхнему торцу цилиндра. Первый отскок происходит после возврата волны к нижнему торцу цилиндра. В этот момент кинетическая энергия еще мала по сравнению с начальным значением, вследствие чего, центр масс цилиндра после отскока движется со скоростью меньшей, чем скорость удара. Колебание кинетической энергии после отскока при малом изменении ее продольной составляющей свидетельствует о значительных поперечных колебаниях. Потенциальная энергия волны напряжения сжатия в момент отскока еще остается в цилиндре. Скорость отскока меньше скорости удара, а скорость возврата цилиндра к начальному размеру после сжатия велика. Это приводит к повторному касанию с преградой вследствие продолжающегося растяжения цилиндра.

Результаты численного решения показали, что длина цилиндра влияет на время контакта его с преградой и, соответственно, на среднюю скорость волны. При небольших длинах цилиндра не только уменьшается средняя скорость волны, но и возникает повторный отскок цилиндра от преграды.

В четвертой главе приводится постановка эксперимента с использованием ультразвукового дефектоскопа и определение скорости распространения упругой волны в стержнях различной длины. Рассмотрено сравнение результатов эксперимента с численным исследованием.

В ультразвуковой дефектоскопии используют колебания от 0,5 до 10 МГц. Для создания колебаний применяют пьезоэлектрические преобразователи. При подведении к электродам переменного напряжения пьезоэлемент совершает вынужденные механические колебания. Также используется и обратный эффект, когда при воздействии упругих колебаний на элемент возникает напряжение на его электродах.

Наиболее подходящим методом для измерения скорости волны в стержне является теневой метод. При использовании этого метода путь ультразвукового импульса от источника до приемника короче, чем в эхо-методе. Это позволит получить более точные результаты.

Для проведения эксперимента применялся ультразвуковой дефектоскоп УД4-Т. В его комплект входят различные по диаметру и частоте преобразователи. Дефектоскоп позволяет применять как эхо-метод, так и теневой. Прибор имеет такие особенности, как видимость расположения дефекта в толще металла или сварном соединении, прямое измерение эквивалентной площади дефекта, оценка его конфигурации и размеров, возможность измерения акустических свойств материалов без использования дополнительного оборудования. При выводе результатов на дисплей прибор позволяет делать "заморозку" изображения и представлять сигнал в виде огибающей.

Исследование цилиндров ультразвуковым дефектоскопом проводилось с пьезоэлектрическими преобразователем, работающим с частотой 2,5 МГц, в качестве источника колебаний на одном из торцов цилиндра. Второй преобразователь, размещенный на противоположном торце, выполнял функцию приемника сигналов. Схема эксперимента показана на рис. 5.

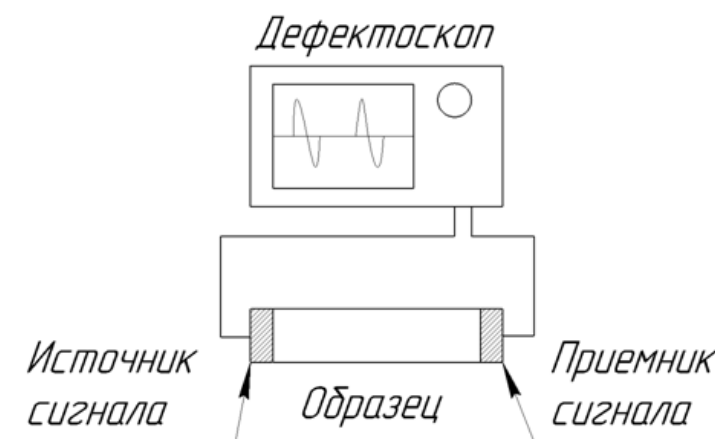


Рис. 5.

В таблице 1 представлены результаты исследования дефектоскопом.

Таблица 1

Материал	Длина стержня, мм	Длительность сигнала, мкс	Скорость волны, м/с
Сталь	2	0,39	5160
	20	3,85	5194
	40	7,82	5114
Медь	2	0,48	4200
	20	5,22	3830
	40	10,33	3872
Алюминий	2	0,36	5500
	20	3,84	5209
	40	7,73	5173

Вычисления скорости сигнала в коротких цилиндрах длиной 2 мм показали, что в некоторых материалах наблюдается повышение скорости распространяющейся волны относительно значения стержневой скорости. На отличие в величинах скоростей может влиять свободная цилиндрическая граница. А повышение скорости может свидетельствовать о снижении влияния границ короткого стержня на процесс распространения в нем волны.

Сравним полученные результаты со средними скоростями волны, определенными численным способом. На рис. 6 показано сравнение скоростей для трех материалов стержней.

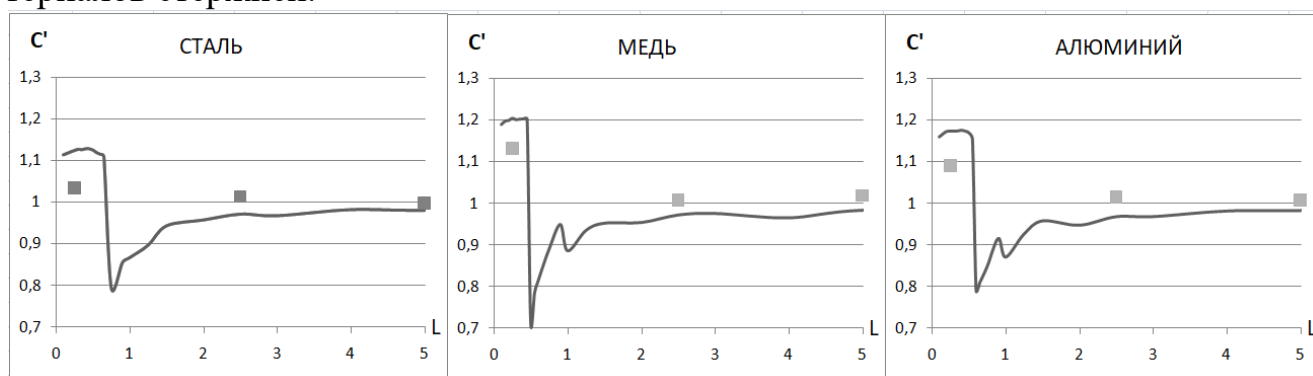


Рис. 6

На графиках (рис. 6) по оси абсцисс отложена длина цилиндра, по оси ординат – скорость волны. Сплошной линией показан результат численного решения, точками – результат ультразвукового исследования. Видно, что при численном решении также наблюдается повышение скорости распространения волны на малых длинах цилиндра. Погрешность экспериментальных данных по сравнению с численными результатами не превышает 12% для коротких цилиндров и 4% – для длинных цилиндров.

Для качественного анализа этого явления необходимо проанализировать распределение напряжений в цилиндре в каждый момент времени. На последующих рисунках изображен результат визуализации программой AutoLISP после расчета в комплексе KRUG24.

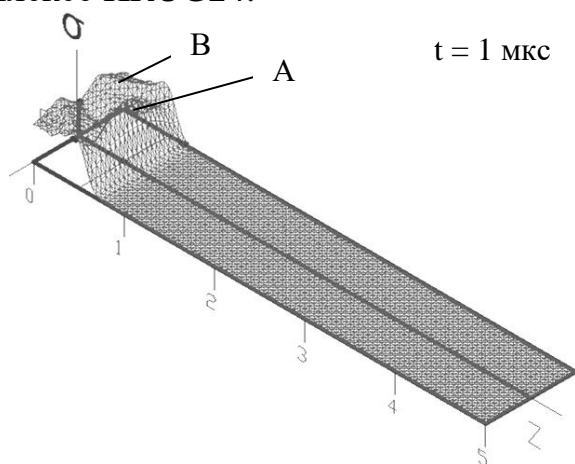


Рис. 7

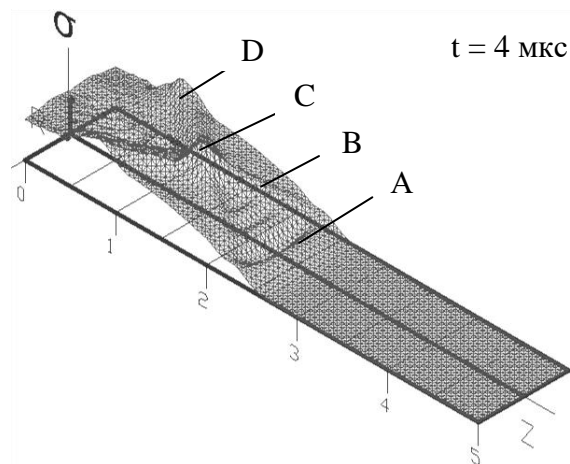


Рис. 8

Во время столкновения цилиндра с преградой возникает волна напряжений, которая перемещается вдоль цилиндра в направлении свободного торца (рис. 7). Плоский фронт волны A перемещается со скоростью продольных волн c_1 . В следствии наличия в цилиндре свободных поверхностей, фронт волны A порождает волну разгрузки с фронтом B . Волна разгрузки движется от свободной цилиндрической поверхности в направлении оси симметрии со скоростью поперечных волн c_2 .

В момент прихода волны B к оси симметрии цилиндра, т.е. при $t = R/c_2$ происходит столкновение волн разгрузки (рис. 8). Это приводит к увеличению напряжения сжатия в локальной области C на оси симметрии цилиндра. После столкновения волн происходит обратное движение фронта D в сторону наружной цилиндрической поверхности со скоростью c_2 . За счет взаимодействия продольной волны и поперечной волны разгрузки напряжение на фронтах A и B начинают ослабевать. При этом фронт A , локальная область C и фронт волны разгрузки в продольном направлении продолжают двигаться со скоростью c_1 .

При рассмотрении полученной волновой картины на начальном этапе видно, что скорость волны немного превышает стержневую скорость. Это и было обнаружено посредством эксперимента.

Основные результаты и выводы

Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. При продольном ударе коротких ($L < D$) однородных цилиндров возникает явление повторного отскока от преграды. Длина цилиндра, при которой возникает повторный отскок, зависит от материала цилиндра, но при этом длина соразмерна его диаметру ($L = 0,5 \dots 1,0 D$).

2. Существуют такая длина цилиндра ($L = 0,1 \dots 0,2 D$), при которой средняя скорость распространения волны превышает «стержневую» скорость ($c \approx 1,2 c_E$), а также длина ($L = 0,5 \dots 0,8 D$), при которой средняя скорость волны оказывается меньше ($c \approx 0,6 c_E$).

3. Экспериментально подтверждено, что средняя скорость волны в коротких цилиндрах ($L < D$) больше «стержневой» скорости ($c \approx 1,1 \dots 1,3 c_E$).

4. Численный анализ полей напряжений подтвердил, что фронт волны, бегущей вдоль короткого цилиндра ($L < D$) в продольном направлении распространяется со скоростью близкой к скорости продольных волн c_1 .

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Баянов Е. В. Распространение упругих волн в однородных по сечению круглых стержнях / А. И. Гулидов, Е. В. Баянов // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 5. – С. 155–162.

Публикации в изданиях, индексируемых базами данных Scopus:

2. Bayanov E. V. Study of elastic wave propagation in a short rod by ultrasound method / E. V. Bayanov, N. V. Kurlaev, K. A. Matveev // Physics AUC. - 2017. - Vol. 27. - 69-78.

Публикации в трудах международных конференций и прочие издания:

3. Баянов Е. В. Распространение упруго-пластических волн в неоднородных и составных стержнях / Е. В. Баянов // Материалы XLVI Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс": Математика/ Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2008, 248с. - С.163

4. Баянов Е. В. Компоненты вектора перемещений в упругом осесимметричном стержне / Е. В. Баянов, К. А. Матвеев // Современные тенденции развития науки и технологий : сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф. - 2015. - № 6-1. - С. 5-8.

5. Баянов Е. В. Анализ дисперсионного уравнения в задаче о распространении упругой волны в стержне / Е. В. Баянов, Н. В. Курлаев // Современные тенденции развития науки и технологий : сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф. - 2016. - № 6/2. - С. 5-8.

6. Баянов Е. В. Определение скорости звука в стержне с помощью ультразвукового дефектоскопа / Е. В. Баянов, Н. В. Курлаев, Ю.О. Поляков // Тенденции развития науки и образования : сб. ст. по материалам междунар. науч. конф. - 2017. - № 33/1. - С. 15-17.

7. Bayanov E. V. Determination of the speed of an elastic wave in a short rod by an ultrasonic method [Electronic resource] / E. V. Bayanov, N. V. Kurlaev, K. A. Matveev // 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018) : proc., China, Harbin, 30 May – 1 June 2018. – Harbin : IEEE, 2018. – P. 670-672.

8. Баянов Е. В. Визуализация напряжений в стержне с помощью AutoLISP / Е. В. Баянов // Сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции "Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности". - НГТУ, 2009. - с.50-52.

9. Баянов Е. В. Уравнение поверхности скорости волны / Е. В. Баянов // Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности : сб. материалов II Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 21-23 апр. 2010 г. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. - С. 155-156.

10. Баянов Е. В. К вопросу о скорости упругих волн в коротких осесимметричных стержнях / Е. В. Баянов, А. И. Гулидов // Сборник научных трудов НГТУ. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - Вып.1(59).- С.65-72.

11. Баянов Е. В. Упругие волны в тонких трубах / Е. В. Баянов // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития, 2011.

12. Баянов Е. В. Визуализация волн напряжений в стержне при ударе / Е. В. Баянов // Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности : сб. материалов III Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 19-20 апр. 2011 г. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. - С. 40-45.

13. Баянов Е. В. Распространение упругих волн в трубе / Е. В. Баянов, А. И. Гулидов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. - 2012. - № 1-1.- С. 100-103.

14. Баянов Е. В. Визуализация распространения волн с помощью прикладных программ / Е. В. Баянов // Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 16 мая 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 35–37.

15. Баянов Е. В. Визуализация распространения волн в стержне / Е. В. Баянов // Труды 14 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 100-летию со дня рождения А. И. Покрышкина (24–26 апр. 2013 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 29-31.