

На правах рукописи

С.И.С.

ШАРАБАНОВА Алла Владимировна

**СДВИГОВЫЕ ВОЛНЫ В МАТЕРИАЛАХ,
УПРУГИЕ СВОЙСТВА КОТОРЫХ ЗАВИСЯТ ОТ ВИДА
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород, 2004

Работа выполнена в Нижегородском филиале Института машиноведения
им. А.А.Благодрава Российской Академии наук.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Матвеев Юрий Иванович (ВГАВТ, Н.Новгород)

кандидат технических наук
Миронов Анатолий Алексеевич
(НГТУ, Н.Новгород)

Ведущая организация: **Научно-исследовательский центр
контроля и диагностики технических
систем Госстандарта РФ** (Н.Новгород)

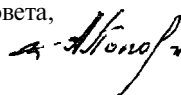
Защита состоится «22» декабря 2004 г. в 15-00 час. на заседании
диссертационного совета Д 212.165.08 в Нижегородском государственном
техническом университете по адресу: 603600, ГСП-41,
г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корп. 1, ауд.1258.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим
выслать по указанному адресу на имя Ученого секретаря диссертационного
совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского
государственного технического университета.

Автореферат разослан «17» ноября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



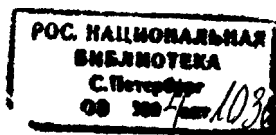
А.Н.Попов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Исследования упругих свойств многих материалов указывают на существенное отличие в их поведении от того, которое описывается моделью Гука. Основными отличиями являются зависимость модулей упругости от вида напряженного состояния и резкое (скачкообразное) изменение модулей при переходе от растяжения к сжатию. У различных материалов это свойство, именуемое разномодульностью, проявляется в разной степени, у некоторых весьма существенно влияет на их поведение при нагружении. Разномодульность определяется рядом факторов, прежде всего наличием в материале микротрещин и локальных включений. В экспериментах было показано, что для зернистого графита модули упругости при растяжении на 20% меньше модулей упругости при сжатии; для чугуна модуль Юнга при сжатии на 20% выше, чем при растяжении; для бронзы на 10%; для стали на 5%. Свойством разномодульности обладает такой распространенный строительный материал, как бетон. Для некоторых видов мелкозернистого бетона модуль Юнга при растяжении в 2-3 раза меньше, чем при сжатии. Это также характерно для грунтов и горных пород.

Применение разномодульной модели упругой среды позволяет учитывать влияние трещиноватости и самого напряженного состояния на поведение материалов. Широкое распространение подобных материалов и их использование в различных областях делают важной разработку адекватных моделей сплошной среды.

Актуальность обусловлена также развитием методов нелинейной диагностики поврежденных материалов. При распространении и взаимодействии упругих волн в таких средах проявляется большое разнообразие нелинейных эффектов, в частности, за счет квадратичной нелинейности, наблюдается генерация волн комбинационных частот (второй гармоники, суммарной и разностной частот). Исследование нелинейных акустических эффектов в микронеоднородных средах актуальны для развития общей теории нелинейных волновых процессов. Нелинейные методы диагностики среды потенциально являются более чувствительными, чем линейные. Поврежденные материалы, наряду с нелинейными дефектами (микротрещинами, локальными включениями), содержат, как правило, множество других - линейных дефектов и неоднородностей (полости, слои). При линейных методах диагностики эти неоднородности вносят значительный вклад в рассеянное поле упругих волн, на фоне которого обнаружение сигналов от наиболее опасных (с точки зрения разрушения) дефектов твердого тела - трещин, будет практически невозможно. При использовании нелинейных методов диагностики, основанных на взаимодействии упругих волн, основной вклад в нелинейно рассеянные волны будут давать именно нелинейные дефекты. В связи с этим, создание нелинейных моделей дефектов твердых тел, а также развитие, на их основе, неразрушающих методов анализа и контроля напряженно - деформированного состояния, является одной из актуальных проблем нелинейной акустики.



Цель работы состоит в:

- построении нелинейных математических моделей, описывающих распространение плоской сдвиговой волны в разномодульном материале.
- исследовании распространения плоской сдвиговой волны Римана в поврежденной и неповрежденной среде.
- исследовании влияния микроструктуры на волновые процессы в поврежденной среде.

Научная новизна.

- получена зависимость параметра поврежденности от пластической деформации
- проведена оценка параметра поврежденности материала на основе изучения эволюции сдвиговой волны в поврежденном и неповрежденном материале.
- проанализированы зависимости, связывающие параметры стационарных волн деформации с поврежденностью материала.

Практическая ценность. Проведенные исследования позволяют разработать новый акустический метод диагностики и неразрушающего контроля конструкционных материалов, основанный на изучении генерации ультразвуковой сдвиговой волны удвоенной частоты и связи параметров этой волны с параметром поврежденности.

Основные результаты диссертации были получены при выполнении работы по:

- Комплексной программе Российской Академии наук, раздел II «Машиностроение» по теме: «Разработка методов диагностики напряженно-деформированного состояния, структуры и свойств материалов и элементов конструкций, основанных на применении эффектов нелинейной акустики» (2001-2003 г.г., научн. рук проф. Ерофеев В.И.);
- Плану основных заданий Нф ИМАШ РАН 2004-2005 г.г. по теме: «Волны деформации в структурно-неоднородных материалах и элементах конструкций» (научн. рук. проф. Ерофеев В.И., проф. Потапов А.И.);
- Грантам РФФИ: «Нелинейные акустические волны в твердых телах с дислокациями» (2000-2002 г.г., №00-02-17337, рук. проф. Ерофеев В.И.); «Нелинейные акустические волны в неоднородных, поврежденных и структурированных средах. Теория. Эксперимент. Приложения.» (2003-2005 г.г., №03-02-16924, рук. проф. Ерофеев В.И.).
- Федеральной целевой программе «Интеграция»: «Экспериментальное исследование и математическое моделирование деформации и разрушения новых материалов и прогнозирование ресурса конструкций» (рук. проф. Баженов В.Г.).

Результаты работы нашли отражение в специальных курсах лекций: «Волновые процессы в сплошных средах» и «Волновые процессы в

механических системах. Теория и приложения», читаемых студентам НГТУ и ННГУ.

Работа была поддержана стипендией имени академика Г.А. Разуваева (2002г.).

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается их согласованностью с общими положениями механики сплошных сред, теории колебаний и волн, совпадением экспериментальных результатов с результатами расчетов.

На защиту выносятся следующие основные положения работы:

- Математическая модель, описывающая распространение плоской сдвиговой волны в разномодульном материале. Исследование второй гармоники плоской сдвиговой волны. Сопоставление теоретических зависимостей с экспериментальными данными.
- Результаты исследования распространения плоской сдвиговой волны Римана в поврежденном и неповрежденном материале. Сравнение параметров точек опрокидывания волны Римана для поврежденного и неповрежденного материала.
- Результаты исследования влияния микроструктуры на распространение плоской сдвиговой волны в поврежденной среде.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на XI и XIII сессии Российского Акустического Общества (Москва, 2001; 2003); на Международной научно-технической конференции «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники» (Егорьевск, 2002г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве» (Н.Новгород, НГТУ, 2002г.); на восьмой нижегородской сессии молодых ученых (Дзержинск, 2003г.).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 11 работах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 107 стр., диссертация содержит 36 рисунков. Список литературы состоит из 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **Первой** главе дается обзор основных гипотез разномодульной теории упругости, сформулированных С.А.Амбарцумяном и А.А.Хачатряном, Е.В.Ломакиным и Ю.Н.Работновым. Решается задача о построении функционала, описывающего поведение упругой среды с микронарушениями.

Выводятся уравнения, описывающие динамические процессы в разномодульном материале.

В п.1.1 приводятся данные экспериментальных исследований материалов, обладающих свойствами разномодульности.

Например, для конструкционных графитов ВПП и APB модуль упругости при сжатии больше модуля упругости при растяжении соответственно на 10 и 20%, а для графита ПРОГ — примерно в 2 раза. С другой стороны, для графита АТJ-S модуль упругости при растяжении на 20% больше модуля упругости при сжатии.

Рассматриваются различные модели, позволяющие учитывать разномодульность.

В п.1.2, следуя модели Ляховского-Мясникова, вводится зависимость внутренней энергии среды U от плотност ρ , инвариантов тензора деформации ϵ_{ij} и коэффициентов λ , μ , γ , в следующем виде:

$$U = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\lambda}{2} I_1^2 + \mu I_2 - \gamma I_1 \sqrt{I_2} \right), \quad (1)$$

$$I_1 = \epsilon_{ij} \delta_{ij}, \quad I_2 = \epsilon_{ij} \epsilon_{ji}.$$

В потенциале (1) кроме обычных для упругой среды квадратичных слагаемых I_1^2 , I_2 включено слагаемое $\gamma I_1 \sqrt{I_2}$, которое позволяет учесть зависимость упругих характеристик от вида напряженного состояния и скачкообразное изменение модулей упругости при переходе от растяжения к сжатию:

$$\lambda^s = \lambda - \frac{\gamma}{\xi}; \quad \mu^s = \mu - \frac{\gamma}{2} \xi; \quad \xi = I_1 / \sqrt{I_2},$$

где γ - параметр разномодульности, характеризующий степень разрушения материала.

В п.1.3 получено уравнение, описывающее распространение плоской сдвиговой волны в разномодульном материале:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_t^2 \left(1 - \frac{3\sqrt{2}\gamma}{2\mu} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

Во Второй главе рассматривается распространение плоской сдвиговой волны в разномодульной среде - среде с квадратичной нелинейностью. Как известно, в такой среде следует ожидать генерацию второй гармоники сдвиговой волны.

В п.2.1 ищется решение уравнения (2) в виде двух квазигармонических волн, распространяющихся на основной и удвоенной частотах. Считаем, что среда слабо нелинейная (амплитуды волн меняются на малую величину при прохождении волной расстояния порядка длины волны):

$$v(x, t) = A_1(\epsilon x) e^{i(\omega t - kx)} + A_2(\epsilon x) e^{2i(\omega t - kx)} + \text{к.с.}, \quad (3)$$

где ϵ - малый параметр.

Если считать, что на границе поврежденного материала $x=0$ была возбуждена лишь волна частоты ω , а волна удвоенной частоты на границе отсутствовала, то:

$$A_1(0) = A_0; \quad A_2(0) = 0.$$

Были рассмотрены 2 случая:

1) Амплитуда второй гармоники мала по сравнению с амплитудой основной волны $|A_2| \ll |A_1|$.

В этом случае обратным влиянием второй гармоники на основную волну можно пренебречь. Зависимость действительной амплитуды второй гармоники от параметра поврежденности имеет следующий вид:

$$|a_2| = \frac{3k^2 a_0^2 x \gamma^*}{4\sqrt{2} \mu}, \quad (4)$$

где $\gamma^* = \gamma / \epsilon$, ϵ - малый параметр.

Формула (4) справедлива до длины $x \ll x^*$,

$$\text{где } x^* = \frac{4\sqrt{2}\mu}{3\gamma^* k^2 a_0}.$$

На длине x следует ожидать значительную перекачку энергии основной волны в энергию второй гармоники.

2) Амплитуда второй гармоники сравнима с амплитудой основной волны.

Для этого случая были получены следующие зависимости амплитуд основной и второй гармоник от параметра поврежденности:

$$a_1 = \frac{a_0}{ch \frac{x^{**} \gamma^*}{\mu}}, \quad (5)$$

$$a_2 = a_0 th \frac{x^{**} \gamma^*}{\mu}, \quad (6)$$

где $x^{**} = \frac{3k^2 a_0 x}{4\sqrt{2}}$ - некоторая константа.

Соотношения (5), (6) показывают, что, зная амплитуду второй гармоники и характерное расстояние на котором она возбуждается (например $x \approx x^*$), можно оценить параметр поврежденности материала γ/μ .

П.2.2 посвящен эксперименту по обнаружению второй гармоники сдвиговой волны.

Для исследования второй гармоники сдвиговой волны был подготовлен образец гантельного типа из стали 09Г2С. Образец был деформирован при одноосном растяжении на 40%. Затем образец был отфрезерован и отполирован с целью получения плоскопараллельности поверхностей и хорошего качества акустического контакта. Поверхность образца была разбита на зоны. Установка для исследования второй гармоники сигнала, прошедшего через материал образца, состояла из генератора гармонических колебаний 1, пьезокерамических широкополосных излучающего и приемного преобразователей 2,4, высокочастотного усилителя 5 и селективного вольтметра 6. Измерения амплитуды первой и второй гармоники сигнала, прошедшего через исследуемый материал, проводили последовательно от зоны 1 до n зоны.

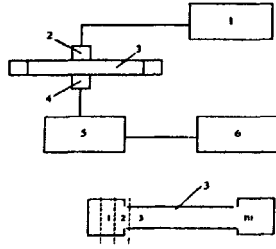


Рис.1

В результате, были получены отношения амплитуд первой и второй гармоник в исследуемых зонах, а также распределение пластической деформации в этих зонах:



Рис.3

Корреляционная связь между соотношением амплитуд A_2 / A_1 и пластической деформацией E_{pl} имеет существенное значение ($\approx 0,9$).

По результатам эксперимента, с использованием зависимостей, полученных в п.2.1, была найдена зависимость параметра поврежденности от пластической деформации:

$$\frac{\gamma}{\mu} = aE_{pl} + b, \quad (7)$$

где $a = 0.4412880737$, $b = 0.00057690415$.

В Третьей главе анализируется распространение сдвиговых волн Римана в поврежденном и неповрежденном материале. Показано, что профиль волны Римана по мере распространения искажается. В некоторый момент времени волна Римана приобретает бесконечную крутизну и становится неоднозначной. Это явление называют опрокидыванием волны.

Были найдены параметры точек опрокидывания волны Римана в поврежденной среде (среде с квадратичной нелинейностью) и неповрежденной среде (среде с кубической нелинейностью).

В п.3.1 осуществляется переход от уравнения, описывающего распространение плоской сдвиговой волны в поврежденном материале:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_\tau^2 \left(1 - \alpha_1 \frac{\partial v}{\partial x}\right) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0,$$

полученного в п.1.3, к уравнению Римана:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \left(c_\tau - \frac{c_\tau \alpha_1}{2} \varepsilon\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

где $\varepsilon = \frac{\partial v}{\partial x}$ - осевая деформация, $\alpha_1 = \frac{3\sqrt{2} \gamma}{2 \mu}$

характеризующий нелинейность среды. -малый параметр,

После замены переменных $\xi = x - c_\tau t$, $\tau = t$, уравнение (8) примет вид:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} - \frac{c_\tau \alpha_1}{2} \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} = 0,$$

общее решение которого есть:

$$\varepsilon(\xi, \tau) = F\left(\xi + \frac{c_\tau \alpha_1}{2} \varepsilon \tau\right) - \text{волна Римана.}$$

Опрокидывание волны Римана в среде с квадратичной нелинейностью происходит в момент времени $t_{*2} = \frac{2}{\alpha_1 k c_\tau \varepsilon_0}$, на расстоянии $x_{*2} = \frac{2}{\alpha_1 k \varepsilon_0}$.

В п.3.2 получены параметры точки опрокидывания сдвиговой волны Римана в среде с кубической нелинейностью:

$$t_{*3} = \frac{2}{\alpha_2 k c_0 \varepsilon_0^2}; \quad x_{*3} = \left[\pm \frac{\pi}{4k} - \frac{1}{2k} \right] - \frac{2}{\alpha_2 k \varepsilon_0^2}.$$

На основе полученных данных были сделаны следующие выводы:

1) При $10^{-2} < \gamma/\mu < 1$ расстояние, на котором произойдет опрокидывание волны, для среды с квадратичной нелинейностью будет меньше, чем для среды с кубической нелинейностью следовательно, эффект нелинейности в поврежденной среде выражен сильнее чем в неповрежденной среде.

2) При $0 < \gamma/\mu < 10^{-2}$ расстояние, на котором произойдет опрокидывание волны, для среды с квадратичной нелинейностью будет больше, чем для среды с кубической нелинейностью, следовательно, эффект нелинейности в поврежденной среде выражен слабее чем в неповрежденной среде.

Четвертая глава посвящена изучению распространения плоских сдвиговых волн в поврежденной среде с микроструктурой.

Для оценки влияния микроструктуры на динамические процессы в поврежденной среде были использованы гипотезы Леру о наличии моментных напряжений. Внутренняя энергия представлена в виде разложения по инвариантам тензора деформаций и градиента микродисторсии

$\chi_{klm} = -\frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_m}$, характеризующего микроструктуру материала. Это

позволяет записать функционал действия в виде:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} dt \iiint_V \left(\frac{\rho}{2} \dot{u}_i^2 - \frac{\lambda}{2} I_1^2 - \mu I_2 + \gamma I_1 \sqrt{I_2} - \right. \\ \left. - 2\mu M^2 (\chi_{klm}^2 + \tilde{\nu} \chi_{klm} \chi_{lkm}) \right) d^3x \quad (9)$$

Здесь M и $\tilde{\nu}$ - константы, характеризующие микроструктуру среды.

Из условия стационарности функционала (9) было получено уравнение сдвиговых колебаний:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_\tau^2 \left(1 - \frac{3\sqrt{2}}{2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 4c_\tau^2 M^2 \text{sign} M \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0 \quad (10)$$

В безразмерных переменных:

$$v = v_0 v', \quad t = T t', \quad x = X x', \quad X = \Lambda d, \quad T = \frac{X}{c_\tau}, \quad \frac{v_0}{X} = \varepsilon_0,$$

уравнение (10) имеет вид:

$$\frac{\partial^2 v'}{\partial t'^2} - \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} + \beta \frac{\partial^4 v'}{\partial x'^4} = \alpha \frac{\partial v'}{\partial x'} \frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2}, \quad (11)$$

где

$$\beta = 4M^2 \text{sign} M / \Lambda^2 d^2; \quad \alpha = -\varepsilon_0 \frac{3\sqrt{2} \gamma}{2 \mu}$$

- малые параметры среды, характеризующие дисперсию и нелинейность среды, Λ - безразмерный масштаб волны ($L = \Lambda d$ - длина волны), $\varepsilon_0 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$ - характерная величина упругих деформаций, M - константа, характеризующая микроструктуру среды, γ/μ - коэффициент поврежденности материала, d - средний диаметр зерна или средняя толщина армирующего элемента.

На распространение плоских сдвиговых волн, описываемых уравнением (11), влияют два фактора: дисперсия и нелинейность. Нелинейность приводит к зарождению в волне новых гармоник, в которые непрерывно перекачивается энергия основного возмущения. Это способствует появлению в движущемся профиле волны резких перепадов. Дисперсия же, наоборот, сглаживает перепады из-за различия в фазовых скоростях гармонических составляющих волны. Совместное действие этих двух факторов, их "конкуренция", может привести к формированию стационарных волн. Такие волны распространяются с постоянной скоростью без изменения своей формы.

Решения уравнения (11) искались в виде стационарных волн деформаций $W(\xi = x' - Vt') = \frac{dv'}{d\xi}$, которые описываются дифференциальным уравнением

в обыкновенных производных:

$$\frac{d^2 W}{d\xi^2} + m_1 W + m_2 W^2 = 0, \quad (12)$$

где $V = \text{const}$ - скорость распространения стационарных волн; ξ - "бегущая" координата; $W = \frac{dv'}{d\xi}$ - сдвиговая деформация; $m_1 = \frac{V^2 - 1}{\beta}$; $m_2 = -\frac{\alpha}{2\beta}$.

Поведение нелинейных стационарных волн деформации существенно зависит от знаков параметров нелинейности и дисперсии, а также от величины скорости.

Для большинства конструкционных материалов $\alpha < 0$.

Были рассмотрены два случая:

1) Стационарные волны в среде с положительной дисперсией ($\beta > 0$).

Среди решений уравнения (12) были выбраны такие, которые удовлетворяют условию отсутствия постоянной составляющей у деформации $W(\xi)$ (в противном случае пришлось бы допустить возможность линейного роста амплитуд смещения $W(\xi)$, что в условиях поставленной задачи реализоваться не может).

Таким образом, уравнение (12) описывает два типа нелинейных стационарных волн: "дозвуковой" ($0 < V < 1$) солитон деформации:

$$W(\xi) = \frac{A^*}{ch^2\left(\frac{x' - Vt'}{\Delta}\right)}, \quad (13)$$

с параметрами:

$$A^* = \frac{3(V^2 - 1)}{\alpha} - \text{амплитуда солитона}, \quad (14)$$

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{-m_1}} - \text{ширина солитона } (s = 1), \quad (15)$$

и "сверхзвуковую" ($V > 1$) периодическую волну:

$$W(\xi) = -\frac{m_1}{m_2} + A \left(\frac{1 + s^2}{3s^2} \right) - A s n^2 \left[\sqrt{\frac{m_2 A}{6s^2}} \xi, s \right], \quad (16)$$

с амплитудой:

$$A = -\frac{3s^2(V^2 - 1)}{\alpha\sqrt{1 - s^2 + s^4}} - \text{амплитуда периодической волны}. \quad (17)$$

Формулы (14) и (17) позволяют построить зависимости, связывающие амплитуду стационарной волны, ее скорость, модуль эллиптической функции и параметр поврежденности.

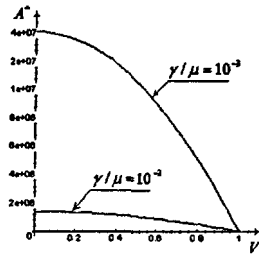
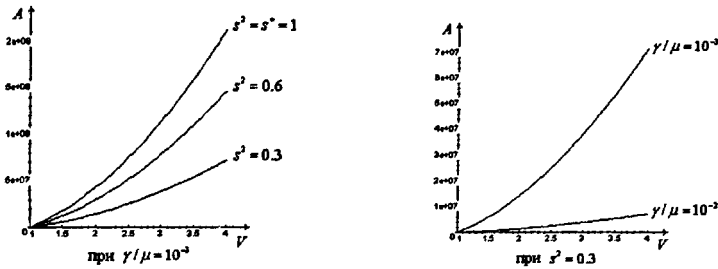


Рис.4

На рис.4 показана зависимость амплитуды солитона A от его скорости V для различных значений коэффициента поврежденности γ/μ в диапазоне скоростей $0 < V < 1$.

Очевидно, что при увеличении значения параметра поврежденности, амплитуда солитона убывает медленнее.



На рис.5 приведены качественные зависимости амплитуды периодической волны A от ее скорости V для различных значений коэффициента нелинейных искажений s при фиксированном значении параметра поврежденности в диапазоне скоростей $V > 1$. При увеличении S амплитуда волны возрастает быстрее с ростом скорости. На рис. 6 приведены зависимости амплитуды периодической волны A от ее скорости V для различных значений параметра поврежденности γ/μ при фиксированном значении коэффициента нелинейных искажений s . При увеличении параметра поврежденности амплитуда волны нарастает медленнее.

2) Стационарные волны в среде с отрицательной дисперсией ($\beta < 0$).

Уравнение (12) описывает два типа нелинейных стационарных волн: "дозвуковую" ($0 < V < 1$) периодическую волну:

$$W(\xi) = -\frac{m_1}{m_2} - A \left(\frac{1+s^2}{3s^2} \right) + Asn^2 \left[\sqrt{-\frac{m_2 A}{6s^2}} \xi, s \right] \quad (18)$$

с амплитудой:

$$A = \frac{3s^2(V^2 - 1)}{\alpha \sqrt{1 - s^2 + s^4}} - \text{амплитуда периодической волны,} \quad (19)$$

и "сверхзвуковой" ($V > 1$) солитон деформации:

$$W(\xi) = -\frac{A^*}{ch^2 \left(\frac{x' - Vt'}{\Delta} \right)}, \quad (20)$$

с параметрами;

$$A^* = \frac{3(V^2 - 1)}{\alpha} - \text{амплитуда солитона,} \quad (21)$$

$$\Delta = \frac{2}{\sqrt{-m_1}} - \text{ширина солитона (s = 1).} \quad (22)$$

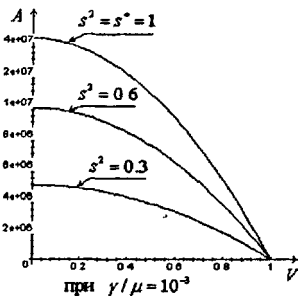


Рис. 7

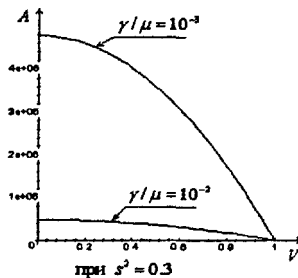
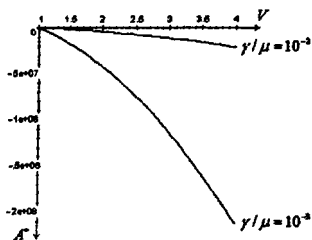


Рис. 8

На рис.7 приведены качественные зависимости амплитуды периодической волны A от ее скорости V для различных значений коэффициента нелинейных искажений s при фиксированном значении параметра поврежденности в диапазоне скоростей $0 < V < 1$. При увеличении s амплитуда волны убывает

быстрее с увеличением скорости. На рис. 8 приведены зависимости амплитуды периодической волны A от ее скорости V для различных значений параметра поврежденности γ/μ при фиксированном значении коэффициента нелинейных искажений s . При увеличении параметра поврежденности амплитуда волны убывает медленнее с увеличением скорости.



На рис.9 показана зависимость амплитуды солитона A от его скорости V для различных значений коэффициента поврежденности γ/μ в диапазоне скоростей $V>1$. В этом диапазоне скоростей амплитуда солитона отрицательна. При увеличении значения параметра поврежденности, амплитуда солитона возрастает медленнее.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получены уравнения, описывающие динамические процессы в материалах по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию. Показано, что наличие поврежденности приводит к тому, что при распространении в среде сдвиговой волны появляется квадратичная нелинейность (в случае распространения сдвиговой волны в идеально — упругой среде, самая младшая нелинейность по сдвиговым колебаниям была бы кубической).
2. Показано, что разномодульность материала приводит к возможности генерации второй гармоники сдвиговой волны. Выявлены основные закономерности генерации второй гармоники. Найдены зависимости, связывающие амплитуды волн, распространяющихся на основной и удвоенной частотах, с параметрами поврежденности. Получена характерная длина, на которой следует ожидать значительной перекачки энергии основной волны в энергию второй гармоники, что дает возможность оценить параметр поврежденности материала. На основе построенной математической модели, с помощью результатов экспериментального исследования, найдена зависимость между параметром поврежденности и пластической деформацией.
3. На основе изучения профиля волны Римана был проведен анализ распространения плоской сдвиговой волны в поврежденном и неповрежденном материалах. Показано, что профиль волны Римана по мере распространения

искажается. Это явление наблюдается как в среде с квадратичной нелинейностью, так и в среде с кубической нелинейностью. Найдены параметры точек опрокидывания волны для поврежденного и неповрежденного материала. Сравнение параметров позволяет сделать вывод, что поврежденность вносит ощутимый вклад при значениях параметра поврежденности: $10^{-2} < \gamma/\mu < 1$. При значениях параметра поврежденности меньших 10^{-2} поврежденный материал ведет себя как неповрежденный.

4. Показано, что в нелинейном приближении уравнение динамики поврежденной среды с моментными напряжениями допускает решение в виде стационарных волн деформации - периодических и уединенных (солитонов), параметры которых существенно зависят от коэффициента поврежденности материала. Проанализированы зависимости, связывающие параметры стационарных волн деформации с поврежденностью материала. Выявленные зависимости можно положить в основу акустического метода диагностики поврежденности материала.

ПУБЛИКАЦИИ

1. **Ерофеев В.И., Моничев С.А., Шарабанова А.В.** Влияние поврежденности конструкционных материалов на генерацию второй гармоники упругой сдвиговой волны // Сборник трудов XI сессии российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2001. Т.1. С.294-296.
2. **Ерофеев В.И., Смирнов СИ., Шарабанова А.В.** Испытания материалов и конструкций. (Обзор докладов международной научно-технической конференции) // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. №1. С.117-121.
3. **Ерофеев В.И., Шарабанова А.В.** Простые волны сдвиговой деформации в разномодульных материалах // Труды международной научно-технической конференции «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники» (Чкаловские чтения). Егорьевск (Моск.обл.). ЕАТК ГА. 2002.
4. **Ерофеев В.И., Шарабанова А.В.** Распространение сдвиговых волн Римана в разномодульных материалах // Моделирование динамических систем / Сб.научн.трудов. Нижний Новгород : Изд-во «Интелсервис» Нф ИМАШ РАН, 2002. С. 47-53.
5. **Ерофеев В.И., Шарабанова А.В., Шешенина О.А.** Упругие волны в структурированных и поврежденных материалах// Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве/ Всеросс. н.-т. конференции. Н.Новгород: изд.-во НГТУ. 2002. С. 293-294.

6. **Шарабанова А.В.** Диагностика поврежденности материалов и элементов конструкций на основе исследования эволюции волн Римана / Тез. докл. 8-ой нижегородской сессии молодых ученых. Н. Новгород: Изд. Гладкова О. В. 2002. С. 126-127.
7. **Ерофеев В.И., Кажаяев В.В, Мишакин В.В., Родюшкин В.М., Шарабанова А.В.** Волны сдвиговой деформации в разномодульных материалах // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2003. Спецвыпуск. С. 170-175.
8. **Ерофеев В.И., Шарабанова А.В.** Нелинейные стационарные волны в поврежденной среде // Вестник ВГАВТ. Надежность и ресурс в машиностроении. Н.Новгород : Изд-во ГОУ ВПО ВГАВТ, 2003. Вып. 4. С. 70-90.
9. **Ерофеев В.И., Шарабанова А.В.** Солитоны сдвиговой деформации в поврежденной среде с микроструктурой // Сборник трудов XIII сессии российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2003. Т. 1. С.245-248.
10. **Рыжаков А.И., Шарабанова А.В.** Волны Римана в двухкомпонентной сдвиговой твердой смеси // Прикладная механика и технологии машиностроения / Сб.научн.трудов. Нижний Новгород : Изд-во «Интелсервис» Нф ИМАШ РАН, НИЛИМ, 2003. С. 158-162.
11. **Ерофеев В.И., Шарабанова А.В.** Сдвиговые волны Римана в материале, свойства которого зависят от вида напряженного состояния // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. №1. С. 20-23.

Подписано в печать 12.11.2004. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 709.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

№25887