

ВЛИЯНИЕ МЕДЛЕННОЙ ДИНАМИКИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ С ОСТАТОЧНЫМИ И СДВИГОВЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

© 2013 г. А. И. Коробов, Н. И. Одина, Д. М. Мехедов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет

119991 Москва, Ленинские горы

E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 13.02.2013 г.

Методом нелинейной резонансной ультразвуковой спектроскопии исследованы эффекты быстрой и медленной динамики в акустических резонаторах из горной породы и металлических образцах из микрокристаллического сплава алюминия Д16. В металлических образцах были предварительно искусственно созданы остаточные сдвиговые деформации. Обнаружено уменьшение модулей Юнга в процессе быстрой динамики в резонаторах из горной породы и сплава Д16 с остаточными деформациями. На основе анализа полученных экспериментальных результатов был сделан вывод: эффект медленной динамики, наблюдаемый в эксперименте, не может быть объяснен только термоупругими эффектами. Эффект медленной динамики в значительной мере связан с наличием метастабильных состояний дефектной структуры, в которые она переходит в результате приложения к образцу силового воздействия (динамического или статического). После его снятия происходит медленная релаксация дефектной структуры к ее равновесному состоянию.

Ключевые слова: мезомасштабные неоднородности, дефектная структура, структурная нелинейность, эффекты быстрой и медленной динамики, нелинейная резонансная ультразвуковая спектроскопия.

DOI: 10.7868/S0320791913040096

ВВЕДЕНИЕ

Наличие мезомасштабных неоднородностей и дефектной структуры оказывает существенное влияние на ряд физических свойств, в том числе на упругие свойства твердых тел [1–7]. Дефекты заметно изменяют соотношение между напряжением и деформацией либо из-за сильно нелинейного локального деформирования внешней нагрузкой (дислокации, границы зерен, микротрещины, полости, поры и т.д.), либо вследствие сингулярного поведения внутренних напряжений в их ближайшей окрестности (концентраторы напряжений), либо по другим подобным причинам, включая собственное нелинейное взаимодействие дефектов. В результате такого поведения дефектной структуры реальный материал в целом обнаруживает нелинейные упругие свойства даже при относительно слабых действующих напряжениях. При этом оказывается, что упругая структурная (неклассическая) нелинейность может существенно (на 2–4 порядка) превышать классическую нелинейность, связанную с ангармонизмом кристаллической решетки.

Первая ключевая работа по изучению влияния дефектной структуры на нелинейные упругие свойства поли- и монокристаллов металлов была выполнена в 1963 г. В.А. Красильниковым с соав-

торами [1]. В этой работе экспериментально наблюдалась генерация второй сдвиговой гармоники в изотропных поликристаллических металлах: алюминии, магниево-алюминиевом сплаве МА-8, хотя из пятиконстантной теории упругости Мэрнагана [2] следовало, что распространение чисто сдвиговой волны в изотропном твердом теле не должно сопровождаться генерацией второй сдвиговой гармоники. Кроме того, в [1] было экспериментально показано, что дислокации, микротрещины, локальные внутренние напряжения могут существенно изменить нелинейные упругие свойства твердых тел с дефектами. И в таких материалах, наряду с классической нелинейностью, проявляется структурная (неклассическая) нелинейность. Возможные механизмы структурной нелинейности рассмотрены в [7–9].

Значительной неклассической нелинейностью обладают такие структурно неоднородные материалы, как горные породы, неконсолидированные среды, различные керамики, а также металлы с дефектами [1, 4, 10–13]. В отличие от классической нелинейности структурная нелинейность является локальной и имеет пороговый характер, т.е. ее величина определяется состоянием и величиной дефектов в каждой точке материала. Это свойство структурной нелинейности

позволяет судить не только о наличии дефектов в исследуемом материале, но и получить информацию о пространственном распределении дефектов в нем [14, 15]. В материалах с дефектами одновременно с сильной упругой структурной нелинейностью наблюдаются эффекты медленной и быстрой динамики. Эффект медленной динамики (Slow Dynamics) связан с медленной релаксацией упругих свойств твердых тел с дефектами, к которым предварительно было приложено сильное статическое или динамическое механическое воздействие. Явление медленной динамики впервые наблюдалось в работе [1]. В этой работе наблюдалось увеличение амплитуды второй сдвиговой гармоники в твердотельном образце с дефектами при локальном силовом воздействии на образец и медленном, в течение 10–15 с возвращении величины амплитуды гармоники к ее первоначальному значению после снятия силового воздействия. Эффект быстрой динамики (Fast Dynamics) заключается в зависимости скорости и поглощения упругих волн в твердых телах с дефектами от амплитуды волны. Эффект медленной динамики наблюдался в большом количестве материалов как в лабораторных [1, 4, 6, 10, 11, 16], так и в натуральных экспериментах [17]. В [18] наблюдалась медленная кинетика вязкоупругих свойств нефти при низкочастотных сдвиговых колебаниях.

Целью данной работы является исследование особенностей проявления эффектов медленной и быстрой динамики в образцах из горных пород и в металлических образцах с искусственно созданными остаточными деформациями.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментальных исследований нами были приготовлены акустические резонаторы из образцов горной породы – серпентина (ГП) и из металлического сплава алюминия Д16Т. Резонаторы из ГП имели форму цилиндра длиной $L = 132$ мм и диаметром $d = 16$ мм. Измеренная нами плотность серпентина оказалась равной $\rho = 2.53 \times 10^3$ кг/м³. Металлические резонаторы изготавливались из цилиндрического прутка промышленного поликристаллического сплава алюминия Д16Т плотностью $\rho = 2.7 \times 10^3$ кг/м³. Они имели форму цилиндра длиной $L = 140$ мм, диаметром $d = 10$ мм и были двух видов: первые были приготовлены из исходного прутка Д16Т, а вторые изготавливались из того же прутка после создания в нем остаточных сдвиговых деформаций. Деформации создавались при вращении прутка, закрепленного на одном конце, вокруг его оси в токарном станке до появления в образце пластических сдвиговых деформаций. После снятия крутящего момента в стержне оставались статические деформации сдви-

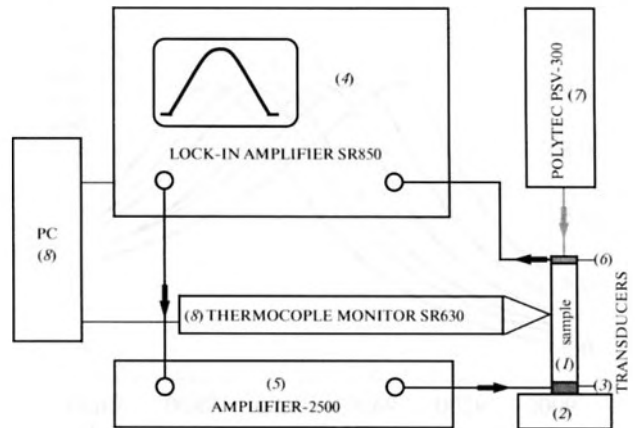


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для НРУС.

га, микротрещины, дислокации. Величина сдвиговых остаточных деформаций рассчитывалась по величине изгиба образующей на поверхности цилиндрического образца и была равна ≈ 0.03 . Таким образом, экспериментальные резонаторы содержали дефекты, которые уже были в исходном материале (границы зерен, на которых имеется градиент скорости упругих волн, контакты Герца, слабые связи между отдельными зернами, нарушение сплошности), и искусственно созданные дефекты, возникшие при изготовлении образцов (дислокации, микротрещины, остаточные напряжения). Наличие таких дефектов, как уже отмечалось ранее, является причиной структурной упругой нелинейности в твердых телах [7–9, 11].

Для исследования эффектов быстрой и медленной динамики в твердых телах был использован метод нелинейной резонансной ультразвуковой спектроскопии (НРУС). Для реализации метода НРУС была разработана автоматизированная экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. Исследуемый акустический резонатор (1) одним концом жестко крепился на стальном цилиндре (2) массой ~ 7 кг. На этом конце крепился и излучающий пьезокерамический преобразователь (3). На другом конце размещался приемный пьезокерамический преобразователь (4).

Такая схема крепления образца позволяет реализовать в нем четвертьволновой $\Lambda/4$ упругий резонатор (Λ – длина упругой волны в резонаторе). Собственные частоты f_n такого резонатора связаны с его длиной L и скоростью упругих волн V_n в нем следующим соотношением:

$$V = 4f_n L / (2n + 1),$$

где $n = 0, 1, 2 \dots$. Изменение скорости упругих волн V на величину ΔV приводит к изменению резонансной частоты на величину Δf . При этом выполняется равенство $\Delta V / V = \Delta f / f$.

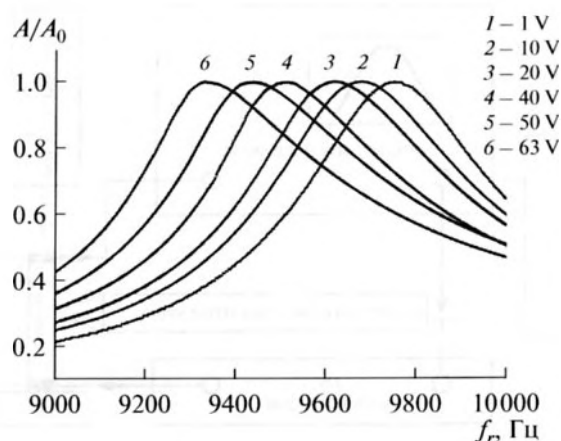


Рис. 2. Нормированные резонансные кривые в металлическом резонаторе с остаточными сдвиговыми деформациями при различных значениях амплитуды возбуждающего напряжения.

Методика измерений была следующей. На излучающий преобразователь (3) с выхода Lock-In Amplifier SR850 (4) поступал предварительно усиленный в усилителе EP-2500 (5) частотно-модулированный сигнал (ЧМС). Центральная частота ЧМС выбиралась вблизи резонансной частоты основной продольной моды образца f_0 . С преобразователя (6) электрический сигнал, пропорциональный амплитуде упругой волны в образце (1), поступал на вход синхронного детектора Lock-In Amplifier SR850 (4). Амплитуда сигнала как функция его частоты в цифровой форме сохранялась в памяти SR850 (4). Одновременно амплитуда колебаний резонатора и ее спектральный состав могли измеряться лазерным виброметром Polytec PSV-300 (7). Температура образца контролировалась термопарой типа К с цифровым контроллером SR630 (8) с точностью 0.1 К. Усилитель SR850 и контроллер SR630 были соединены с персональным компьютером (8). Для автоматизации процесса измерений и расширения возможностей прибора SR-850 было разработано программное обеспечение, позволяющее дистанционно с ПК управлять измерительной техникой, а также передавать результаты измерений в компьютер. Кроме того, в программе были реализованы алгоритмы для математической обработки экспериментальных данных и их архивации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно с использованием сигнала малой амплитуды были определены резонансные частоты исследуемых резонаторов из ГП и сплава алюминия Д16Т. Эти измерения позволили определить скорость нулевой моды V_{cm} в материалах. В резонаторах из ГП стержневая скорость оказалась

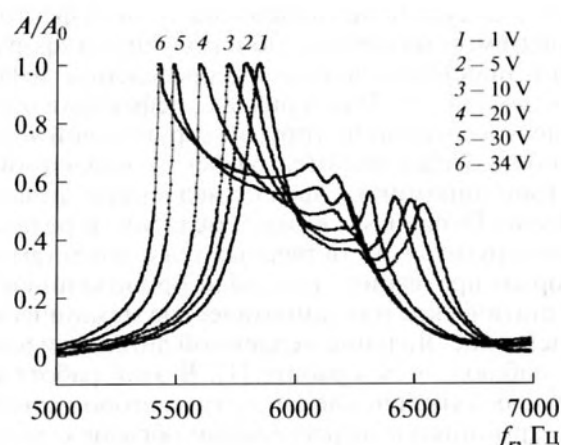


Рис. 3. Нормированные резонансные кривые в резонаторе из ГП при различных значениях амплитуды возбуждающего напряжения.

равной $V_{cm} = (2.88 \pm 0.03) \times 10^3$ м/с. В металлических образцах с остаточными сдвиговыми деформациями и без них в пределах ошибки эксперимента скорости оказались равными $V_{cm} = (5.15 \pm 0.03) \times 10^3$ м/с, т.е. искусственно созданные остаточные деформации в пределах ошибок эксперимента не оказали влияние на линейные упругие свойства металлических образцов.

Далее были проведены исследования эффекта быстрой динамики, который заключается в зависимости скорости упругих волн в образце от их амплитуды. Экспериментально измерялась зависимость резонансной частоты основной стержневой моды резонатора f_0 , приготовленного из исследуемого материала, от величины амплитуды электрического сигнала A , подаваемого на излучающий преобразователь. При этом мы считали, что амплитуда возбуждаемой в образце упругой волны линейно зависит от амплитуды электрического напряжения, подаваемого на излучающий преобразователь (3).

На рис. 2, 3 приведены семейства нормированных резонансных кривых, измеренных при различных амплитудах возбуждающего напряжения в металлических резонаторах с остаточными сдвиговыми деформациями и в образцах из ГП. В случае металлических резонаторов без остаточных сдвиговых деформаций относительное изменение резонансной частоты образца при увеличении амплитуды возбуждающего напряжения в интервале (1–60) В не превышало 5×10^{-4} , что находилось в пределах ошибки измерения резонансной частоты. Относительные изменения резонансных частот в образцах из ГП и в металлических резонаторах с искусственно созданными остаточными сдвиговыми деформациями при увеличении амплитуды возбуждающего напряе-

ния в тех же пределах были на два порядка больше. Как видно из рис. 3, в образце из ГП наблюдалось несколько резонансных частот. Визуализация формы колебаний образцов с помощью лазерного виброметра показала, что более высокочастотные резонансы связаны с изгибной модой образца, а низкочастотный резонанс определяется его продольной стержневой модой. Анализ резонансных кривых, приведенных на рис. 2, 3 показал, что при увеличении амплитуды возбуждающего напряжения A , подаваемого на излучающий преобразователь (3), в металлическом резонаторе с остаточными напряжениями и в стержне из ГП наблюдается уменьшение их резонансной частоты f_0 по линейному закону:

$$f_0(A) = f_0 - \alpha A,$$

где $\alpha = 6.8$ Гц/В – в металлическом резонаторе со сдвиговыми деформациями, $\alpha = 12.6$ Гц/В – в резонаторе из ГП.

Линейное уменьшение резонансной частоты резонаторов не может быть объяснено упругой нелинейностью, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки. Как известно, квадратичная упругая нелинейность в твердых телах не приводит к изменению скорости упругих волн при увеличении ее амплитуды и, следовательно, к изменению резонансной частоты резонатора. В образцах с кубичной упругой нелинейностью скорость упругих волн пропорциональна квадрату амплитуды возбуждающего сигнала. Поэтому линейный сдвиг резонансных частот резонаторов в зависимости от амплитуды возбуждающего сигнала указывает на наличие в исследуемых материалах значительной структурной нелинейности, вызванной остаточными напряжениями и наличием дефектов в материале [4, 6, 7, 11]. Уменьшение резонансной частоты резонаторов связано с уменьшением скорости упругих волн, следовательно, и модуля Юнга в исследуемых образцах.

Резонансные кривые, приведенные на рис. 4, 5, позволили определить собственные частоты основной продольной моды резонаторов $f_0(A)$ при различных значениях амплитуды возбуждающего напряжения A и рассчитать зависимость модуля Юнга $E(A)$ в исследуемых резонаторах от амплитуды A :

$$E(A) = \rho V^2 = \rho [4L f_0(A)]^2.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 6, 7. На этих рисунках видно, что происходит уменьшение модуля Юнга на 13.5% в резонаторе из ГП и на 7.3% в металлическом резонаторе с остаточными сдвиговыми деформациями.

Исследование эффекта медленной динамики в резонаторах проводилось по следующей методике: резонаторы в течение 10–15 мин возбуждались на резонансной частоте сигналом с амплитудой 10 В, что приводило к уменьшению резонансных частот образцов. Измерение температуры

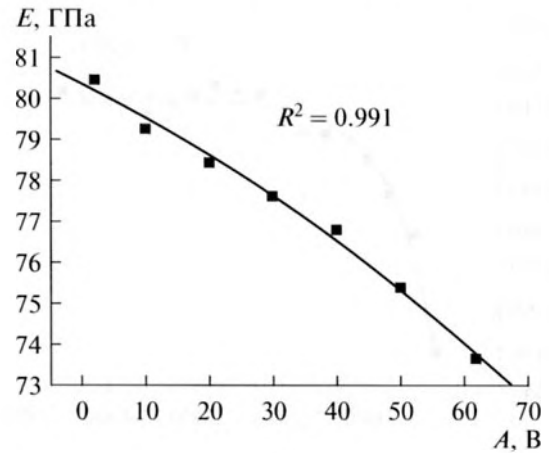


Рис. 4. Зависимость модуля Юнга в металлическом резонаторе с остаточными деформациями от амплитуды возбуждающего сигнала.

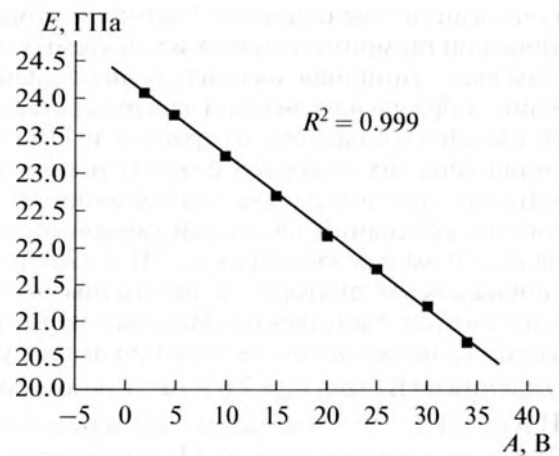


Рис. 5. Зависимость модуля Юнга в образце из ГП от амплитуды возбуждающего напряжения.

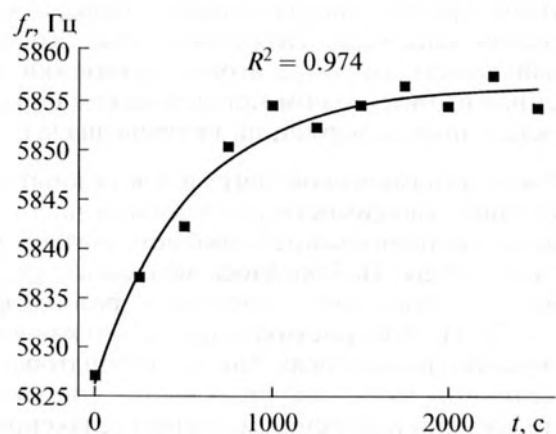


Рис. 6. Эффект медленной динамики в образце из ГП.

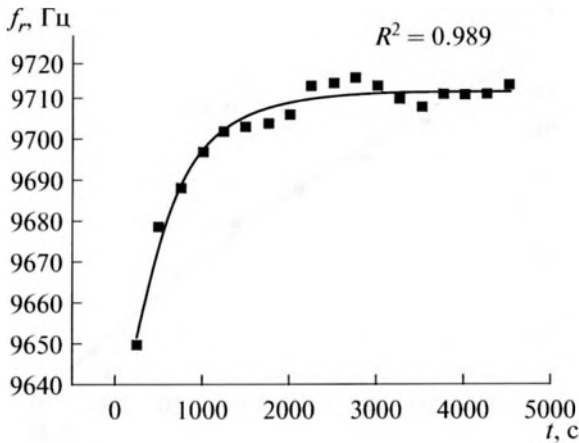


Рис. 7. Эффект медленной динамики в металлическом образце с остаточными напряжениями.

образцов термопарой не обнаружило ее изменения. Одновременно лазерным виброметром измерялись амплитуды основной частоты и второй акустической гармоники во всех исследуемых нами образцах. Типичная амплитуда продольных колебаний образца на основной частоте составляла 200 нм для резонаторов из гранита и 1100 нм для металлических стержней с остаточными напряжениями при амплитуде возбуждения 60 В. Амплитуды колебаний на второй гармонике составляли 220 рм в резонаторах из ГП и 1200 рм в металлических резонаторах с остаточными деформациями, соответственно. Максимальные деформации ϵ_m на основной частоте при амплитуде возбуждения 60 В были $\epsilon_m \approx 2.6 \times 10^{-6}$ в резонаторе из ГП и $\epsilon_m \approx 1.7 \times 10^{-5}$ в металлическом резонаторе. При этом в резонаторах из ГП и в металлических резонаторах с остаточными сдвиговыми деформациями наблюдалась значительная временная нестабильность амплитуды второй гармоники, превышающая 20 дБ при постоянной амплитуде сигнала основной частоты. Это косвенно указывало на нарушение равновесного состояния дефектов в исследуемом материале. Необходимо отметить, что нестабильность амплитуд второй гармоники, измеренная в контрольном металлическом образце без остаточных деформаций, не превышала 6 дБ.

После динамической нагрузки в резонаторах измерялись зависимости резонансных частот от времени с использованием пробного сигнала малой амплитуды. Наблюдалось медленное увеличение собственной частоты резонаторов (рис. 6, 7). На этих рисунках видно, что как в металлических резонаторах, так и в резонаторах из ГП величины их резонансных частот при увеличении времени измерения медленно релаксируют к постоянному уровню. Экспериментально измеренная временная зависимость собственных ча-

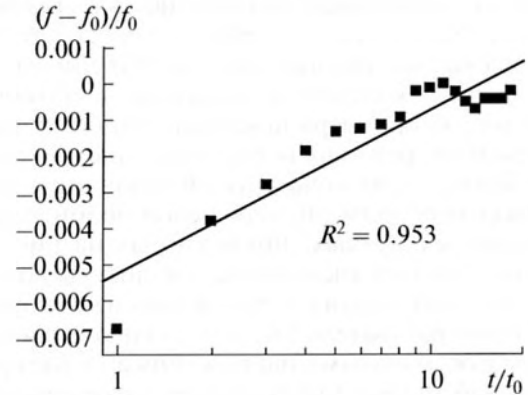


Рис. 8. Зависимость относительного изменения резонансной частоты от времени в полулогарифмическом масштабе для металлического образца.

стот резонаторов в процессе медленной динамики хорошо аппроксимировалась экспонентой:

$$f_0(t) = f_0(t \rightarrow \infty) - C \exp(-t/\tau).$$

При этом в металлическом резонаторе с остаточными сдвиговыми деформациями $f_0(t) = 9712.5 - 96.4 \exp(-t/534)$, а в резонаторе из ГП (серпентина) $f_0(t) = 5856.2 - 29.1 \exp(-t/565)$. Постоянные времени τ релаксации собственных частот в процессе медленной динамики в образцах из ГП и сплава алюминия Д16Т с остаточными деформациями оказались практически одинаковыми: $\tau = 565.5$ с для образца из ГП и $\tau = 534$ с для металлического образца с остаточными сдвиговыми деформациями.

Для объяснения эффекта медленной динамики привлекается ряд механизмов: гистерезисный механизм Прейсаха–Майергойца (Preisach–Mayergoysz) [19–21], термоупругий механизм [22, 23], механизм, связанный с наличием у дефектной структуры метастабильных состояний [17, 24]. Общим для этих экспериментов является логарифмический закон релаксации упругих свойств во времени. Однако представление результатов медленной динамики в металлическом образце с дефектами в полулогарифмическом масштабе (рис. 8) с последующей их аппроксимацией линейной зависимостью показало, что при больших временах наблюдается значительное отклонение экспериментальных результатов от аппроксимирующей прямой (аппроксимация логарифмической функцией дает $R^2 = 0.953$, в то время как аппроксимация экспонентой дает $R^2 = 0.989$). Ранее аналогичное отклонение от линейной зависимости наблюдалось в [25] при исследовании медленной динамики в горной породе lavoux limestone. В [26] отмечается, что это может свидетельствовать об изменении механизмов релаксации в процессе медленной динамики. Логарифмическая зависимость от времени отвечает большому числу

времен релаксации, а переход к зависимости, хорошо описываемой экспонентой, может свидетельствовать о том, что большинство процессов релаксации с малыми временами уже закончились и остался один процесс с большим временем релаксации.

Проведенные нами эксперименты позволяют сделать вывод о том, что эффект медленной динамики, наблюдаемый в наших экспериментах, не может быть объяснен только термоупругими эффектами. На это указывает отсутствие изменения температуры резонаторов при их длительном возбуждении сигналом большой амплитуды. Этот вывод также хорошо согласуется с тем, что постоянные времени τ релаксации упругих свойств резонаторов из ГП и поликристаллического сплава алюминия Д16Т с остаточными напряжениями практически одинаковы. В [27] проанализировано поглощения упругих волн в поликристаллических материалах в случае, когда длина упругой волны значительно больше характерных размеров кристаллитов. В этом случае каждый кристаллит в образце подвергается однородно распределенному давлению. Но вследствие анизотропии кристаллитов и граничных условий на поверхностях их соприкосновения возникающие деформации и градиенты температур неоднородны. Локальные увеличения температуры должны приводит к уменьшению модуля упругости. Вследствие того, что плотности ГП, сплава алюминия и их теплоемкости примерно одинаковые: $C_p \approx (0.6-1.15)$ кДж/(кг К) – в сплавах алюминия, $C_p \approx (0.65-0.85)$ кДж/(кг К) – в горных породах [28], локальные изменения температуры, вызванные акустической волной, должны быть примерно одинаковыми. Однако время выравнивания температуры в ГП, которое обратно пропорционально теплопроводности материала λ , должно быть значительно больше, чем в сплаве алюминия, т.к. значения коэффициентов теплопроводности λ в этих материалах отличаются более чем в 30 раз: $\lambda = 120$ Вт/(м К) в сплаве Д16Т и $\lambda = 3.5$ Вт/(м К) в ГП [28]. Отсюда следует, что если бы релаксация упругих свойств в процессе медленной динамики в исследуемых образцах была связана только с термоупругими эффектами, то значения постоянных времен релаксации τ упругих свойств в этих материалах должны были бы значительно отличаться. Поэтому для объяснения эффекта медленной динамики необходимо привлекать дополнительные механизмы. Проведенный анализ экспериментальных результатов позволяет сделать предположение, что эффект медленной динамики в значительной мере связан с наличием метастабильных состояний дефектной структуры, в которые она переходит в результате приложения к образцу сильного силового воздействия (динамического или статического). После снятия силового воздействия происходит

медленная релаксация дефектной структуры в образцах к ее равновесному состоянию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методом НРУС проведены экспериментальные исследования эффектов быстрой и медленной динамики в резонаторах из ГП и из поликристаллического сплава алюминия Д16 с искусственно созданными сдвиговыми остаточными напряжениями. Исследовано влияние акустической волны конечной амплитуды на величину модуля Юнга в этих материалах: в резонаторе из ГП наблюдалось уменьшение модуля Юнга на 13.5%, а в металлическом резонаторе с дефектами – на 7.3%. Обсуждаются возможные механизмы медленной динамики в исследованных материалах. Эти результаты могут быть использованы при расчете различных конструкций, находящихся под воздействием статических и динамических нагрузок.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-2631.2012.2, гранта Правительства РФ № 11.G34.31.0066, гранта РФФИ № 11-02-00277-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гедройц А.А., Зарембо Л.К., Красильников В.А. Сдвиговые волны конечной амплитуды в поли- и монокристаллах металлов // ДАН СССР. 1963. Т. 150. С. 515–518.
2. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 309 с.
3. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
4. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials // Phys. 1999. V. 52. P. 30–36.
5. Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах с дисперсией. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
6. Universality of Nonclassical Nonlinearity. Ed. P. Del-santo. New York: Springer Verlag, USA. 2006. 539 p.
7. Руденко О.В. Нелинейные методы в акустической диагностике // Дефектоскопия. 1993. № 8. С. 24–32.
8. Руденко О.В., Коробов А.И., Изосимова М.Ю. Нелинейность твердых тел с микро- и наномасштабными дефектами и особенности ее макроскопических проявлений // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 187–193.
9. Korobov A.I., Rudenko O.V., Izosimova M.Y. Nonlinear elastic properties of solids with defects // Proceedings of 20th International Congress on Acoustics. ICA. 23–27 August. 2010. Sydney. Australia.
10. Ostrovsky L.A., Johnson P.A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // Rivista Del Nuovo Cimento. 2001. V. 24. № 7.

11. *Johnson P., Sutin A.* Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 117. № 1. P. 124–130.
12. *Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Ширгина Н.В.* Нелинейные упругие свойства модели одномерной гранулированной неконсолидированной среды // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 1. С. 187–193.
13. *Korobov A.I., Brazhkin Yu.A., Sovetskaya E.S.* Characteristic features of elastic wave propagation in a one-dimensional model of an unconsolidated medium // *Acoust. Phys.* 2010. V. 56. № 4. P. 446–452.
14. *Коробов А.И., Изосимова М.Ю.* Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами // *Акуст. журн.* 2006. № 5. С. 683–692.
15. *Изосимова М.Ю., Коробов А.И., Руденко О.В.* Пространственное распределение нелинейного акустического параметра в тонкой поликристаллической пластине из сплава с дефектами // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 2. С. 153–159.
16. *Korobov A., Romanov A., Morozov A.* Nonlinear elastic properties of materials with residual stresses // 2012. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* V. 42 P. 012029 (4 pages). (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/42/1/012029>). doi: 10.1088/1757-899X/42/1/012029
17. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.* Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натуральных условиях // 2009. *Акуст. журн.* Т. 55. № 2. С. 208–215.
18. *Миронов М.А., Шеломихина И.А., Зозуля О.М., Есинов И.Б.* Медленная кинетика вязкоупругих свойств нефти при низкочастотных сдвиговых колебаниях // *Акуст. журн.* 2012. № 1. С. 132–140.
19. *Bentahar M. et al.* Hysteretic elasticity in damaged concrete: Quantitative analysis of slow and fast dynamics // *Phys. Rev.* 2006. V. B73. P. 014116.
20. *Delsanto P.P., Scalerandi M.* Modeling nonclassical nonlinearity, conditioning, and slow dynamics effects in mesoscopic elastic materials // *Phys. Rev.* 2003. V. B68. P. 064107–064116.
21. *Guyer R., TenCate J., Johnson P.A.* Hysteresis and the dynamic elasticity of consolidated granular materials // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82. P. 3280–3283.
22. *Zaitsev V., Castagnede B., Gusev V.* Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic wave interactions with individual cracks // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 90. P. 075501–075504.
23. *Зайцев В.Ю., Гусев В.Э., Назаров В.Е., Кастаньеде Б.* Взаимодействие акустических волн с трещинами: упругие и неупругие механизмы нелинейности с различными временными масштабами // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 80–91.
24. *Vakhnenko O., Vakhnenko V., Shankland T.J., TenCate J.* Straininduced kinetics of intergrain defects as the mechanism of slow dynamics in the nonlinear resonant response of humid sandstone bars // *Phys. Rev.* 2004. V. E70. P. 15602–15604.
25. *TenCate J.A.* Slow dynamics of earth materials: an experimental overview // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168. P. 2211.
26. *TenCate J.A., Smith E., Guyer R.A.* Universal slow dynamics in granular solids // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 1020.
27. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1965. 204 с.
28. *Физические величины: Справочник.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.