

Влияние дефектной структуры на упругие свойства сплава алюминия Д16

В. С. Козлов,* А. И. Коробов†

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра акустики, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 16.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния изменения дефектной структуры в поликристаллическом сплаве алюминия Д16 на его линейные и нелинейные упругие свойства. Изменение дефектной структуры в исследуемом образце вызывается приложением к нему циклических статических механических напряжений растяжения–сжатия–растяжения–сжатия. Исследования упругих свойств образца в процессе приложения переменных нагрузок проводились статическим, квазистатическим и динамическим методами. Ультразвуковые измерения проводились импульсным методом. Исследование нелинейных упругих свойств материала проводились двумя методами: динамическим спектральным методом по эффективности генерации второй акустической гармоники в поле акустической волны конечной амплитуды на частоте 5МГц и квазистатическим методом по результатам измерения изменения скорости акустических волн в образце в зависимости от приложенного к нему статического давления.

PACS: 43.25+у

УДК: 534.222

Ключевые слова: дефекты, неклассическая упругая нелинейность, пластические деформации, спектральный метод, вторая упругая гармоника.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие неоднородностей и дефектной структуры в твердых телах оказывает существенное влияние на ряд их физических свойств, в том числе на упругие свойства. Дефекты заметно изменяют соотношение между упругим напряжением и деформацией либо из-за сильно нелинейного локального деформирования внешней нагрузкой (дислокации, 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 (скопление дислокаций и др.). 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 нелинейность, связанная с дефектами и нарушением сплошности материала (структурная или т.н. «неклассическая» нелинейность), может существенно (на 2–4 порядка) превышать нелинейность, связанную с ангармонизмом сил межмолекулярного взаимодействия [1]. В отличие от физической нелинейности структурная нелинейность является локальной и имеет пороговый характер, т.е. ее величина определяется состоянием и величиной дефектов в каждой точке материала. В [2–3] рассмотрены и проанализированы возможные механизмы структурной нелинейности в твердых телах.

Основополагающая работа, в которой экспериментально исследовано влияние дефектной структуры на

нелинейные упругие свойства кристаллов, была выполнена В.А. Красильниковым вместе с Л.К. Зарембо и А.А. Гедройцем [4]. Авторы экспериментально показали, что существенное влияние на нелинейные упругие свойства твердых тел оказывает неоднородность внутренней структуры материала: дислокации, микротрещины, локальные внутренние напряжения. В [4] впервые экспериментально наблюдалась вторая сдвиговая гармоника в изотропных поликристаллических металлах с дефектами. В [5] исследовалась зависимость амплитуды второй гармоники от числа циклов переменной растягивающей силы для поликристаллического алюминия. После определенного числа циклов образец разрушался. Авторами было установлено возрастание амплитуды второй гармоники при увеличении «усталости» материала. Кроме того, исследована зависимость параметра нелинейности, скорости звука и декремента затухания от числа циклов. Было выявлено, что нелинейный упругий параметр существенно изменяется уже при начальных стадиях проведения испытаний, в то время как скорость звука и декремент затухания остаются сравнительно постоянными большую часть времени испытаний. В работе [6] динамическим методом, основанным на модуляции звука вибрациями, было проведено исследование акустической нелинейности стальных образцов, подвергнутых значительным деформациям на разрывной машине. Приводятся результаты испытаний пяти образцов с различной степенью деформации. Авторы наблюдали заметный рост нелинейного параметра Γ с возрастанием нагрузки и, следовательно, с увеличением степени дефектности структуры. В [7–8] экспериментально исследовалось влияние внешних статических деформаций на нелинейные акустические свойства поликристаллических образцов медной проволоки, прошедших различную термическую обработку. Авторами установлена корреляция между упругими свойствами и внут-

*E-mail: kozlov.viktor@physics.msu.ru

†E-mail: aikor42@mail.ru

ренней структурой образцов, выявлен значительный вклад структурной нелинейности в области пластической деформации вследствие увеличения дислокаций и фрагментации кристаллитов.

Целью настоящей работы является исследование влияния изменения дефектной структуры в поликристаллическом сплаве алюминия Д16 на его линейные и нелинейные упругие свойства. Изменение дефектной структуры в исследуемом образце вызывалось приложением к нему циклических статических механических напряжений растяжения–сжатия–растяжения–сжатия.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Экспериментальная установка для исследования нелинейных упругих свойств была разработана на базе ультразвуковой автоматизированной системы Rites RAM-5000. Блок-схема экспериментальной установки, приведена на рис. 1.

В ультразвуковой системе реализован импульсный метод измерения. Комплекс позволяет исследовать как линейные, так и нелинейные упругие свойства образцов. Для исследования нелинейных упругих свойств твердых тел в комплексе реализован динамический спектральный метод, заключающийся в исследовании эффективности генерации второй акустической гармоники на частоте $2f = 10$ МГц при распространении ОАВ конечной амплитуды на частоте $f = 5$ МГц. В работе для исследования упругих свойств поликристаллического сплава алюминия Д16 использовались продольные объемные волны. Их возбуждение и прием проводился с помощью посеребренных пластинок из ниобата лития Y-360 среза с резонансными частотами 5 МГц и 10 МГц. Пластины поджимались к образцу через слой акустической смазки.

На образец подавались ВЧ-импульсы с регулируемой амплитудой длительностью в несколько микросекунд и частотой заполнения 5 МГц. На приемном преобразователе наблюдалась серия акустических импульсов. Измерение длины образца L и времени τ_0 между зондирующим и первым прошедшим импульсом позволяло определить скорость акустических волн $V_0 = L/\tau_0$. Для исключения паразитных высокочастотных компонент зондирующий сигнал проходил через фильтр низких частот. Сигнал, прошедший через образец поступал на два канала приемника системы: на первый канал поступала первая гармоника, а на второй — предварительно прошедший через фильтр высоких частот сигнал второй гармоники. Это позволяло проводить одновременные измерения амплитуды и фазы обеих гармоник в зависимости от внешнего давления, приложенного к образцу. С помощью графического интерфейса экспериментальной установки на персональном компьютере снимались и архивировались данные об амплитуде и фазе сигналов с обоих каналов. Частота по-

вторения импульсов составляла 10 Гц. Для наблюдения всех сигналов в реальном масштабе времени использовался четырехканальный цифровой осциллограф, синхронизированный с генератором зондирующих импульсов.

Исследуемые образцы представляли собой выточенные из сплава Д16 штанги, с диаметром поперечного сечения деформируемой части равным 10 мм, и 60 мм. Скорость продольных упругих волн в образце до его деформации была измерена импульсным методом, и она составила (6370 ± 30) м/с. Образец крепился в специальное устройство, которое позволяло преобразовать силу сжатия, создаваемую гидравлическим домкратом, в силу растяжения. Экспериментальный блок с образцом, домкратом и датчиками крепился в специальной стальной раме (рис. 1).

Для измерения силы, прикладываемой к образцу, и изменения его длины, использовались электромеханические датчики, которые вырабатывали постоянные напряжения, пропорциональные силе и изменению длины образца. Эти напряжения оцифровывались аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП-1 и АЦП-2) и поступали в компьютер для автоматической регистрации результатов измерения.

Для управления установкой с помощью персонального компьютера и обработки экспериментальных результатов использовался специальный пакет программ с графическим интерфейсом. Данный графический интерфейс позволял одновременное проведение статических и ультразвуковых измерений с дальнейшим их архивированием и обработкой на персональном компьютере.

Разработанная экспериментальная установка позволяла проводить одновременные исследования упругих свойств твердых тел статическим, квазистатическим и динамическим методами.

1. Статический метод основан на измерении зависимости деформации ϵ в исследуемом образце от величины приложенного к нему механического напряжения σ .
2. Квазистатический метод, или метод Терстона–Браггера, для измерения коэффициентов упругости третьего порядка, который основан на измерении зависимости скорости упругих волн в твердом теле от величины приложенного к нему внешнего статического давления.
3. Динамический метод заключается в определении спектральных характеристик акустической волны конечной амплитуды, прошедшей через исследуемый материал.

Для описания распространения акустических волн конечной амплитуды в изотропном твердом теле воспользуемся уравнением движения:

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x},$$

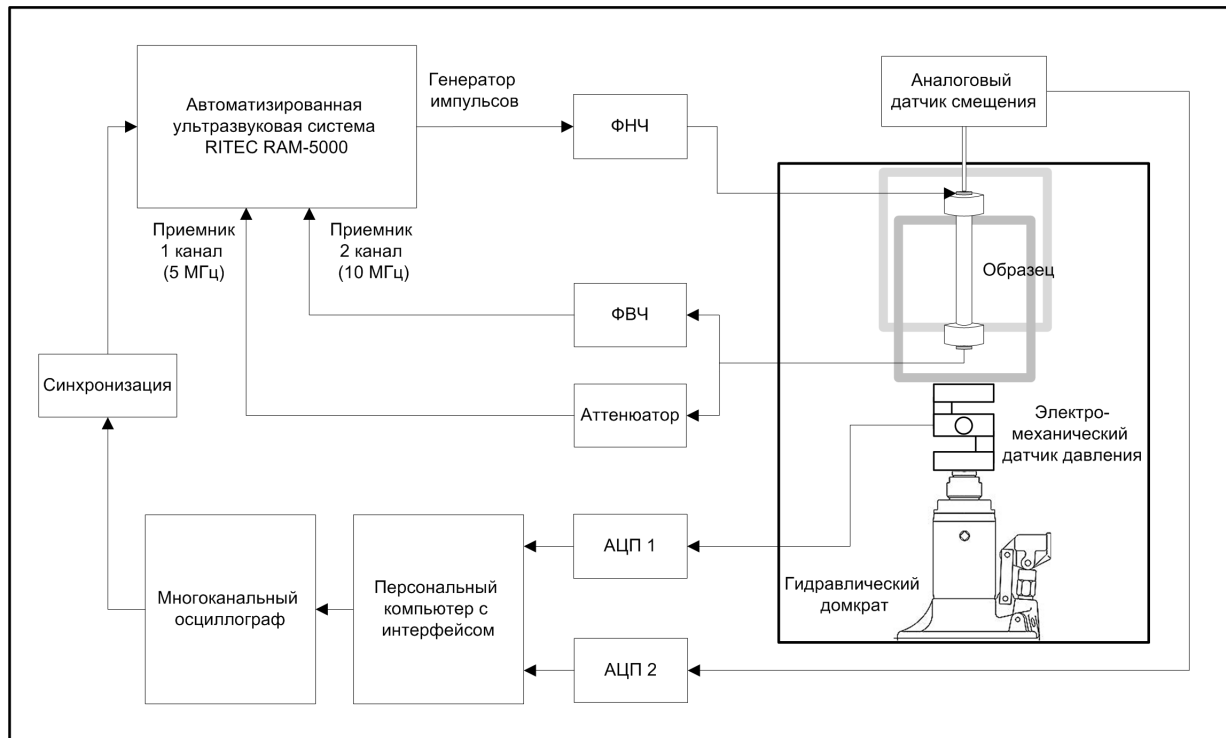


Рис. 1: Блок-схема экспериментальной установки

а также уравнением состояния:

$$\sigma = C\varepsilon + \frac{1}{2}C^H\varepsilon^2,$$

где σ — механическое напряжение, U — вектор смещения, $\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x}$ — деформация, C, C^H — коэффициенты упругости 2, 3 порядков соответственно.

Решение такой системы для нашего случая известно:

$$U = U_{01} \sin(\omega t - kx) + \left(\frac{C^H}{C} \frac{k^2}{8} U_{01}^2 \right) \sin(2\omega t - 2kx),$$

где C^H/C — квадратичный параметр акустической нелинейности.

Зависимости амплитуд 2-ой гармоники U_{02} от амплитуды 1-ой гармоники U_{01} определяется следующим выражением:

$$U_{02} = \frac{C^H}{C} \frac{k^2}{8} U_{01}^2 x.$$

Как видно, в материалах с классической нелинейностью амплитуда второй гармоники U_{02} пропорциональна квадрату амплитуды первой гармоники U_{01}^2 .

В материалах с «неклассической» нелинейностью зависимости амплитуд второй гармоники от амплитуды основной частоты могут быть иными.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В работе одновременно исследовались экспериментальные зависимости механического напряжения, амплитуды и фазы первой и второй упругих гармоник от величины деформации образца. Видно, что при деформациях превышающих $\varepsilon=0,015$ начинается область пластических деформаций (рис. 2). Для данного образца при деформации $\varepsilon=0,09$ была проведена разгрузка-нагрузка, и в последующем он был доведен до разрыва. Характер разрушения был хрупким.

В начальной области упругих деформаций ($\varepsilon < 0,007$) наблюдается уменьшение величины амплитуд первой и второй упругих гармоник (рис. 3). Далее начинается существенное влияние структурной нелинейности на поведение 2-й гармоники: в конце упругой области и в области перехода в зону пластической деформации при ($\varepsilon \approx 0,015$) 2-я гармоника испытывает существенный рост, не характерный для классической нелинейности.

Предполагается, что в этой области деформаций на упругую нелинейность оказывают влияние увеличение числа микротрещин и дислокаций, а также межзеренные границы в поликристаллическом образце. При переходе в пластическую область рост гармоники замедляется. Это связано с тем, что помимо увеличения количества дефектов, в частности, микротрещин, происходит увеличение их (микротрещин) размеров. Это приводит к уменьшению механического напряжения

в устьях трещин [1, 3, 9], и, как следствие, к уменьшению нелинейного упругого эффекта, который оказывают растущие в размерах трещины. Таким образом, конкурируют два процесса: появление новых микротрещин и увеличение размеров уже имеющихся в образце микротрещин.

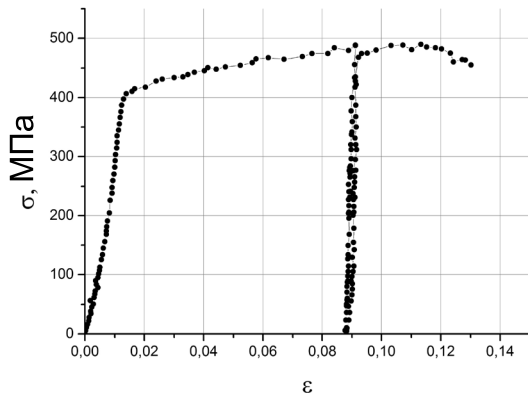


Рис. 2: Нагрузочная кривая $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ в поликристаллическом образце Д16

При больших деформациях ($\varepsilon > 0,045$) начинается постепенное уменьшение второй гармоники — материал претерпевает существенные изменения в своей структуре, а именно: близлежащие микротрещины объединяются, образуя микроразрывы, несплошности и крупные дислокации.

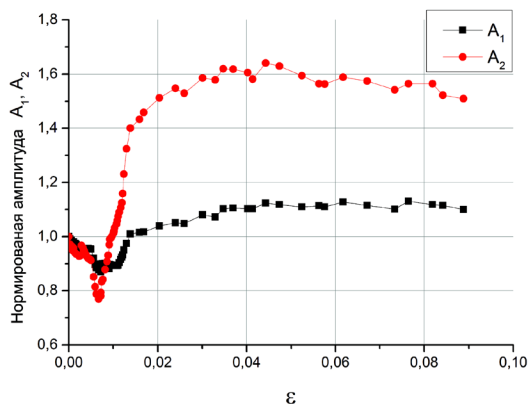


Рис. 3: Зависимости амплитуд 1 и 2 акустических гармоник от деформации

Характерные зависимости амплитуд 1,2 акустических гармоник от амплитуды основной частоты при фиксированном механическом напряжении (деформации образца) показаны на рис. 4. Для проведения анализа результатов экспериментальные зависимости амплитуды 2-й гармоники от амплитуды основной волны

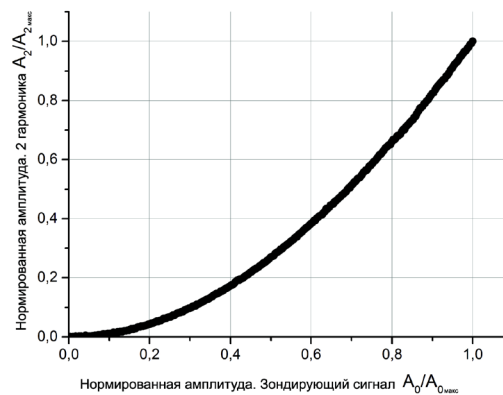


Рис. 4: Характерная зависимость нормированной амплитуды второй акустической гармоники от амплитуды основной частоты при фиксированном механическом напряжении (деформации образца)

строились в двойном логарифмическом масштабе и аппроксимировались линейной зависимостью (рис. 5).

В аналитическом представлении это выглядит следующим образом. Логарифмируется выражение для амплитуды гармоники:

$$U_{02} = \frac{C^H k^2}{C} U_{01}^n x,$$

$$\ln(U_{02}) = \ln(K) + \ln(\Gamma) + n \cdot \ln(U_{01}),$$

где

$$\frac{k^2}{8} x = K, \quad \frac{C^H}{C} = \Gamma.$$

Логарифмическая зависимость хорошо аппроксимируется прямой линией:

$$y = ax + b,$$

где

$$a = n, \quad b = \ln(K) + \ln(\Gamma), \quad b - b_0 = \ln(\Gamma) - \ln(\Gamma_0),$$

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = e^{b-b_0}.$$

Таким образом, по тангенсу угла наклона аппроксимирующей прямой линии можно определить показатель степени n , а по величине $b - b_0$ — получить информацию об изменении нелинейного параметра Γ . Экспериментально при увеличении механического напряжения с шагом 5 МПа измерялась зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды зондирующей волны (рис. 4). На рис. 5 приведены зависимости амплитуды гармоник от амплитуды зондирующего импульса в двойном логарифмическом масштабе.

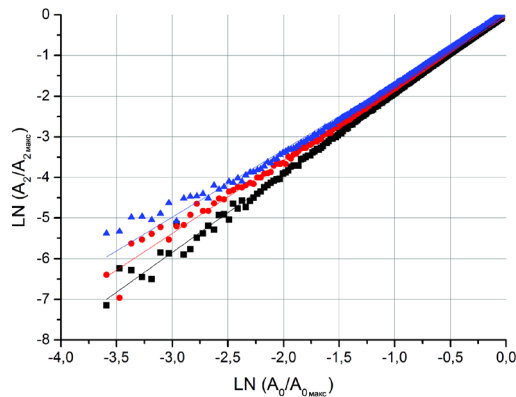


Рис. 5: Зависимость логарифма нормированной амплитуды 2-й гармоники от нормированной амплитуды зондирующего сигнала основной частоты при различных механических напряжениях

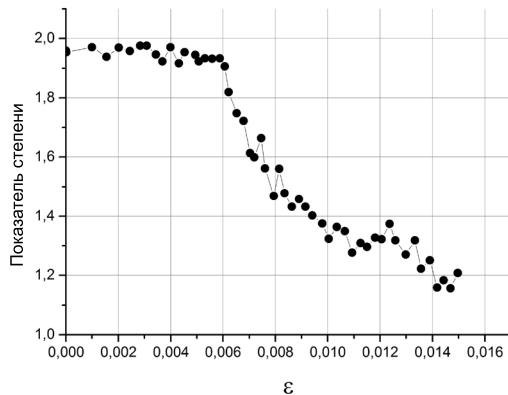


Рис. 6: Зависимости степенного показателя 2-й гармоники от деформации образца

Это позволило определить зависимость показателя n от механического напряжения, приложенного к образцу (рис. 6). Как видно на рис. 6 при увеличении деформации в интервале $\varepsilon = 0,006-0,015$ наблюдается уменьшение показателя степени n с 2 до 1,2, то есть зависимость амплитуды 2-й гармоники в этой области механических деформаций не пропорциональна квадрату амплитуды сигнала основной частоты. Это указывает на появление в образцах поликристаллического сплава алюминия Д16 значительной структурной упругой нелинейности.

Одновременно с амплитудой измерялась фаза акустического сигнала. Это позволило определить изменения фазовой скорости $\Delta V/V_0(\varepsilon)$ волны от деформации ε .

$$\Delta V/V_0 = \varepsilon - \Delta\tau/\tau_0 = \varepsilon - \Delta\varphi/(2\pi f\tau).$$

Для второго образца вместе с графиком зависимости механического напряжения от деформации на рис. 7 приведена зависимость относительного изменения скорости продольной упругой волны от деформации.

Измерение изменения фазовой скорости $\Delta V/V_0(\varepsilon)$ позволило найти зависимость коэффициента упругости 2-го порядка от деформации:

$$C(\varepsilon) = \rho V_0^2 \left[1 + 2 \frac{\Delta V(\varepsilon)}{V_0} + \left(\frac{\Delta V(\varepsilon)}{V_0} \right)^2 \right].$$

Результаты расчетов приведены на рис. 8. Для динамического коэффициента упругости 2-го порядка наблюдалось его уменьшение на 4%. При этом в области разгрузки-нагрузки наблюдался гистерезисный характер зависимости коэффициента упругости 2-го порядка от деформации.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана методика для одновременного исследования линейных и нелинейных упругих свойств твердых тел статическими, квазистатическими и динамическими методами. В образцах поликристаллического сплава алюминия Д16 проведены экспериментальные исследования зависимости механического напряжения, амплитуд и фаз скоростей первой и второй упругих гармоник от величины деформации образца. Обнаружено, что в начальной области упругих деформаций ($\varepsilon < 0,007$) наблюдается уменьшение величины амплитуд 1-й и 2-й упругих гармоник (рис. 3). Уменьшение амплитуды второй гармоники связано с уменьшением амплитуды 1-й гармоники, которое вызвано увеличением поглощения упругих волн в этой области деформаций. Увеличение поглощения упругих волн вызвано появлением микротрещин и увеличением количества дислокаций. В области перехода в зону пластической деформации при ($\varepsilon \approx 0,015$) 2-я гармоника испытывает существенный рост, не характерный для классической нелинейности. При этом при увеличении деформации в интервале $\varepsilon = 0,006-0,015$ наблюдается уменьшение показателя степени n , характеризующий степенную зависимость амплитуды 2-й гармоники от амплитуды основной частоты с 2 до 1,2, то есть зависимость амплитуды 2-й гармоники в этой области механических напряжений не пропорциональна квадрату амплитуды сигнала основной частоты. Это указывает на появление в образцах поликристаллического сплава алюминия Д16 значительной структурной упругой нелинейности.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-22-00042).

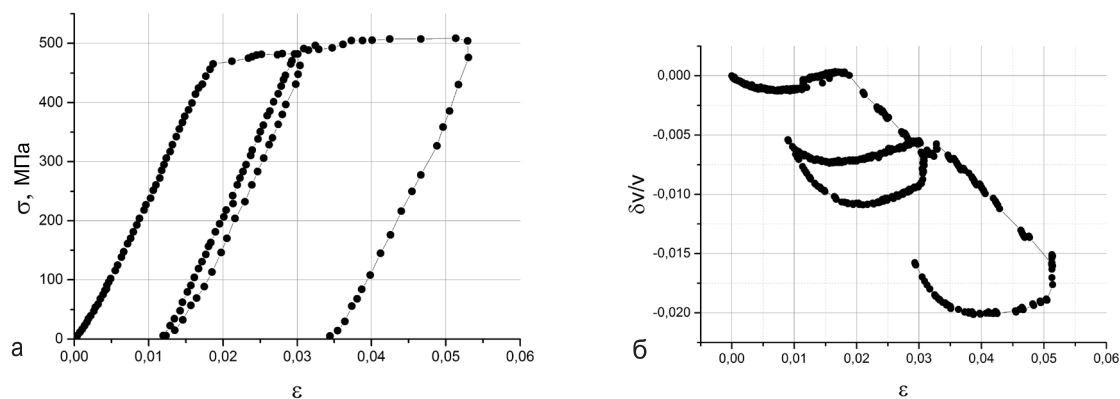


Рис. 7: а) Зависимость механического напряжения от деформации и б) зависимость относительного изменения фазовой скорости от деформации для 2-го образца

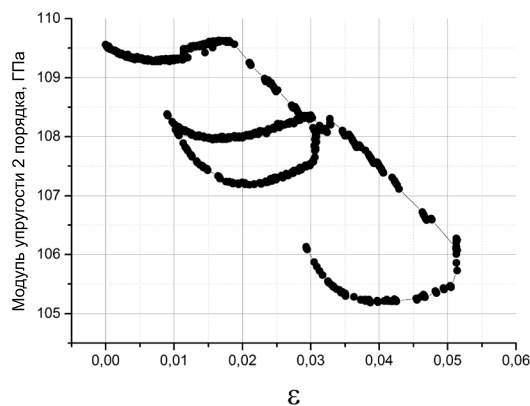


Рис. 8: Зависимость динамического модуля упругости 2-го порядка от деформации

-
- [1] *О.В. Руденко* УФН. **176**, № 1. С. 77. (2006).
 [2] *Руденко О.В.* Нелинейные методы в акустической диагностике. Дефектоскопия. № 8. С. 24. (1993).
 [3] *Руденко, А.И. Коробов, М.Ю. Изосимова.* Акуст. журн. **56**. С. 172. (2010).
 [4] *Гедройц А.А., Зарембо Л.К., Красильников В.А.* ДАН СССР. **150**. С. 515. (1963).
 [5] *Гиц И.Д., Гуцин В.В., Конюхов Б.А.* Акуст. журн. **19**, № 3. С. 335. (1973).
 [6] *Коротков А.С., Славинский М.М., Сутин А.М.* Акуст. журн. **40**, № 1. С. 84. (1994).
 [7] *Коробов А.И., Экономов А.Н.* Акуст. журн. **48**, № 4. С. 640. (2002).
 [8] *Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Нин Ван.* Акуст. журн. **51**. С. 663. (2005).

Influence of defect structure on the elastic properties of the D16 aluminum alloy**V.S. Kozlov^a, A.I. Korobov^b***M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Acoustics,
Leninskie Gory 1-2, Moscow, Russia, 119991**E-mail: ^akozlov.viktor@physics.msu.ru, ^baikor42@mail.ru*

The results of experimental studies of the influence of defect structure changes in a D16 polycrystalline aluminum alloy on its linear and nonlinear elastic properties are presented. The change of defect structure in the sample is caused by application of static cyclic stress (tension- compression - tension — compression) to it. Studies of the elastic properties of the test specimen during the application of variable loads were carried out using static, quasi-static and dynamic methods. Ultrasonic measurements were conducted using the pulse method. Investigation of nonlinear elastic properties of the test material were done using two methods: a dynamic spectral method according to the efficiency of generation of the second harmonic in the acoustic wavefield of finite amplitude at a frequency of 5 MHz and quasistatic method by measuring the change of velocity of acoustic waves in the sample as a function of the applied static pressure to it.

PACS: 43.25+y

Keywords: defects, nonclassic elastic nonlinearity, plastic deformation, spectral method, second harmonic.

Received 16.11.2014.

Сведения об авторах

1. Козлов Виктор Сергеевич — студент 6 курса кафедры акустики; тел.: (915) 123-96-55, e-mail: kozlov.viktor@physics.msu.ru.
2. Коробов Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: aikor42@mail.ru.