

УДК 534.2

## ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ РЕВЕРСИВНОЙ НАГРУЗКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА АЛЮМИНИЯ АМг6

© 2018 г. А. И. Коробов<sup>а</sup>, Н. В. Ширгина<sup>а, \*</sup>, А. И. Кокшайский<sup>а</sup>, В. М. Прохоров<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, Россия

<sup>б</sup>Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов  
108840 Москва, Троицк, Россия

\*e-mail: Natalia.shirgina@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 31.08.1017 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния процессов нагрузки–разгрузки на механические, линейные и нелинейные упругие свойства деформационно упрочняемого поликристаллического сплава алюминия АМг6. В образцах сплава АМг6 измерена нагрузочная кривая механическое напряжение–деформация при многоцикловых процессах нагрузки–разгрузки вплоть до разрушения образца. Измерена микротвердость образца до и после его разрушения. Обнаружено что процесс нагрузки–разгрузки привел к деформационному упрочнению сплава АМг6. Ультразвуковым методом исследовано влияние деформационного упрочнения сплава АМг6 на его линейные и нелинейные упругие свойства. Исследование нелинейных упругих свойств на различных участках нагрузочной кривой проводилось методом Терстона–Браггера и спектральным методом по эффективности генерации второй акустической гармоники. Проводится обсуждение результатов экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* деформационное упрочнение, микротвердость, генерация упругих гармоник, нелинейность, классическая и структурная упругая нелинейности, коэффициенты упругости второго и третьего порядков, спектральный метод

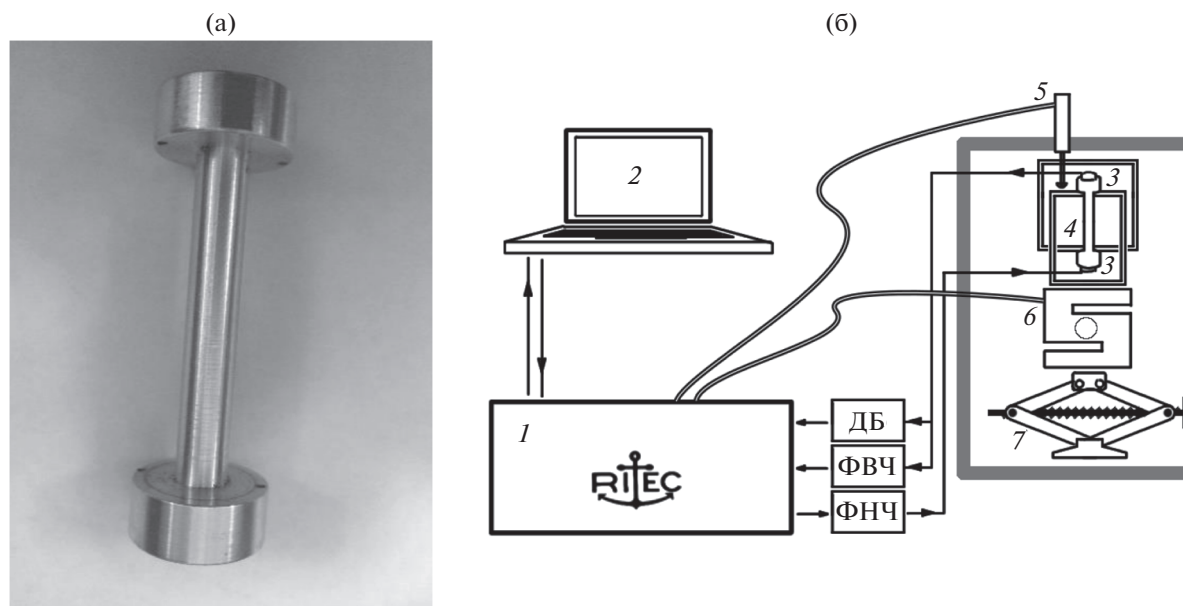
DOI: 10.1134/S0320791918030115

### ВВЕДЕНИЕ

Поликристаллический сплав АМг6, относящийся к системе Al–Mg–Mn [1, 2], широко используется в автомобильной и химической промышленности для изготовления судовых перегородок, железнодорожных вагонов и емкостей для различных жидкостей, а также в аэрокосмической отрасли для производства огромных топливных баков. Эти изделия в процессе эксплуатации постоянно подвергаются статическим реверсивным механическим нагрузкам, которые приводят к появлению в материале этих изделий дополнительных дислокаций, микротрещин, остаточных механических напряжений, нарушению сплошности.

Наличие дефектов в сплаве АМг6 может оказать существенное влияние на его нелинейные упругие свойства. Упругая нелинейность, связанная с дефектами и нарушением сплошности материала (структурная или так называемая “неклассическая” нелинейность), может значительно превышать классическую нелинейность, связанную с ангармонизмом сил межмолекулярного

взаимодействия [3]. 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 работах [4, 5] рассмотрены и проанализированы возможные механизмы структурной нелинейности в твердых телах. основополагающая работа, в которой впервые экспериментально исследовано влияние дефектной структуры на нелинейные упругие свойства кристаллов, была выполнена В.А. Красильниковым вместе с Л.К. Зарембо и А.А. Гедройцем [6]. Авторы экспериментально показали, что неоднородность внутренней структуры материала: дислокации, микротрещины, локальные внутренние напряжения оказывают существенное влияние на нелинейные упругие свойства твердых тел. В [7] исследована 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 гар-



**Рис. 1.** (а) Фотография образца АМгб (б) Схема экспериментальной установки. 1 – ультразвуковой комплекс Ritec RAM-5000, 2 – ПК, 3 – пьезопреобразователи, 4 – образец, 5 – датчик удлинения, 6 – датчик давления, 7 – домкрат, ФВЧ – фильтр высоких частот, ФНЧ – фильтр низких частот, ДБ – аттенюатор.

моники при увеличении “усталости” материала. Кроме того, была исследована зависимость параметра нелинейности, скорости звука и декремента затухания от числа циклов нагрузки. Было выявлено, что нелинейный упругий параметр существенно изменяется уже при начальных стадиях проведения испытаний, в то время как скорость звука и декремент затухания остаются практически постоянными большую часть времени испытаний. В работе [8] 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  $N$  с возрастанием нагрузки и, следовательно, с увеличением степени дефектности структуры. В [9, 10] 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 внутренней структурой образцов, выявлен значительный вклад структурной нелинейности в области пластической деформации вследствие увеличения дислокаций и фрагментации кристаллитов.

Линейные и нелинейные упругие свойства сплава АМгб исследованы в [11]. Однако воздействие статических нагрузок на механические и

упругие свойства сплава АМгб полностью не изучены.

Целью настоящей работы является исследование влияния статических реверсивных механических деформаций на механические, линейные и нелинейные упругие свойства сплава АМгб.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения ультразвуковых измерений из поликристаллического сплава АМгб, соответствующего ГОСТ 4784-74, было подготовлено два идентичных образца, имеющих форму цилиндрической гантели с тонкой цилиндрической деформируемой частью длиной  $L_0 = 59$  мм и диаметром 8.11 мм. Противоположные основания цилиндрических образцов полировались и были плоскопараллельны (рис. 1а). Для возбуждения и приема в образце продольных объемных акустических волн (ОАВ) к его основаниям с помощью акустической склейки крепились посеребренные пластинки из ниобата лития Y-36° среза с резонансными частотами 5 и 10 МГц.

Ультразвуковые исследования в работе проводились на экспериментальной установке, блок-схема которой приведена на рис. 1б. Она состоит из ультразвукового автоматизированного комплекса Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM, работающего в импульсном режиме, и системы для создания контролируемого одноосного растяжения исследуемого образца.

Для создания контролируемого одноосного растяжения образца использовалось устройство, состоящее из стальной рамы, датчика давления и домкрата. Между образцом и домкратом помещался шаровой шарнир, который позволял компенсировать возможные незначительные перекосы в системе домкрат–образец–датчик силы.

Измерение скорости упругих волн  $V$  проводилось импульсным методом “на прохождение” по формуле  $V = L/\tau$ , где  $L$  – длина образца,  $\tau$  – время прохождения импульса ОАВ через образец. Измеренная скорость продольной ОАВ в образце АМгб была равна  $V = 6340 \pm 30$  м/с. Относительное изменение скорости продольной ОАВ в образце, вызванное приложенным к нему статическим напряжением, определялось соотношением  $\Delta V/V = -\Delta\tau/\tau$ , где  $\Delta\tau$  – изменение времени распространения продольной ОАВ. Комплекс автоматически измеряет изменение фазы акустической волны  $\Delta\phi$ , связанное с изменением времени ее распространения  $\Delta\tau$ . Измерение величины  $\Delta\phi$  позволяет определить на частоте  $f$  относительное изменение скорости ОАВ  $\Delta V/V = -\Delta\tau/\tau = \Delta\phi/2\pi f\tau$ .

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 гармоники ОАВ на частоте  $2f = 10$  МГц при распространении ОАВ конечной амплитуды на частоте  $f = 5$  МГц. Для выделения сигналов первой и второй гармоник применялись фильтры нижних и верхних частот. Это позволяло проводить одновременную регистрацию амплитуды  $A$  и фазы  $\phi$  сигналов обеих гармоник в зависимости от внешнего давления, приложенного к образцу по двум независимым каналам измерения. С помощью графического интерфейса экспериментальной установки на персональном компьютере регистрировались и архивировались данные об амплитуде и фазе сигналов с обоих каналов. Для наблюдения всех сигналов в реальном масштабе времени использовался четырехканальный цифровой осциллограф, синхронизированный с генератором зондирующих импульсов.

Образец крепился в специальном устройстве, которое позволяло преобразовать силу сжатия, создаваемую гидравлическим домкратом, в силу растяжения. Экспериментальный блок с образцом, домкратом и датчиками крепился в специальной стальной раме (рис. 1б).

Для измерения силы, прикладываемой к образцу, и изменения его длины использовались электромеханические датчики, вырабатывающие постоянные напряжения, пропорциональные силе и изменению длины образца. Эти напряжения оцифровывались аналогово-цифровыми преоб-

разователями и поступали в компьютер для автоматической регистрации результатов измерения. Для управления установкой с помощью персонального компьютера и обработки экспериментальных результатов использовался пакет программ с графическим интерфейсом. Разработанная экспериментальная установка позволяла проводить одновременные исследования упругих свойств твердых тел статическим и динамическим методами. Статический метод основан на измерении зависимости механических и упругих свойств исследуемого образца от величины приложенного к нему механического напряжения  $\sigma$ . Динамический метод заключается в определении спектральных характеристик ОАВ конечной амплитуды, прошедшей через исследуемый материал.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе одновременно исследовались экспериментальные зависимости механического напряжения, амплитуды и фазы первой и второй гармоник ОАВ от величины деформации образца  $\epsilon$ .

В образце № 1 сплава АМгб была измерена нагрузочная кривая  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  при циклическом изменении механического напряжения, приложенного к образцу (рис. 2а). Изменение механического напряжения при циклическом процессе нагрузки–разгрузки происходило по схеме (0–38–0–76–0–95–0–144–0–190–0–192–0–247–0–304–0–342–0–390) МПа. В области нагрузки–разгрузки наблюдалась гистерезисная зависимость  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  и регистрировались остаточные деформации. Как видно на рис. 2а, после каждого цикла нагрузки–разгрузки происходит упрочнение материала образца: увеличивается предел текучести  $\sigma_{-0.2}$ . При  $\sigma \approx 390$  МПа и  $\epsilon \approx 0.16$  произошло разрушение образца (рис. 2б). Разрушение образца было хрупким: характерной шейки в области разрыва образца не образовывалось.

После разрушения образца в нем были проведены измерения микротвердости материала  $H$ . Измерения микротвердости проводились на шлифах образцов, вырезанных из различных частей циклически деформированного образца АМгб после его разрыва (рис. 2б): из области 1, которая при циклической нагрузке–разгрузке во время эксперимента не подвергалась деформации, и из области 2, которая испытывала значительные пластические деформации, вплоть до разрывных. Поверхности образцов шлифовались и полировались на установке LaboPol2 (Struers). Измерение микротвердости проводилось согласно ГОСТ 2999-75 на твердоме DuraScan20 при нагрузке на индентор Виккерса 50 грамм в течение 12 с.

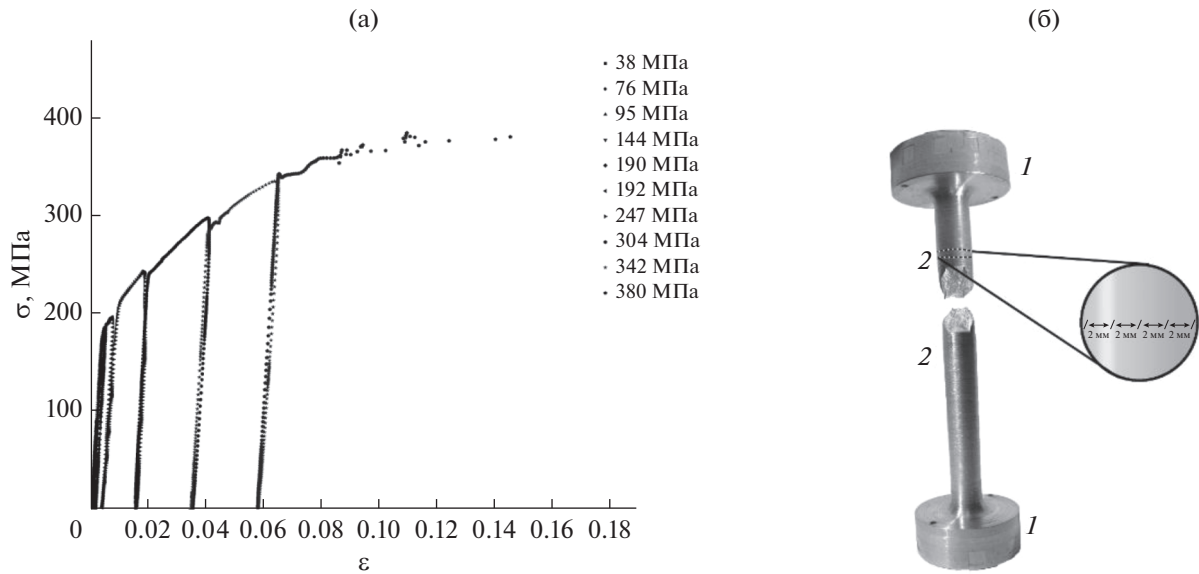


Рис. 2. (а) Нагрузочная кривая  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  в образце № 1 сплава АМгб при циклическом изменении механического напряжения  $\sigma$ ; (б) Фотография образца, разорванного в процессе циклического нагружения.

В шлифах диаметром 8 мм, вырезанных перпендикулярно цилиндрической оси образца, измерения микротвердости проводились вдоль диаметра в пяти точках с шагом 2 мм (область 2) и с шагом 6 мм в пяти точках поверхности шляпки гантели диаметром 25 мм (область 1). Значения микротвердости усреднялись по пяти измерениям (рис. 2б).

Измеренные значения микротвердости  $H$  в области 1, не подвергнутой деформации, в пределах погрешности были одинаковы и равны  $H = 1.00 \pm 0.01$  ГПа. В области 2 среднее значение  $H_{\text{ср}} = 1.31 \pm 0.02$  ГПа, а распределение микротвердости по диаметру представлено в табл. 1. Как видно из таблицы, твердость по краям шлифа больше, чем во внутренней части деформированной области 2.

Твердость на площадке шлифа вдоль образующей цилиндрической части области 2 на глубине  $\approx 1.5$  мм от поверхности практически везде одинакова, среднее значение твердости по результатам 20 индентирований  $H = 1.315 \pm 0.004$  ГПа, а на самой поверхности области 2 возрастает до 1.73 ГПа. Это связано с дополнительным упрочнением поверхности образца при его изготовлении на токарном станке.

Сплав АМгб, как уже отмечалось выше, относится к деформационно-упрочняемым сплавам. В результате циклической механической нагруз-

ки—разгрузки образца его микротвердость увеличилась примерно в 1.3 раза, причем максимальное значение твердости наблюдается на поверхности деформируемой части 2 и снижается с глубиной по направлению к оси образца.

В образце № 2 проведены экспериментальные исследования механических и упругих свойств образца в начале нагрузочной кривой в области деформаций, значительно меньше деформаций, приводящих к разрыву образца. На рис. 3 приведена нагрузочная кривая образца № 2: зависимость механического напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  в интервале деформаций (0–0.032) при одном цикле нагрузки—разгрузки—нагрузки при  $\epsilon \approx 0.013$  и последующей разгрузкой при  $\epsilon \approx 0.032$ . Видно, что при деформациях, превышающих  $\epsilon = 0.002$ , начинается область пластической деформации (рис. 2). Представленная на рис. 3 зависимость  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  также указывает на то, что сплав АМгб является деформационно-упрочняемым материалом: после цикла нагрузки—разгрузки в исследуемом образце происходит упрочнение материала образца, т.е. увеличивается предел текучести  $\sigma_{-0.2}$ :  $\sigma_{-0.2} \approx 200$  МПа в первом цикле и  $\sigma_{-0.2} \approx 235$  МПа при втором цикле нагрузки. Одновременно в образце появляются остаточные деформации: после первого цикла нагрузки—разгрузки остаточные деформации  $\epsilon \approx 0.01$ , после второго цикла нагрузки—разгрузки  $\epsilon \approx 0.026$ . В процессе цикла нагрузки—

Таблица 1. Зависимость микротвердости образца сплава АМгб от координаты в деформируемой области 2

Расстояние по диаметру, мм	0.5	2	4	6	7.5
$H$ , ГПа	$1.39 \pm 0.04$	$1.26 \pm 0.01$	$1.29 \pm 0.02$	$1.30 \pm 0.01$	$1.31 \pm 0.02$

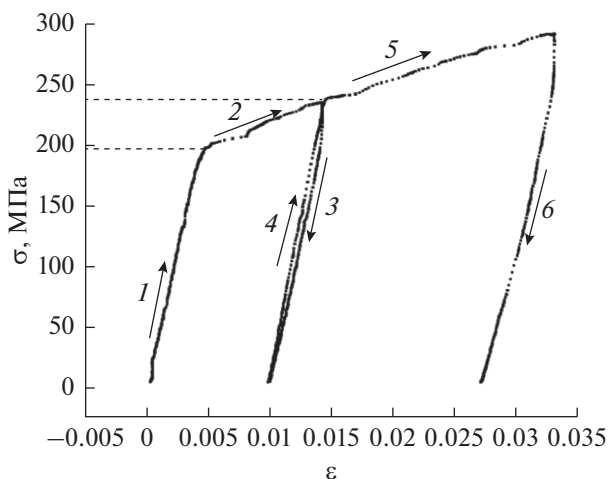


Рис. 3. Нагрузочная кривая  $\sigma(\epsilon)$  в образце № 2 сплава АМгб.

разгрузки проявляется гистерезисная зависимость  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ . Аппроксимация участков 1, 2, 4, 5 на нагрузочной кривой рис. 3 прямыми линиями позволила оценить влияние пластической деформации на величину модуля Юнга  $E$ : переход в область пластических деформаций вызывает его значительное уменьшение (см. табл. 2).

Измерение скорости продольной волны  $V$  в процессе нагрузки–разгрузки позволило определить зависимость коэффициента  $C_{11} = \rho V^2$  от реверсивно изменяющего растягивающего механического напряжения  $\sigma$  (рис. 4а). На рисунке видно, что в процессе нагрузки–разгрузки наблюдается гистерезисная зависимость коэффициента  $C_{11}$  от величины растягивающего механического напряжения  $\sigma$  и происходит увеличение коэффициента  $C_{11}$  на  $\approx 3\%$ . Увеличение коэффициента  $C_{11}$  вызвано деформационным упрочнением материала образца. Одновременно измерялось относительное изменение скорости  $\Delta V/V$  от величины растяжения образца (рис. 4б).

По результатам измерений относительного изменения скорости продольной волны  $V$  в образце № 2 в зависимости от растягивающего напряжения на основании соотношения Терстона–Браггера было получено линейное уравнение для

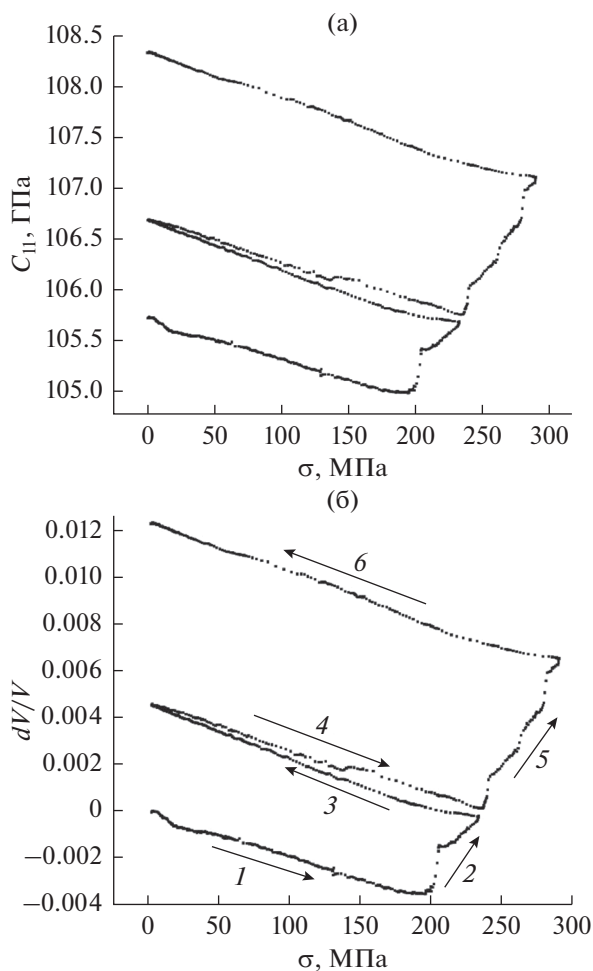


Рис. 4. Зависимость от величины приложенного к образцу механического напряжения  $\sigma$ : (а) коэффициента упругости  $C_{11}$ , (б) относительного изменения скорости.

определения  $C_{111}$  в образце АМгб на различных участках нагрузочной кривой [12]:

$$\left[ \frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P} \right]_{P=0} = (2\rho_0 W^2 F + G), \tag{1}$$

где  $W$  – “естественная скорость” ОАВ,  $\rho_0$  – плотность,  $F = S_{jka b}^T M_a M_b U_j U_k$ ,  $G = S_{ipab}^T C_{jrksp} U_j U_k N_r N_s M_a M_b$ ,  $G = S_{ipab}^T C_{jrksp} U_j U_k N_r N_s M_a M_b$ , – коэффициенты податливости второго порядка,  $G = S_{ipab}^T C_{jrksp} U_j U_k N_r N_s M_a M_b$ , –

Таблица 2. Оценка величины модуля Юнга и коэффициента упругости третьего порядка  $C_{111}$  на разных участках нагрузочной кривой (рис. 3)

	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4	Участок 5	Участок 6
$E$ , ГПа	44.2	4.2	48.4	51.8	3.2	42.4
$C_{111}$ , ГПа	–487	9828	–552	–506	1438	–540

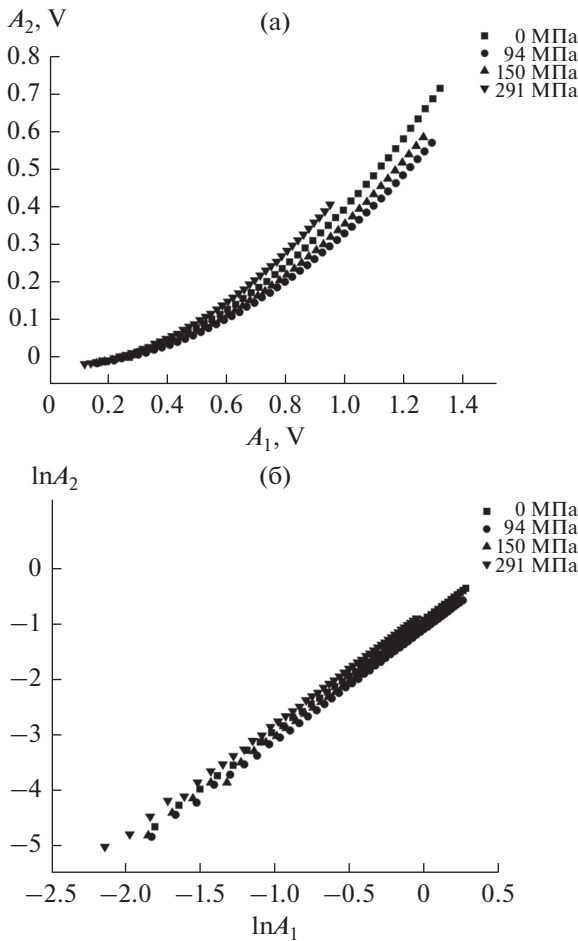


Рис. 5. Зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники при различных значениях приложенного к образцу механического напряжения  $\sigma$ : (а) в линейном масштабе, (б) в двойном логарифмическом масштабе.

коэффициент упругости третьего порядка (КУТП) в исследуемом материале,  $U_k$  – компоненты вектора поляризации  $\mathbf{U}$ ,  $N_r$  – компоненты волнового вектора  $\mathbf{N}$ ,  $M_i$  – компоненты единичного вектора  $\mathbf{M}$  в направлении одноосного растяжения  $\sigma$ .

Оценки величины коэффициента упругости третьего порядка  $C_{111}$  для шести участков нагрузочной кривой (рис. 3а) приведены в табл. 2. На участках пластической деформации 2 и 5 значения коэффициента упругости третьего порядка  $C_{111}$  имеют противоположный знак и в три и более раз больше по модулю по сравнению со значениями в областях упругой деформации 1, 3, 4. Эти значения коэффициента  $C_{111}$  по порядку величины совпадают со значениями этого коэффициента в недеформированном образце, определенного в [11, 13].

Нелинейные свойства образца на разных участках нагрузочной кривой были исследованы также спектральным методом. Этот метод основан на экспериментальном исследовании эффективности генерации высших акустических гармоник при распространении ОАВ конечной амплитуды в исследуемом образце. В спектре гармонической продольной ОАВ конечной амплитуды, распространяющейся в изотропном твердом теле, кроме волны основной частоты  $A_f = A_1 \sin(2\pi f t - k l)$ , наблюдается вторая гармоника ОАВ  $A_{2f} = A_2 \sin[2(\omega t - k l)]$ :

$$A = A_1 \sin(\omega t - k l) + A_2 \sin[2(\omega t - k l)]. \quad (2)$$

Зависимость амплитуды второй гармоники  $A_2$  от амплитуды продольной ОАВ первой гармоники  $A_1$  в (1) определяется уравнением [14]

$$A_2 = [(N k^2 L) A_1^2] / 8, \quad (3)$$

где  $k = \omega / V_L$  – волновое число,  $L$  – длина области взаимодействия,  $N = \left( C_{ijk l g r}^* \right) / C_{ijkl} = (3C_{11} + C_{111}) / C_{11} = (3 + C_{111} / C_{11})$  – нелинейный акустический параметр для продольной ОАВ в изотропном твердом теле,  $k = 2\pi f / V_L$  – волновой вектор первой гармоники,  $C_{11}$  – коэффициент упругости второго порядка (КУВП),  $C_{111}$  – КУТП.

Результаты измерения зависимости амплитуды второй гармоники  $A_2$  от амплитуды первой гармоники  $A_1$  при фиксированных давлениях в различных областях нагрузочной кривой в линейном масштабе приведены на рис. 5а. Для анализа экспериментальных результатов, приведенных на рисунке, было прологарифмировано выражение для амплитуды второй гармоники (3). (Предварительно значение амплитуд первой и второй упругих гармоник было переведено в безразмерные величины путем нормировки на 1 В):

$$\ln(A_2) = \ln N = \ln[(L k_f) / 8] + M \ln(A_1). \quad (4)$$

В случае бездефектного изотропного твердого тела показатель  $M = 2$ . В твердых телах с дефектами может присутствовать структурная (неклассическая) упругая нелинейность. В этом случае зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды основной частоты в (3) может отличаться от квадратичной. Выражение (4) является уравнением прямой линии

$$Y = Mx + B, \quad (5)$$

коэффициенты которого имеют следующий физический смысл:  $M$  определяет степенную зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники и угол наклона графика  $y = y(x)$ ,  $B = \ln(L k_f / 8) + \ln N$  – величина ординаты в точке пересечения графика с осью ординат. Анализ полученных результатов, приведенных на рис. 5б, позволил определить показатель  $M$  сте-

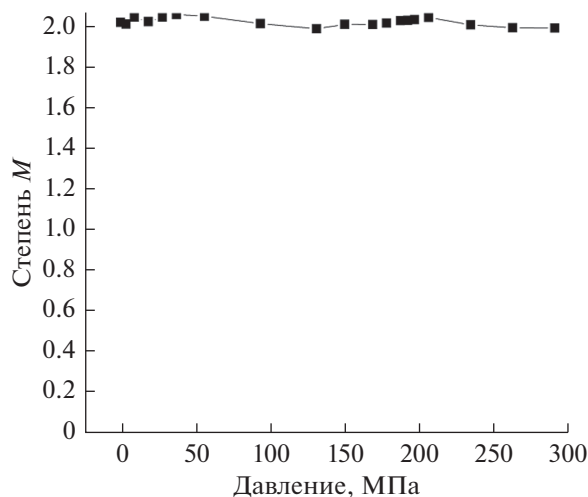


Рис. 6. Зависимость показателя степени  $M$  от величины механического напряжения в образце  $\sigma$ .

пенной зависимости амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники и его зависимость от величины приложенного к образцу давления (рис. 6). Как видно из рис. 6, коэффициент  $M$  в пределах ошибки измерения не зависит от давления и равен  $M = 2.04 \pm 0.01$ . Такое значение коэффициента  $M$  можно объяснить наличием в образце классической нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки в образце, и структурной нелинейности, обусловленной дислокациями, вызванными деформацией образца при его циклической разгрузке–нагрузке. Эти два механизма упругой нелинейности обеспечивают квадратичную зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники [15].

## ВЫВОДЫ

В работе исследовано влияние процесса механической нагрузки–разгрузки на механические и упругие свойства деформационно–упрочняемого поликристаллического сплава алюминия АМгб.

В образце № 1 сплава АМгб измерена нагрузочная кривая  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  при циклическом изменении механического напряжения, приложенного к образцу. Изменение механического напряжения при нагрузке–разгрузке образца, происходило по схеме (0–38–0–76–0–95–0–144–0–190–0–192–0–247–0–304–0–342–0–390) МПа. В процессе нагрузки–разгрузки наблюдалась гистерезисная зависимость  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  и регистрировались остаточные деформации. После каждого цикла нагрузки–разгрузки происходило упрочнение материала образца: увеличивался предел текучести  $\sigma_{-0.2}$ . При  $\sigma \approx 390$  МПа и  $\epsilon \approx 0.16$  произошло разрушение образца. Разрушение образца было хрупким: харак-

терной шейки в области разрыва образца не образовывалось. Измерение микротвердости в сплаве АМгб показало ее увеличение примерно в 1.3 раза в результате деформационного упрочнения, вызванного многократным процессом нагрузки–разгрузки.

В образце № 2 сплава АМгб ультразвуковым методом исследовано влияние упрочнения на его упругие свойства. Впервые обнаружено, что упрочнение изотропного сплава АМгб приводит к увеличению коэффициента упругости  $C_{11}$  в нем.

Методом Терстона–Браггера и спектральным методом исследовано влияние цикла нагрузки–разгрузки на нелинейные упругие свойства сплава АМгб: при различных фиксированных величинах деформации образца (вплоть до разрывных) измерена зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники. Обнаружена практически квадратичная зависимость амплитуды второй акустической гармоники от амплитуды первой гармоники. Такую зависимость можно объяснить наличием в образце классической нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки в образце, и структурной нелинейности, обусловленной дислокациями. Эти два механизма упругой нелинейности обеспечивают квадратичную зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники.

Полученные результаты могут быть использованы в физике твердого тела, материаловедении, при создании новых методик неразрушающего контроля конструкционных материалов методами нелинейной акустической диагностики.

Исследования упругих характеристик выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-22-00042). Изготовление образцов и исследования их микротвердости выполнено с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ, поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения №14.593.21.0007 от 28.08.2017, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI59317X0007.

Авторы признательны Л.Ф. Соловьевой за помощь в приготовлении образцов и проведении измерений микротвердости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкционные материалы. Справочник. Под ред. Арзамасова Б.Н. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
2. Физические величины. Справочник. Под ред. Григорьева Е.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 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. Руденко О.В. Нелинейные методы акустической диагностики // Дефектоскопия. 1993. № 8. С. 24–32.
5. 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. 172–178.
6. Гедройц А.А., Зарембо Л.К., Красильников В.А. Сдвиговые волны конечной амплитуды в поли- и монокристаллах металлов // Докл. АН СССР. 1963. Т. 150. С. 515–518.
7. Гиц И.Д., Гуцин В.В., Конюхов Б.А. Изменение нелинейных искажений звуковых волн в поликристаллическом алюминии при усталостных испытаниях // Акуст. журн. 1973. Т. 19. № 3. С. 335–338.
8. Коротков А.С., Славинский М.М., Сутин А.М. Изменение нелинейного акустического параметра стали при накоплении дефектов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 84–87.
9. Коробов А.И., Экономов А.Н. Влияние термической обработки и статических деформаций на акустическую нелинейность медных проволок // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 5. С. 640–648.
10. Коробов А.И., Бражский Ю.А., Нин В. Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 663–671.
11. Волков А.Д., Кокшайский А.И., Коробов А.И., Прохоров В.М. Коэффициенты упругости второго и третьего порядков в поликристаллическом сплаве алюминия марки АМГ6 // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 685–691.
12. Brugger K., Fritz T.C. Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media // Phys. Rev. 1964. V. 133. № 6A. P. A1604–A1610.
13. Коробов А.И., Кокшайский А.И., Прохоров В.М., Евдокимов И.А., Перфилов С.А., Волков А.Д. Механические и нелинейные упругие характеристики поликристаллического алюминиевого сплава АМГ6 и нанокompозита п-АМГ6/С60 // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 12. С. 2384–2392.
14. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 309 с.
15. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.