

УДК 534.2

УПРУГИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАНОКОМПОЗИТА *n*-AMg6/C60 В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РЕВЕРСИВНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

© 2019 г. А. И. Коробов^{а, *}, Н. В. Ширгина^а, А. И. Кокшайский^а, В. М. Прохоров^б

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы,

^бТехнологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов
108840 Москва, Троицк, Россия

*e-mail: aikor42@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2018 г.

После доработки 18.10.2018 г.

Принята к публикации 30.10.2018 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния процесса реверсивной механической нагрузки–разгрузки на линейные и нелинейные упругие свойства наноструктурированного композита *n*-AMg6/C60. В образцах нанокompозита измерена нагрузочная кривая механическое напряжение–деформация при многоцикловых процессах нагрузки–разгрузки вплоть до разрушения образца. Исследовано влияние процесса циклической нагрузки–разгрузки образцов на их микротвердость. На различных характерных участках нагрузочной кривой методом Терстона–Браггера и спектральным методом исследованы нелинейные упругие свойства образцов композита *n*-AMg6/C60, подвергнутых нескольким циклам нагрузки–разгрузки. Проводится обсуждение результатов экспериментальных исследований.

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

DOI: 10.1134/S0320791919020072

ВВЕДЕНИЕ

Сплав AMg6 относится к системе Al–Mg–Mn и включает: до 93.68% алюминия, 5.8–6.8% магния, 0.5–0.8% марганца и прочие примеси [1, 2]. Данный сплав сочетает хорошие прочностные свойства с высокими пластическими характеристиками, в том числе при повышенных температурах, подвергается сварке [3]. Для улучшения механических свойств алюминиевых сплавов их предварительно подвергают механическому деформированию и тепловой обработке. Дополнительно повысить прочностные характеристики магнийсодержащего сплава путем закалки не удастся, поскольку сплав AMg6 относится к термически не упрочняемым сплавам.

Одним из прогрессивных современных методов улучшения физико-механических свойств металлов и сплавов является наноструктурирование — формирование наноструктуры в объеме материала [4]. В последние годы достигнут большой прогресс в разработке методов наноструктурирования, приводящих к новым, необычным сочетаниям свойств, таким как высокая прочность в со-

четании с повышенной твердостью, рекордная усталостная долговечность и др. [5–8].

Образцы нанокристаллического композита *n*-AMg6/C60 были получены из поликристаллического сплава AMg6 путем его измельчения в планетарной мельнице с добавлением 0.3 мас. % фуллерита C₆₀. Процесс проводился в атмосфере аргона. Полученный продукт состоял из 200–500-микронных агломератов наночастиц. Исследование порошковых образцов методом рентгеновского когерентного рассеяния (CSL) показало, что средний размер наночастиц составляет 40–60 нм. Затем измельченный нанопорошок был предварительно уплотнен в цилиндрическую форму диаметром 180 мм при температуре 250°C и давлении 200–300 МПа. Полученную заготовку подвергли экструзии при температуре 300°C с уменьшением площади поперечного сечения по крайней мере в четыре раза (в этом случае диаметр был равен 90 мм). Модификации фуллерита C₆₀ на границах зерен предотвращали процесс рекристаллизации наночастиц. Проведенные исследования механических свойств образцов накоп-

зита n -AMg6/C60, таких как прочность при растяжении, предельная деформация и твердость, показали значительное улучшение этих характеристик по сравнению с исходным сплавом AMg6 [6].

Различные детали из композита n -AMg6/C60 в процессе их эксплуатации могут подвергаться периодическим статическим деформациям. Это приводит к накоплению в материале различных дефектов: дислокаций, микротрещин, остаточных деформаций, которые оказывают существенное влияние на упругие и прочностные свойства материала и могут привести к его разрушению. Акустические методы дают возможность проводить неразрушающую диагностику материалов в процессе их эксплуатации, позволяют выполнить тестовые испытания в широком диапазоне амплитуд и частот упругих волн. Так, например, в работе [9] показана возможность определения амплитуды деформации цикла усталостного нагружения акустическим методом путем измерения упругих характеристик материала. Поэтому проведение экспериментальных исследований влияния реверсивных статических механических деформаций на механические, линейные и нелинейные упругие свойства нанокompозита n -AMg6/C60 является актуальным и позволяет дополнить традиционные методы [10–12].

Исследование влияния статических реверсивных механических деформаций на механические, линейные и нелинейные упругие свойства исходного сплава AMg6 было проведено в предыдущей работе [13]. В работе [14] приведены результаты измерений ультразвуковым методом зависимости коэффициентов упругости второго порядка поликристаллического алюминий–магниевого сплава AMg6 и приготовленного на его основе нанокompозита n -AMg6/C60 от гидростатического давления до 1.6 ГПа. В настоящей работе эти исследования дополнены данными для образцов нанокompозита n -AMg6/C60, подвергнутых многоциклового нагрузке–разгрузке.

ОБРАЗЦЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения исследований из нанокompозита n -AMg6/C60 были приготовлены два одинаковых образца – № 1 и № 2 (рис. 1), имеющих форму цилиндрической гантели с тонкой цилиндрической деформируемой частью длиной $L_0 = 60$ мм и диаметром, равным 8 мм. Общая длина образцов, включающая деформируемую и недеформируемую части, составила 80 мм. Противоположные основания цилиндрических образцов были плоскопараллельными и тщательно полировались. Возбуждение и прием продольных объемных акустических волн (ОАВ) в образцах осуществлялись посеребрёнными пластинками из ниобата лития $Y-36^\circ$ среза с резонансными частотами 5 и 10 МГц. Пла-

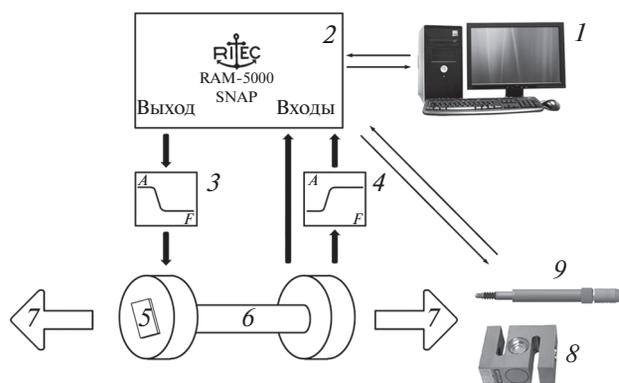


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – персональный компьютер, 2 – ультразвуковой автоматизированный комплекс Ritec, 3 – фильтр высоких частот, 4 – фильтр низких частот, 5 – пьезоэлектрический преобразователь из ниобата лития, 6 – образец, 7 – внешняя растягивающая сила, полученная при помощи винтового домкрата, 8 – датчик давления anyload, 9 – датчик удлинения waycon.

стинки крепились к плоским основаниям образца с помощью акустической мультисиликоновой склейки OKS 1110.

Для одновременного исследования механических, линейных и нелинейных упругих свойств материала в процессе циклической реверсивной механической нагрузки–разгрузки использовался измерительный комплекс, контролируемый персональным компьютером (ПК).

Измерительный комплекс состоит из автоматизированной ультразвуковой системы Ritec RAM-5000, 4-канального цифрового осциллографа DS09104A и механического устройства для создания в исследуемом материале реверсивных контролируемых деформаций растяжения–сжатия (рис. 1). Ультразвуковая система Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM работает в импульсном режиме и предназначена для измерения линейных и нелинейных упругих свойств твердых тел. Механическое устройство для создания в исследуемом образце реверсивных деформаций растяжения–сжатия изготовлено авторами на базе 20-тонного пресса фирмы MATRIX. Изготовленная дополнительно к прессу механическая оснастка и разработанные формы испытываемых образцов позволили создавать в них контролируемые деформации сжатия, растяжения и изгиба. Для измерения величины прикладываемой к образцу силы и изменения его длины, пресс дополнительно был снабжен электромеханическими датчиками, которые вырабатывали постоянные электрические напряжения, пропорциональные силе, приложенной к образцу и изменению его длины при этом. Эти напряжения подавались в Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM, где оцифровывались с помощью 12-разрядных АЦП и в цифровой форме записы-

Таблица 1. Оценка величины модуля Юнга композита *n*-AMg6/C60

<i>E</i> , ГПа, участок 1	<i>E</i> , ГПа, участок 2	<i>E</i> , ГПа, участок 3	<i>E</i> , ГПа, участок 4	<i>E</i> , ГПа, участок 5
31.4 ± 0.03	34.9 ± 0.03	32.7 ± 0.03	33.2 ± 0.03	28.8 ± 0.03

вался в ПК. Погрешность измерения изменения длины образца и приложенной к нему силы составляла 0.1%. Разработанный пакет программ обеспечивает автоматическую регистрацию измеряемых комплексом величин и полный контроль над комплексом ПК.

В комплексе для одновременного исследования механических и упругих свойств твердых тел были реализованы следующие методики:

а) Статический метод для измерения нагрузочной кривой “механическое напряжение σ –деформация ϵ ” при реверсивном изменении механического напряжения, приложенного к исследуемому образцу.

б) Квазистатический метод Терстона–Браггера для определения всех компонент тензора упругости третьего порядка в твердых телах на основе упругоакустического эффекта.

в) Импульсный метод измерения скорости и поглощения ОАВ, определения всех компонент тензора упругости второго порядка в твердых телах.

г) Спектральный метод для определения нелинейных упругих свойств твердых тел, основанный на исследовании эффективности генерации высших акустических гармоник при распространении акустических волн конечной амплитуды в исследуемом образце. Для выделения сигналов первой и второй упругих гармоник применялись фильтры низких и высоких частот. Исследование эффективности генерации второй гармоники ОАВ в исследуемом образце проводилось на частоте $2f = 10$ МГц при распространении ОАВ конечной амплитуды на частоте $f = 5$ МГц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение скорости упругих волн V проводилось импульсным методом на “прохождение” по формуле $V = L/\tau$, где L – длина образца, τ – время прохождения импульса ОАВ через образец. Скорость продольной ОАВ в обоих ненагруженных образцах была равна $V = 6370 \pm 30$ м/с, скорость сдвиговых ОАВ составила 3180 ± 16 м/с.

Результаты измерения нагрузочных кривых $\sigma = \sigma(\epsilon)$ в образцах № 1 и № 2 при циклическом изменении механического напряжения, приложенного к ним, приведены на рис. 2а, 2б. Изменение механического напряжения σ в образце № 1 при циклической реверсивной нагрузке–разгрузке происходило по схеме (0–112–0–204–0–316–0–486) МПа, а в образце № 2 по схеме (0–38–0–57–0–76–

0–95–0–144–0–190–0–247–0–304–0–342–0–380–0–418–0–456–0–532–0–610) МПа. В процессе реверсивного изменения нагрузки–разгрузки остаточные деформации в образцах при нулевом растягивающем напряжении $\sigma = 0$ практически отсутствовали. В образце № 2 после 13 циклов нагрузки–разгрузки при $\sigma \approx 610$ МПа и $\epsilon \approx 0.016$ произошел разрыв образца. Разрыв образца № 1 после трех циклов нагрузки–разгрузки произошел при $\sigma \approx 486$ МПа и $\epsilon \approx 0.02$. Значительное различие в величинах механического напряжения и деформации образцах в № 1 и № 2, при которых произошел разрыв, указывает на значительное упрочнение исследуемого материала в образце № 2 по сравнению с образцом № 1, так как образец № 2 подвергался большему количеству циклов нагрузки–разгрузки. В обоих образцах в области разрыва характерная “шейка” не образовывалась. Это указывает на хрупкое разрушение образцов (рис. 3б).

Проведенные экспериментальные измерения зависимости напряжение–деформация позволили оценить значения модуля Юнга на линейных участках нагрузки и разгрузки образца № 1, результаты приведены в табл. 1. Величина модуля Юнга на участках нагрузочной кривой, соответствующих нагрузке образца, меньше величины модуля Юнга на участках, соответствующих разгрузке. Это связано с упрочнением образца при его нагрузке.

После разрушения образца было исследовано влияние реверсивной механической нагрузки–разгрузки на величину микротвердости H в различных областях образца № 2 нанокompозита *n*-AMg6/C60. Измерения микротвердости проводились на шлифе, вырезанном из различных частей циклически деформированного образца *n*-AMg6/C60 после разрыва (рис. 3б): из области 1, которая при циклической нагрузке–разгрузке во время эксперимента практически 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 в шлифах образцов проводилось согласно ГОСТ 2999-75 на твердомере DuraScan20 при нагрузке на индентор Викерса 50 г в течение 12 с.

В шлифах круглого сечения диаметром 8 мм (область 2), вырезанных перпендикулярно цилиндрической оси образца, измерения микротвердости проводились вдоль диаметра в пяти

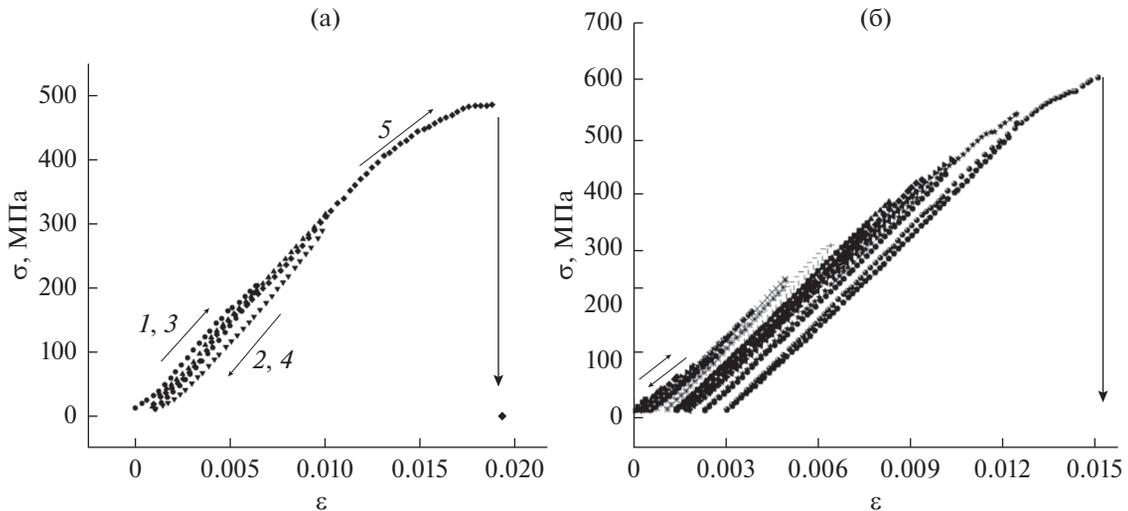


Рис. 2. Нагрузочные кривые $\sigma = \sigma(\epsilon)$ в образцах (а) № 1 и (б) № 2 сплава *n*-AMg6/C60 при циклическом изменении механического напряжения.

точках с шагом 2 мм, и с шагом 6 мм в пяти точках поверхности шляпки гантели диаметром 25 мм (область 1). Значения микротвердости усреднялись по результатам пяти измерений.

Измеренные значения микротвердости *H* в области 1 для *n*-AMg6/C60, не подвергнутой деформации, были равны $H = 1.29 \pm 0.03$ ГПа. Для *n*-AMg6/C60 в области 2 среднее значение $H_{cp} = 1.74 \pm 0.04$ ГПа. Распределение микротвердости вдоль диаметра, перпендикулярного оси образца, приведено в табл. 2. Как видно из таблицы, микротвердость по краям диаметра сечения больше, чем во внутренней части деформированной области 2. Это связано с тем, что при изготовлении образца на токарном станке внешняя сторона деформируемой части образца подверглась дополнительной механической нагрузке, что привело к дополнительному упрочнению цилиндрической поверхности образца.

Одновременно с измерением нагрузочной кривой в процессе реверсивных циклов нагрузки–разгрузки импульсным методом в образцах № 1 и № 2 были измерены зависимости скорости *V* продольной ОАВ от изменяющегося растягивающего механического напряжения σ (рис. 4а, 4в). После двух циклов нагрузки–разгрузки произошло увеличение скорости на 0.2%, после 12 циклов нагрузки–разгрузки увеличение скорости составило почти 0.5% относительно ненагруженного образ-

ца. В момент разрушения образца скорость объемных упругих волн в нем уменьшилась приблизительно на 16% относительно ненагруженного образца (рис. 4а).

По результатам измерения скорости продольной упругой волны были определены значения коэффициентов упругости второго порядка C_{11} в зависимости от статического напряжения, приложенного к образцу. Определенные зависимости коэффициента $C_{11}(\sigma)$ от приложенного напряжения в образцах № 1 и № 2 приведены на рис. 4б, 4г.

Результаты экспериментальных измерений относительного изменения скорости продольной волны *V* в образцах № 1 и № 2 в зависимости от растягивающего напряжения σ (рис. 4а, 4в) были использованы для определения коэффициентов упругости третьего порядка C_{111} методом Терстона–Браггера [12]:

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

где *W* – “естественная скорость” ОАВ, ρ_0 – плотность, $F = S_{jkab}^T M_a M_b U_j U_k$, S_{ipab}^T – коэффициенты податливости второго порядка, $G = S_{ipab}^T C_{jrksip} U_j U_k N_r N_s M_a M_b$ – коэффициенты упругости третьего порядка (КУТП) в исследуемом

Таблица 2. Зависимость микротвердости образца *n*-AMg6/C60 от координаты в его деформируемой части 2

Координаты измерения вдоль диаметра, мм (рис. 3б)	0.5	2	4	6	7.5
Микротвердость <i>H</i> , ГПа	1.75 ± 0.07	1.72 ± 0.03	1.75 ± 0.04	1.69 ± 0.03	1.78 ± 0.05

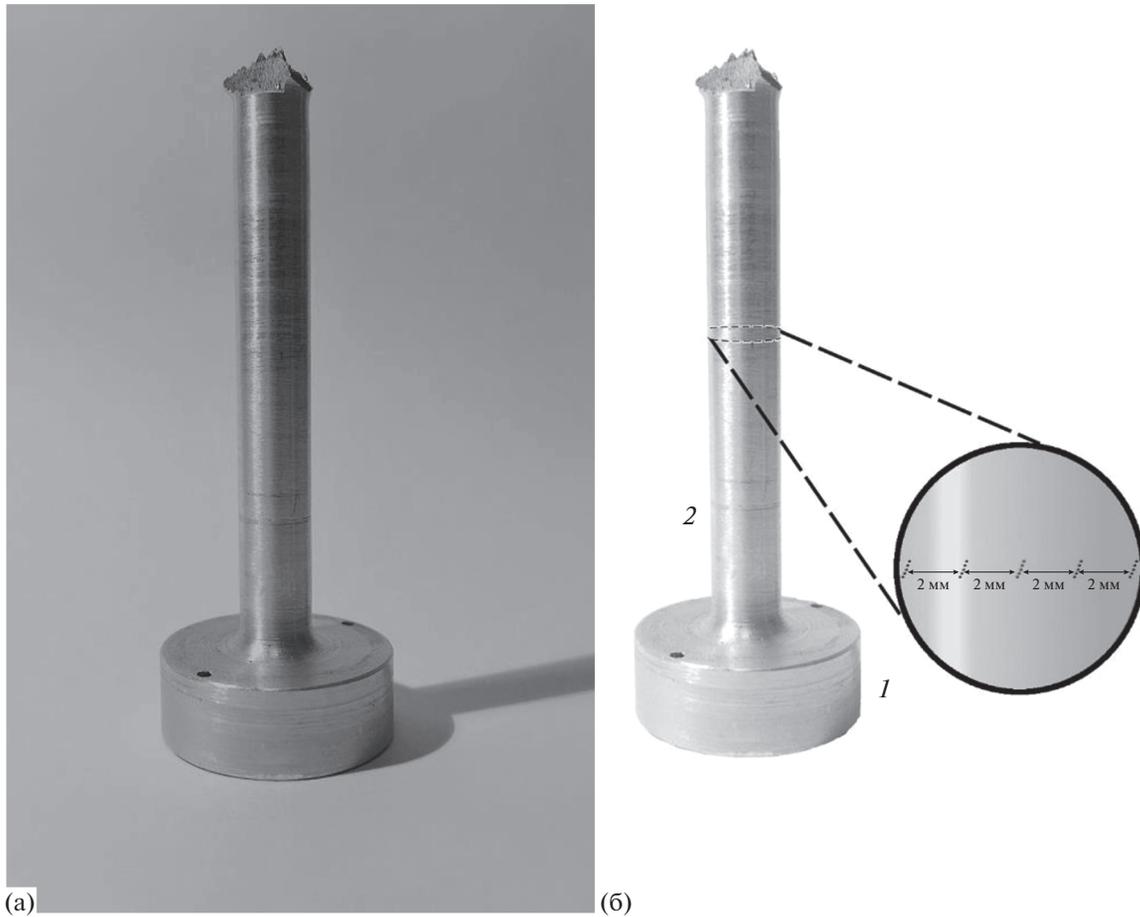


Рис. 3. Фотографии (а) образца n -AMg6/C60 после разрыва, (б) области измерения микротвердости в образцах после разрыва.

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 σ .

КУТП являются коэффициентами разложения упругой энергии при деформации в третьей степени и отражают отклонения от линейной зависимости закона Гука. Они количественно описывают ангармонические свойства кристаллической решетки: тепловое расширение, взаимодействие фононов, высокочастотное поглощение ультразвука. КУТП также используются для анализа взаимодействия акустических волн конечной амплитуды в твердых телах [16, 17].

Определенные величины КУТП C_{111} на различных участках зависимости скорости от напряжения (рис. 4а, 4в) приведены в табл. 3. Полученные значения коэффициента C_{111} по порядку величины совпадают со значениями этого коэффициента, приведенного в [18, 19]. Как видно из табл. 3, циклические деформации нанокompозита n -AMg6/C60 привели к росту по абсолютной величине коэффициента C_{111} . Это связано с упрочнением образца при его многократном растяжении. Максимальное значение КУТП достигается на участках нагрузочной кривой, близких к разрыву.

Нелинейные упругие свойства образца на разных участках нагрузочной кривой были дополни-

Таблица 3. Оценка коэффициента упругости третьего порядка C_{111} n -AMg6/C60 на разных участках нагрузочной кривой (рис. 4а, 4в)

Номер цикла	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_{111} , ГПа (образец №1)	-615	-664	-655	-691	-696	–	–	–	–
C_{111} , ГПа (образец №2)	-597	-585	-605	-631	-667	-686	-693	-707	-694

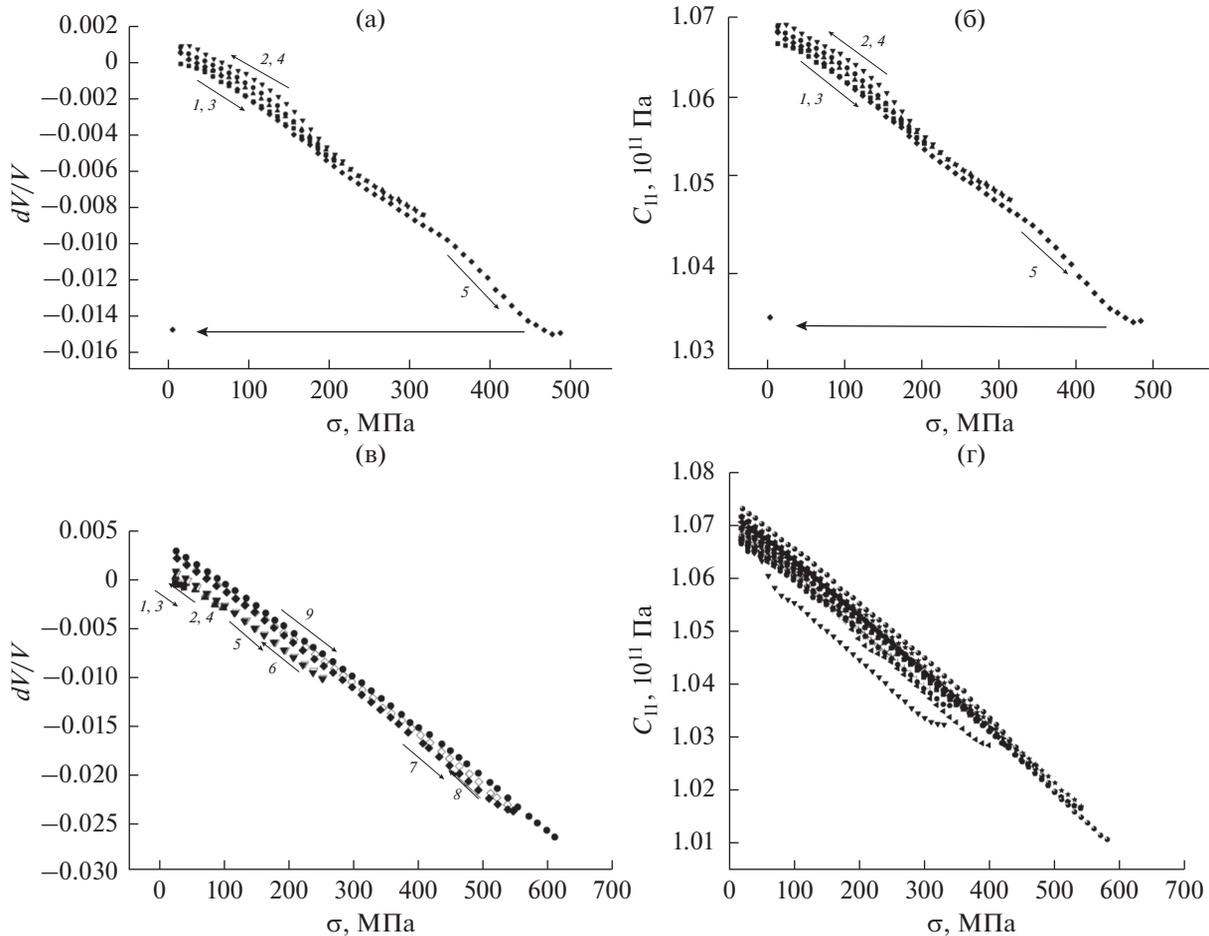


Рис. 4. (а) Зависимость относительного изменения скорости от величины напряжения для образца № 1; (б) зависимость КУВП C_{11} от напряжения в процессе циклов нагрузки–разгрузки для образца № 1; (в) зависимость относительного изменения скорости от величины напряжения для образца № 2; (г) зависимость КУВП C_{11} от напряжения в процессе циклов нагрузки–разгрузки для образца № 2.

тельно исследованы спектральным методом. В спектре гармонической продольной ОАВ конечной амплитуды, распространяющейся в твердом теле, кроме волны основной частоты $A_f = A_1 \sin(2\pi ft - kl)$, наблюдается вторая гармоника ОАВ $A_{2f} = A_2 \sin[2(\omega t - kl)]$:

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

Зависимость амплитуды второй гармоники A_2 от амплитуды продольной ОАВ первой гармоники A_1 в (2) определяется уравнением [16]

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

где $k = \omega/V_L$ – волновое число, ω – частота первой упругой гармоники, L – длина области взаимодействия, $N = (3C_{11} + C_{111})/C_{11}$ – 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, M определяет степенную зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники. В бездефектных твердых телах упругая нелинейность определяется ангармонизмом кристаллической решетки (классическая нелинейность), и в этом случае $M = 2$. В средах с дефектами кроме классической нелинейности присутствует неклассическая нелинейность, обусловленная дефектной структурой в твердом теле. В таких средах может быть $M \neq 2$ [17].

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 показаны на рис. 5. Для анализа приведенных на этом рисунке экспериментальных результатов выражение для амплитуды второй гармоники (3) было прологарифмировано. (Предварительно значения амплитуд 1-й и 2-й упругих гармоник были переведены в безразмер-

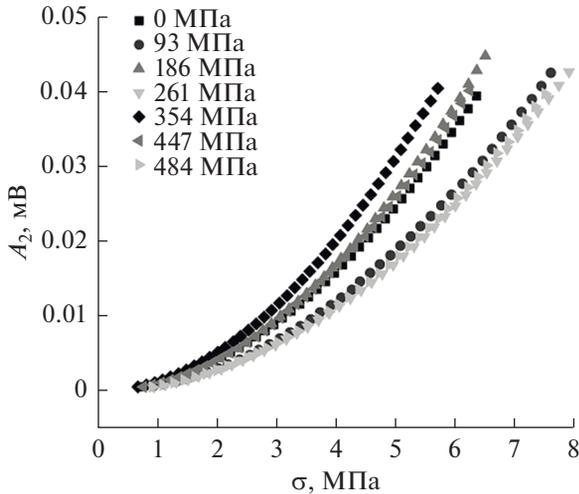


Рис. 5. Амплитуда второй упругой гармоники в зависимости от амплитуды первой упругой гармоники при различных величинах внешнего напряжения в образце нанокompозита *n*-AMg6/C60.

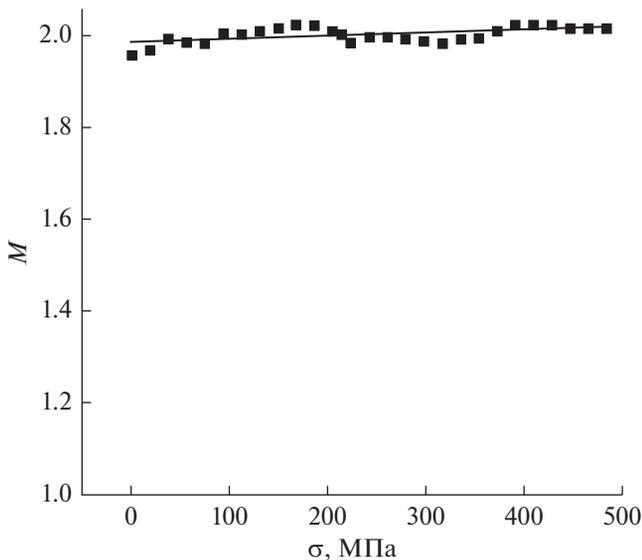


Рис. 6. Зависимость коэффициента *M* в образце нанокompозита *n*-AMg6/C60 от величины внешнего механического напряжения, приложенного к образцу.

ные величины путем нормировки величин амплитуд первой и второй акустических гармоник на $1 B$.)

$$\ln(A_2) = \ln N + \ln\left[\frac{(Lk_f^2)}{8}\right] + M \ln(A_1). \quad (4)$$

Выражение (4) является уравнением прямой линии следующего вида:

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

коэффициенты которого имеют следующий физический смысл: *M* определяет степенную зависимость амплитуды второй гармоники и угол на-

клона графика $y = y(x)$, $B = \ln(Lk_f^2/8) + \ln N$ — величина ординаты в точке пересечения графика с осью ординат. Анализ полученных результатов позволил определить показатель *M* степенной зависимости амплитуды второй гармоники от амплитуды первой гармоники (рис. 5) и зависимость *M* от величины приложенного к образцу давления (рис. 6). Проведенная аппроксимация графика на рис. 6 показала, что коэффициент *M* в пределах ошибки измерения не зависит от давления и для *n*-AMg6/C60 равен $M = 1.983 \pm 0.006$. Такие значения коэффициента *M* 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 [20].

ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования влияния реверсивной механической нагрузки—разгрузки на механические и упругие свойства наноструктурного композита *n*-AMg6/C60.

В образцах наноструктурного композита *n*-AMg6/C60 измерены нагрузочные кривые $\sigma = \sigma(\epsilon)$ при циклическом изменении механического напряжения, приложенного к образцу. При этом в образцах композита *n*-AMg6/C60 практически не регистрировались остаточные деформации, на кривой напряжение—деформация практически отсутствовала зона пластических деформаций. Было установлено, что реверсивная механическая нагрузка—разгрузка образца композита *n*-AMg6/C60 привела к его упрочнению.

Методом Терстона—Браггера определены величины коэффициента упругости третьего порядка C_{111} для различных участков графика зависимости скорости от напряжения в композите *n*-AMg6/C60. Циклические деформации *n*-AMg6/C60 приводят к росту значений коэффициента C_{111} . Спектральным методом исследовано влияние цикла нагрузки—разгрузки на нелинейные упругие свойства сплава *n*-AMg6/C60: при различных фиксированных (вплоть до разрывных) величинах деформации образца 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 [20]. Эти два механизма упругой нелинейности обеспечивают квадратичную зави-

симось 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 образцов выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042). Изготовление образцов и исследования микротвердости выполнены с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ при поддержке 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. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур // УФН. 2009. Т. 179. № 4. С. 337–358.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига, 2007. 398 с.
5. Безручко Г.С., Разоренов С.В., Попов М.Ю. Влияние добавки фуллерена C 60 на прочностные свойства нанокристаллической меди и алюминия при ударно-волновом нагружении // Журн. технической физики. 2014. Т. 84. № 3. С. 69–74.
6. Lvova N., Evdokimov I., Perfilov S. Comparative studies of nanostructured aluminum alloys by destructive and nondestructive testing // Adv. Mater. Res. 2015. V. 1119. P. 9–13.
7. Evdokimov I.A., Perfilov S.A., Pozdnyakov A.A. et al. Nanostructured composite materials based on Al–Mg alloy modified with Fullerene C 60 // Inorg. Mater. Appl. Res. 2018. V. 9. № 3. P. 472–477.
8. Popov M., Medvedev V., Blank V. et al. Fulleride of aluminum nanoclusters // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. № 9.
9. Гончар А.В., Мишакин В.В., Ключников В.А., Курашкин К.В. Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 4. С. 518–521.
10. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. Пер. с франц. М.: Наука, 1982. 424 с.
11. Кардашев Б.К., Бетехтин В.И., Нарыкова М.В. Упруго-пластические свойства микро- и субмикрорекристаллических металлов и сплавов // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 12. С. 94–106.
12. Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю. Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 3. С. 385–391.
13. Коробов А.И., Ширгина Н.В., Кокшайский А.И., Прохоров В.М. Влияние статической реверсивной нагрузки на механические и упругие свойства поликристаллического сплава алюминия AMg6 // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 4. С. 424–431.
14. Прохоров В.М., Громницкая Е.Л. Зависимость от давления коэффициентов упругости алюминий–магниевого сплава AMg6 и нанокompозитного сплава n-Mg6/C60 // ФТТ. 2018. Т. 60. № 4. С. 765–769.
15. Brugger K., Thurston R.N. 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.
16. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 309 с.
17. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
18. 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 AMg6 и нанокompозита n-AMg6/C60 // ФТТ. 2016. Т. 58. № 12. С. 2384–2392.
19. Волков А.Д., Кокшайский А.И., Коробов А.И., Прохоров В.М. Коэффициенты упругости второго и третьего порядков в поликристаллическом сплаве алюминия марки AMg6 // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 685–691.
20. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.