

НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95 И КОМПОЗИТА В95/НАНОАЛМАЗ

© 2016 г. А. И. Коробов*, В. М. Прохоров**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы

**Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов
142190 Троицк, Москва

E-mail: aikor42@mail.ru, pym@tisnum.ru

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Приводятся результаты исследования нелинейных акустических свойств поликристаллических сплавов алюминия марки В95 и композита В95/наноалмаз. Изучение нелинейных свойств сплавов проводилось спектральным методом, путем измерения эффективности генерации второй акустической гармоники объемной акустической волны на частоте $2f = 10$ МГц в поле продольной акустической волны конечной амплитуды с частотой $f = 5$ МГц. Полученные этим методом результаты сравниваются с результатами исследований нелинейных акустических свойств тестируемых сплавов квазистатическим методом Терстона–Браггера.

Ключевые слова: сплав В95, композит В95/наноалмаз, нелинейный акустический параметр, коэффициенты упругости второго и третьего порядка, метод Терстона–Браггера, спектральный метод.

DOI: 10.7868/S0320791916050063

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемый в последние годы повышенный интерес исследователей к разработке и исследованию металло-матричных композитов (ММК) обусловлен возможностью значительного повышения уровня физико-механических и эксплуатационных свойств и расширения температурно-силовых интервалов работы изделий из ММК [1]. Алюминий и сплавы на его основе получили наибольшее распространение в качестве матриц для получения ММК. Значительный интерес к алюмоматричным композиционным (АМК) сплавам обусловлен их высокой удельной прочностью, малой плотностью, хорошими технологическими свойствами [2]. Существует значительное число технологических процессов получения композиционных сплавов. Анализ современных тенденций в развитии теории и технологии производства АМК позволяет предположить, что одним из перспективных направлений их совершенствования является наноструктурирование АМК [2]. Введение наноразмерных частиц в расплав алюминиевого сплава служит одним из основных способов измельчения структуры АМК до наноуровня [3, 4].

В последние годы значительное внимание уделяется ММК на основе наноалмаза и цветного металла. Так, например, в [5, 6] сообщается о получении и свойствах композита медь/наноалмаз, приготовленного механическим перемешивани-

ем порошков меди и наноалмаза, а в [7] ММК медь/наноалмаз получен методом распыления суспензии наноалмаза детонационного синтеза и растворов солей меди. Ранее в [8] сообщалось о получении наноалмазных композитов на основе сплава алюминия со значением микротвердости выше 10 ГПа. В этих работах наноалмазы, введенные в материалы, играют роль мощного структурообразователя, обеспечивая дисперсионное упрочнение материала и тем самым повышая его прочностные характеристики, улучшая их физические свойства. При этом важной исследовательской задачей является изучение влияния наноструктурирования при введении в АМК разного рода армирующих наночастиц на изменение их механических, и в том числе упругих характеристик.

Одним из наиболее прочных алюминиевых сплавов является сплав В95, широко применяемый при изготовлении различных профилей, удельная прочность которых является решающим фактором. Сплав В95, химический состав которого регулируется ГОСТ 4784-97, до 91.5% состоит из алюминия, легируемого добавками магния, цинка и меди. Введение меди повышает стойкость сплава к коррозии под напряжением, а марганец и хром способствуют повышению его прочности. Улучшенные модификации сплава – марки В95пч и В95оч, обладающие повышенной и особой чистотой, прочность которых на 40%

больше, чем у сплава В95, — остаются, наряду с дуралюминами (высокопрочными сплавами на основе алюминия с добавками меди, магния и марганца), главными конструкционными материалами, используемым в судостроении, авиационной и атомной технике [9]. Поэтому изучение влияния наноструктурирования на механические и упругие (в том числе нелинейные акустические) характеристики сплава В95 актуально и важно для развития технологии наноструктурирования и расширения области применения сплава. Повышенный интерес к исследованию нелинейных упругих характеристик материалов обусловлен не только фундаментальными причинами использования их с целью более точного описания уравнения состояния твердого тела, но и прикладным значением — перспективой применения для оценки конструкционных параметров материалов. Для описания нелинейных акустических характеристик твердых тел используются коэффициенты упругости третьего порядка (КУТП). Они количественно описывают ангармонизм кристаллической решетки и используются для анализа взаимодействия акустических волн в твердых телах [10–14].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию нелинейных акустических характеристик поликристаллических сплавов алюминия марки В95 и композита В95/наноалмаз спектральным методом. Полученные этим методом результаты используются для сравнения с результатами измерений в этих материалах КУТП квазистатическим методом [10].

КВАЗИСТАТИЧЕСКИЙ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КУТП

В настоящее время для измерения КУТП в основном используются два метода: квазистатический метод Терстона–Браггера [15] и динамический (или спектральный) метод [11, 16].

Количественные оценки КУТП, определенные одинаковыми методами в одних и тех же материалах разными авторами, могут значительно различаться, и эти различия иногда превышают заявленные погрешности измерений. Причины такого различия обсуждаются в [17].

Теоретические основы квазистатического метода определения КУТП развиты в работе Терстона и Браггера [15]. Этот метод основан на акустоупругом эффекте и связан с измерениями зависимости скорости продольных и сдвиговых объемных акустических волн (ОАВ) малой амплитуды в образце исследуемого материала от величины приложенного к нему статического сжатия. Особенности использования этого метода для измерений КУТП в различных поликристаллических металлических сплавах и композитах на их основе приведены в работах [10, 18–20].

Спектральный метод измерений КУТП основан на явлении генерации высших гармоник при распространении ОАВ конечной амплитуды в исследуемом образце [11, 16]. Так, в спектре гармонической продольной ОАВ конечной амплитуды, распространяющейся в изотропном твердом теле, кроме волны основной частоты $A_f = A_1 \sin(2\pi ft - kl)$, наблюдается волна второй гармоники ОАВ $A_{2f} = A_2 \sin[2(\omega t - kl)]$:

$$A = A_1 \sin(\omega t - kl) + A_2 \sin[2(\omega t - kl)]. \quad (1)$$

Следует отметить, что в изотропных твердых телах генерация второй сдвиговой гармоники ОАВ невозможна [11].

Зависимость амплитуды второй гармоники A_2 от амплитуды продольной ОАВ первой гармоники A_1 в (1) определяется следующим уравнением:

$$A_2 = \frac{N k_f^2 L A_1^2}{8}, \quad (2)$$

где $k_f = \omega/V_L$ — волновое число, L — длина области взаимодействия, $N = (C_{ijkl}^*)/C_{ijkl} = (3C_{11} + C_{111})/C_{11} = (3 + C_{111}/C_{11})$ — нелинейный акустический параметр для продольной ОАВ [10, 16], C_{11} — коэффициент упругости второго порядка (КУВП), C_{111} — КУТП.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования в работе проводились на автоматизированном ультразвуковом комплексе, блок-схема которого приведена на рис. 1. Он состоит из ультразвуковой автоматизированной системы Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM, осциллографа DS09104A и устройства для создания контролируемого одноосного сжатия в исследуемом образце.

Комплекс Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM работает в импульсном режиме и предназначен для измерения линейных и нелинейных упругих свойств твердых тел. Измерение скорости ОАВ V проводилось импульсным методом “на отражение” по формуле $V = 2L/\tau$, где L — длина образца, τ — время двойного прохождения акустического импульса через образец. Относительное изменение скорости ОАВ, вызванное приложением к образцу статического сжатия, определялось соотношением $\Delta V/V = -\Delta\tau/\tau$, где $\Delta\tau$ — изменение времени распространения упругой волны при этом.

Для исследования нелинейных упругих свойств твердых тел в комплексе реализован динамический спектральный метод, заключающийся в исследовании эффективности генерации второй акустической гармоники на частоте $2f$ при распространении

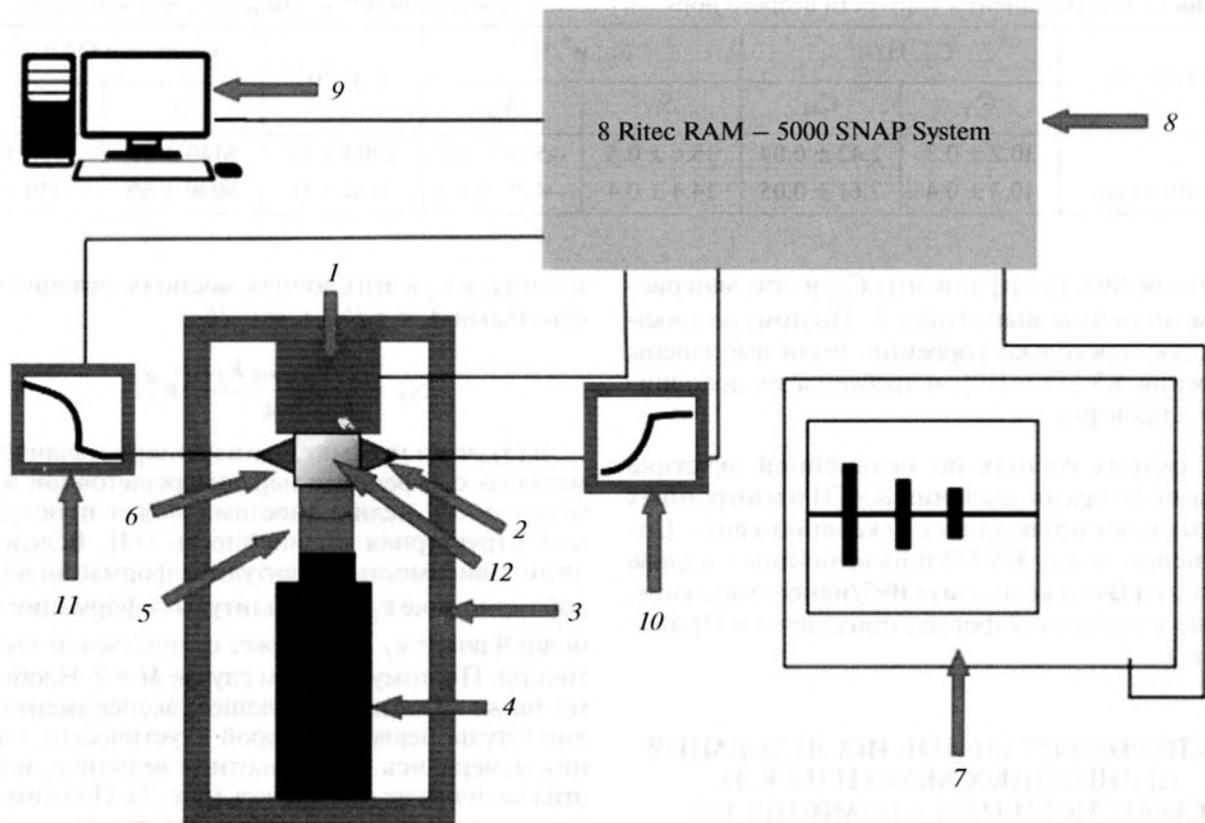


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного ультразвукового комплекса: 1 – датчик давления; 2, 6 – пьезоэлектрические преобразователи; 3 – рама; 4 – домкрат; 5 – сферический шарнир; 7 – осциллограф DS09104A; 8 – ультразвуковой комплекс; 9 – компьютер; 10, 11 – фильтры высоких и низких частот соответственно; 12 – образец.

ОАВ конечной амплитуды на частоте f . Исследование генерации второй гармоники проводилось импульсным методом “на прохождение”: измерялась амплитуда первого прошедшего импульса. Для выделения сигналов первой и второй акустических гармоник ОАВ комплекс снабжен комплектом фильтров низких и высоких частот. Для визуального контроля за серией упругих импульсов основной частоты и второй гармоники в исследуемом образце использовался цифровой осциллограф DS09104A.

Возбуждение и прием продольных ОАВ проводилось с помощью посеребренных пластинок из ниобата лития $Y-36^\circ$ среза с резонансными частотами $f = 5$ МГц и $2f = 10$ МГц. Пластинка с резонансной частотой $2f = 10$ МГц служила для приема ОАВ на частоте 5 и 10 МГц. К образцам пластинки прикреплялись с помощью салола – мелкокристаллического вещества с температурой плавления 42°C .

Образцы для проведения ультразвуковых исследований были приготовлены из промышленного четырехкомпонентного поликристаллического алюминиевого сплава В95 (система Al-Zn-Mg-Cu) (ГОСТ 4784-97) и композита В95/наноалмаз – сплава В95 с наночастицами алмаза детонационного синтеза в объеме 0.1 wt %. Метод приготовления

композита В95/наноалмаз и данные структурных исследований образцов методами металлографии, рентгеновской дифракции, КРС-спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии приведены в [10, 21].

Из изотропных поликристаллических сплавов В95 и композита В95/наноалмаз были изготовлены образцы в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами ребер $10 \times 12 \times 50$ мм. Противоположные грани образцов полировались и были строго параллельны друг другу. ОАВ распространялись параллельно длинным граням образцов. Ранее в этих образцах ультразвуковым методом были измерены КУВП (табл. 1) и квазистатическим методом Терстона–Браггера определены все независимые компоненты тензора КУТП C_{ijk} (табл. 2) [10].

Из анализа табл. 1 видно, что численные значения скоростей ОАВ и соответствующих КУВП в сплаве В95 и композите В95/наноалмаз в пределах ошибок их измерений совпадают. Однако значения КУТП в этих сплавах значительно различаются (табл. 2). Так, коэффициент C_{III} в композите В95/наноалмаз по абсолютной величине практически на порядок больше аналогичного коэффициен-

Таблица 1. Коэффициенты упругости второго порядка в сплаве алюминия В95 и композите В95/наноалмаз, [10]

Материал	C_{ij} , Н/м ²		S_{ij} , м ² /Н		ρ , кг/м ³	Скорости ОАВ, м/с	
	C_{11}	C_{44}	S_{11}	S_{12}		V_L	V_T
В95	10.2 ± 0.3	2.42 ± 0.04	15.4 ± 0.5	-5.28 ± 0.2	2700 ± 15	6140 ± 60	3000 ± 30
В95/наноалмаз	10.3 ± 0.4	2.61 ± 0.05	14.4 ± 0.4	-4.78 ± 0.2	2810 ± 15	6040 ± 60	3050 ± 30

та в сплаве В95, коэффициенты C_{112} в этих материалах имеют разные знаки (табл. 2). Поэтому возникает вопрос, насколько корректно были выполнены измерения КУТП в [10], и требуется их дополнительная проверка.

(В ранних работах по нелинейной акустике разными авторами значения КУТП в изотропных твердых телах приводились в скалярном виде. Соотношения между КУТП и их величины в сплаве алюминия В95 и композите В95/наноалмаз, записанные в различной форме, приведены в Приложении.)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ В95 И КОМПОЗИТА В95/НАНОАЛМАЗ СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Для проверки корректности результатов измерений КУТП методом Терстона–Браггера в сплавах алюминия В95 и В95/наноалмаз, выполненных в [10], нами дополнительно были протестированы нелинейные упругие свойства этих сплавов спектральным методом: в тестируемых образцах сплавов были проведены измерения и проанализированы зависимости амплитуды второй гармоники продольной ОАВ от амплитуды первой гармоники ОАВ.

Результаты экспериментальных измерений зависимости амплитуды второй акустической гармоники от амплитуды первой гармоники в сплаве В95 и композите В95/наноалмаз приведены на рис. 2. Для анализа экспериментальных результатов, приведенных на рис. 2, в уравнении (2) амплитуды A_1 и A_2 выразим через амплитуды дефор-

Таблица 2. Коэффициенты упругости третьего порядка C_{ijk} в сплаве алюминия В95 и композите В95/наноалмаз [10]

Материал	$C_{111} \times 10^{-11}$, Н/м ²	$C_{112} \times 10^{-11}$, Н/м ²	$C_{123} \times 10^{-11}$, Н/м ²
В95	-0.9 ± 0.4	1.68 ± 0.25	4.46 ± 0.15
В95/наноалмаз	-7.07 ± 1.53	-0.62 ± 0.76	4.51 ± 0.44

маций ϵ_f и ϵ_{2f} в этих волнах, воспользовавшись равенствами $A_1 = \epsilon_f/k_f$, $A_2 = \epsilon_{2f}/k_{2f}$,

$$\epsilon_{2f} = \left\{ \frac{|N|_{\text{спектр}} k_f L}{4} \right\} \epsilon_f^M. \quad (3)$$

В (3) учтен тот факт, что в поликристаллических металлах с дефектами наряду с решеточной и геометрической нелинейностями может присутствовать структурная нелинейность [14]. Вследствие этого зависимость амплитуды деформации во второй гармонике ϵ_{2f} от амплитуды деформации в основной волне ϵ_f в (3) может отличаться от квадратичной. Поэтому в общем случае $M \neq 2$. Необходимо также отметить следующее: экспериментально амплитуды первой и второй акустических гармоник измерялись по абсолютной величине, и фазы этих величин не измерялись (рис. 2). Поэтому в (3) нелинейный акустический параметр $N_{\text{спектр}}$ записан по абсолютной величине.

Представим результаты, приведенные на рис. 2, в двойном логарифмическом масштабе (рис. 3). Эти зависимости с высокой степенью точности аппроксимируются прямыми линиями, уравнение которых имеет вид

$$Y = HX + D. \quad (4)$$

После логарифмирования (3) получим следующее выражение:

$$\ln(\epsilon_{2f}) = \ln(|N|_{\text{спектр}} k_f L / 4) + M \ln(\epsilon_f). \quad (5)$$

Из сравнения выражений (4) и (5) следует: $Y = \ln(\epsilon_{2f})$, $X = \ln(\epsilon_f)$, $H = M$, $\ln(|N|_{\text{спектр}} k_f L / 4) = D$. Значения величин H и D , определенные из результатов аппроксимации зависимостей, представленных на рис. 3 прямыми линиями, приведены в табл. 3. В последнем столбце этой таблицы приведены значения величин нелинейных акустических параметров для продольной волны в тестируемых образцах, рассчитанные с использованием значений КУВП и КУТП, приведенных в табл. 1, 2.

Воспользовавшись значениями параметра D , приведенными в табл. 3 для сплава В95 и композита В95/наноалмаз, запишем следующие равенства:

$$D_{\text{наноалмаз}} = \ln[|N_{\text{наноалмаз}}|_{\text{спектр}} k_{f,\text{наноалмаз}} L / 4] = -9.71, \quad (5a)$$

$$D = \ln[|N|_{\text{спектр}} k_f L / 4] = -10.36. \quad (5b)$$

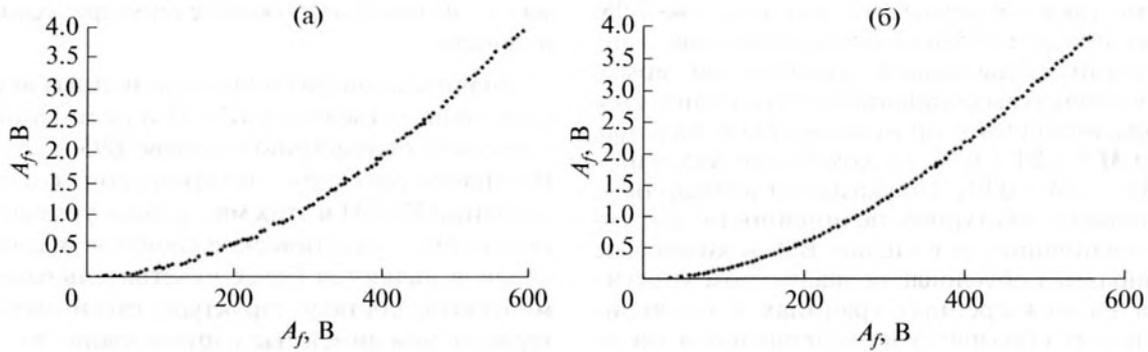


Рис. 2. Зависимость амплитуды второй акустической гармоники A_{2f} от амплитуды основной волны A_f в образцах: (а) сплава В95; (б) композита В95/наноалмаз.

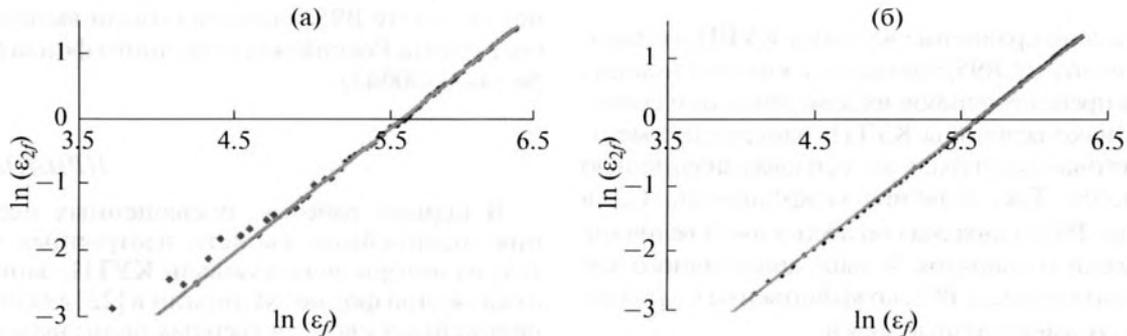


Рис. 3. Зависимость амплитуды деформации ϵ_{2f} во второй гармонике продольной ОАВ от амплитуды деформации ϵ_f в основной акустической волне в двойном логарифмическом масштабе в образцах: (а) сплава В95; (б) композита В95/наноалмаз.

После вычитания выражения (5б) из (5а) получим

$$\ln \left[\frac{N_{\text{наноалмаз}}}{N} \right]_{\text{спектр}} + \ln \left[\frac{k_{f, \text{наноалмаз}}}{k_f} \right] = 0.65. \quad (6)$$

Согласно (6), отношение нелинейных параметров по абсолютной величине для сплава В95 и композита В95/наноалмаз, определенных из спектральных измерений, равно

$$\left| \frac{N_{\text{наноалмаз}}}{N} \right|_{\text{спектр}} = \exp(0.63) = 1.91 \pm 0.2,$$

где индексом “наноалмаз” обозначены величины для композита В95/наноалмаз, без индекса – величины для сплава В95.

Аналогичная величина, рассчитанная с использованием значений КУВП и КУТП, приведенных в табл. 1, 2, равна $|N_{\text{наноалмаз}}/N|_{\text{квазистат}} = 1.88 \pm 0.3$. Таким образом, отношения нелинейных параметров $[N_{\text{наноалмаз}}/N]$, определенных из квазистатистических измерений КУТП методом Терстона–Браггера и из спектральных измерений в образцах сплава В95 и композита В95/наноалмаз, в пределах ошибок измерения величин, приведенных в табл. 1–3, совпадают. Это указывает на то, что численные зна-

чения КУТП для этих материалов в [10] определены корректно.

Анализ величин нелинейных акустических параметров N , приведенных в табл. 3, показывает, что в сплаве В95 геометрическая нелинейность больше акустической нелинейности, определяемой ангармонизмом кристаллической решетки, а в композите В95/наноалмаз эта нелинейность больше геометрической нелинейности. (Появление геометрической нелинейности в нелинейном акустическом параметре связано с квадратичным членом в тензоре деформации. Для продольной ОАВ в изотропных и анизотропных твердых телах вклад геометрической нелинейности в нелинейный акустический параметр равен 3 [11, 16].) Не-

Таблица 3. Параметры аппроксимирующих прямых $Y = Hx + D$

Материал	$H = M$	D	$N = 3 + C_{III}/C_{II}$
В95/наноалмаз	1.74 ± 0.01	-9.71 ± 0.06	-3.84 ± 0.7
В95	1.84 ± 0.01	-10.34 ± 0.04	2.12 ± 0.5

обходимо также отметить, что как в сплаве В95, так и в композите В95/наноалмаз степенная зависимость амплитуды второй акустической гармоники от амплитуды основной частоты отличается от квадратичной ($M \neq 2$): в сплаве В95 показатель степени $M = 1.84 \pm 0.01$, а в композите В95/наноалмаз $M = 1.74 \pm 0.01$. Это указывает на наличие в этих сплавах структурной нелинейности. Структурная нелинейность в сплаве В95 и композите В95/наноалмаз обусловлена градиентом упругих свойств на межзеренных границах в поликристаллических образцах этих материалов, а также дефектами, которые появились при изготовлении сплавов и образцов из них.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение величин КУВП в сплаве В95 и композите В95/наноалмаз, которое показало, что в пределах ошибок их измерения они совпадают. Однако величины КУТП, измеренные методом Терстона–Браггера, в этих сплавах значительно различаются. Так, величина коэффициента C_{111} в композите В95/наноалмаз по абсолютной величине практически на порядок больше аналогичного коэффициента в сплаве В95, коэффициенты C_{112} в этих материалах имеют разные знаки.

Для проверки корректности определения КУТП в сплавах В95 и В95/наноалмаз, проведенного в [10], нами были дополнительно исследованы нелинейные упругие свойства этих сплавов спектральным методом по эффективности генерации второй продольной акустической гармоники на частоте $2f = 10$ МГц при распространении в сплавах продольной ОАВ конечной амплитуды на частоте $f = 5$ МГц. Эти эксперименты позволили определить отношение величины нелинейного акустического параметра $N_{\text{наноалмаз}}$ в композите к нелинейному параметру N в сплаве В95 $|N_{\text{наноалмаз}}/N_{\text{спектр}}| = 1.91 \pm 0.2$, определенному из спектральных измерений.

Аналогичная величина, рассчитанная с использованием экспериментально измеренных в [10] значений КУВП и КУТП, равна $|N_{\text{наноалмаз}}/N_{\text{квазистат}}| = 1.88 \pm 0.3$, т.е. отношения нелинейных акустических параметров, определенные из квазистатических измерений КУТП методом Терстона–Браггера и спектральным методом, в пределах ошибки совпадают. Это указывает на корректность проведенных в [10] измерений КУТП в тестируемых сплавах.

Было также обнаружено, что в сплаве В95 геометрическая нелинейность больше акустической нелинейности, определяемой ангармонизмом кристаллической решетки, а в композите В95/наноал-

маз эта нелинейность больше геометрической нелинейности.

Значительное различие нелинейных акустических свойств (величин КУТП и нелинейных акустических параметров) в сплаве В95 и композите В95/наноалмаз при практическом совпадении значений КУВП в этих материалах указывает, что нелинейные акустические свойства исследуемых сплавов являются более чувствительными к химическому составу, структуре, стехиометрии материала, чем линейные упругие свойства.

Образцы для измерений были приготовлены в рамках госзадания Минобрнауки РФ на 2016 г. (проект № 3562).

Измерения КУВП и КУТП в сплаве В95 и нанокомпозите В95/наноалмаз были выполнены за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 14-22-00042).

ПРИЛОЖЕНИЕ

В первых работах, посвященных исследованию нелинейных свойств изотропных твердых тел, их авторы использовали КУТП, записанные в скалярной форме: Мурнаган в [22] для описания нелинейных свойств твердых пользовался КУТП в виде l, m, n ; Ландау в [23] были введены коэффициенты A, B, C , а в [24] для обозначения КУТП использовались греческие буквы v_1, v_2, v_3 . В [19] приведены соотношения, связывающие в изотропном твердом теле КУТП, записанные в тензорном виде, с КУТП, записанными в скалярном виде (табл. П1). Воспользовавшись экспериментально определенными КУТП C_{ijk} в сплавах В95 и В95/наноалмаз, нами были рассчитаны КУТП в скалярном виде $l, m, n, v_1, v_2, v_3, A, B, C$. Результаты расчетов приведены в табл. П2. Величины погрешностей КУТП в табл. 3 не превышают 10%.

Таблица П1. Соотношения между КУТП в изотропных твердых телах

Ландау [23]	Murnaghan [22]	Toupin & Bernstein [24]	Standard [15], C_{ijr}
A	$l = B + C$	$v_1 = 2C$	$C_{123} = 2C$ $C_{111} = 2A + 6B + 2C$
B	$m = A/2 + B$	$v_2 = B$	$C_{144} = B$ $C_{112} = 2B + 2C$
C	$n = A$	$v_3 = A/4$	$C_{166} = A/2 + B$

Таблица П2. Коэффициенты упругости третьего порядка $l, m, n, \nu_1, \nu_2, \nu_3$, и A, B, C в сплавах В95, В95/наноалмаз и АМг6 в 10^{11} Н/м²

Материал	l	m	n	ν_1	ν_2	ν_3	A	B	C
В95	0.84	-0.65	1.49	4.46	-1.39	0.37	1.49	-1.39	2.23
В95/наноалмаз	-0.31	-1.62	1.92	4.51	-2.57	0.47	1.92	-2.57	2.26
АМг6	-6.5	-5.3	-6.0	-8.6	-2.3	-1.5	-6.0	-2.3	-4.3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kainer K.U.* Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. Wiley-VCH, 2006. 330 p.
2. *Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А.* Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов / Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2(99). С. 210–217.
3. *Косников Г.А., Баранов В.А., Петрович С.Ю., Калмыков А.В.* О перспективах разработки литейных наноструктурных композиционных алюмоматричных сплавов // Литейщик России. 2011. № 9. С. 34–40.
4. *Панфилов А.В., Панфилов А.А., Петрунин А.В.* Синтез, структура и свойства объемных наноструктурированных алюмоматричных композиционных материалов конструкционного назначения // Нанотехника. 2007. № 3(11). С. 76–81.
5. *Correia J.B., Livramento V., Shohoji N., Tresso E., Yamamoto K., Taguchi T., Hanada K., Osawa E.* Bulk Copper-nanodiamond nanocomposites: processing and properties // Materials Science Forum. 2008. 587–588. P. 443–447.
6. *Hanada K., Osawa E., Inakuma M., Livramento V., Correia J.B., Shohoji N., Yamamoto K., Taguchi T.* Further studies on the intrusion-type alloy of copper particles with dispersed single-digit nanodiamond particles // Diamond and Related Materials. 2007. 16. P. 2054–2057.
7. *Васильева Е.С., Кудалов С.В., Соколов В.В., Климов Г.Г., Puguang Ji.* Свойства композитов медь-детонационный наноалмаз, полученных методом распыления растворов // Письма в ЖТФ. 2013. 39. С.81–88.
8. *Molian P., Molian R., Nair R.* Laser shock wave consolidation of nanodiamond powders on aluminum 319 // Applied Surface Science. 2009. 255. P. 3859–3867.
9. *Белецкий В.М., Кривов Г.А.* Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник. Под общей ред. академика РАН Фридляндера И.Н. К.: КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
10. *Коробов А.И., Прохоров В.М., Мехедов Д.М.* Упругие постоянные второго и третьего порядков алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз // ФТТ. 2013. Т. 55. № 1. С.10–13.
11. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
12. *Тагер Д., Рэмington В.* Гиперзвук в физике твердого тела. М.: Мир, 1975.
13. *Бражкин Ю.А., Коробов А.И., Красильников В.А., Лямов В.Е.* Встречное взаимодействие упругих волн в ниобате лития // ФТТ. 1976. Т. 18. № 6. С. 1746–1749.
14. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006 Т. 176. С. 77.
15. *Thurston R.N., Brugger K.* Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneous stressed media // Phys. Rev. 1964. V. 133. P. A1604–1610.
16. *Breazeale M.A., Philips J.* Determination of third-order elastic constants from ultrasonic harmonic generation measurements / In: Physical Acoustics. V. 17. New York: Academic Press, 1984. P. 1–60.
17. *Коробов А.И., Воронов Б.Б.* Коэффициенты упругости третьего порядка кристалла титаната стронция // ФТТ. 1996. Т. 38. № 7. С. 2159–216.
18. *Smith R.T., Stern R., Stephen R.W.B.* Third-order elastic moduli of polycrystalline metals from ultrasonic velocity measurements // J. Acoust. Soc. Am. 1966. 40. P. 1002–1008.
19. *Коробов А.И., Батенев А.В., Бражкин Ю.А.* Нелинейные упругие свойства сплава алюминия марки Д16 и чугуна КЧ35-10 // Дефектоскопия. 2000. № 2. С. 39–42.
20. *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. 685–69.
21. *Prokhorov V., Kulibaba V., Korobov A., Stavrev S., Kolev S.* Preparation and microstructure, elasticity and hardness investigation of Al-alloy/nanodiamond composite // Machines, technologies, materials. 2011. № 11. P. 40–42.
22. *Murnaghan F.D.* Finite Deformations of an Elastic Solid. New York: Chapman & Hall, 1951.
23. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат. 1953.
24. *Toupin R.A., Bernstein B.* Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect // J. Acoust. Soc. Am. 1961. 33. P. 216–225.