АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2015, том 61, № 6, с. 685–691

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.2

КОЭФФИЦИЕНТЫ УПРУГОСТИ ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ МАРКИ АМГ6

© 2015 г. А. Д. Волков*, А. И. Кокшайский*, 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, ул. Центральная 7а

E-mail: aikor42@mail.ru; pvm@tisnum.ru

Поступила в редакцию 10.06.2015 г.

В изотропном поликристаллическом сплаве алюминия АМг6 (система Al–Mg–Mn) экспериментально измерены все независимые коэффициенты упругости второго и третьего порядков ультразвуковым методом. Измерения проводились с помощью ультразвукового автоматизированного комплекса Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM, работающего в импульсном режиме. Коэффициенты упругости третьего порядка были определены методом Терстона–Браггера по результатам экспериментальных измерений зависимости скорости сдвиговых и продольных упругих волн в сплаве АМг6 от величины одноосного сжатия.

Ключевые слова: сплав алюминия АМг6, упругие волны, ультразвуковой метод, коэффициенты упругости второго и третьего порядков, метод Терстона–Браггера.

DOI: 10.7868/S0320791915060143

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в машиностроении, авиастроении, судостроении широко применяются поликристаллические сплавы алюминия. Прочность чистого алюминия не удовлетворяет современным требованиям промышленности. Поэтому для изготовления изделий, предназначенных для промышленности, применяют не чистый алюминий, а его сплавы. Введение различных легирующих элементов в алюминий существенно изменяет его свойства. Основными легирующими химическими элементами алюминиевых сплавов являются: магний, медь, цинк, кремний. В результате легирования алюминия с одним, двумя и более элементами из числа перечисленных в различных сочетаниях, а также малыми добавками одного или нескольких переходных металлов – марганца, хрома, титана, циркония, никеля, железа, ванадия, – получены и применяются в промышленности более 150 сплавов алюминия. Многие механические, тепловые, электрические свойства этих сплавов изучены достаточно полно. Упругие свойства сплавов изучены не полностью [1, 2]. Одним из таких материалов является поликристаллический сплав алюминия АМг6 с характерными размерами микрокристаллов (гранул) в несколько микрон. Этот сплав относится к системе Al–Mg–Mn (включает до 93.68% алюминия, 5.8–6.8% магния, 0.5–0.8% марганца и прочие примеси) [1, 2]. Он имеет высокие пластические характеристики как при комнатной, так и при повышенных температурах, обладает высокой коррозионной стойкостью в различных средах, в том числе и в морской воде. Это объясняет его широкое применение в судостроении.

Основной задачей работы являлось определение коэффициентов упругости второго и третьего порядков в поликристаллическом сплаве алюминия АМг6. Коэффициенты упругости третьего порядка (КУТП) определяют отклонение от закона Гука и количественно описывают ангармонические свойства кристаллической решетки, такие как тепловое расширение, взаимодействие фононов, высокочастотное поглощение ультразвука; эти коэффициенты позволяют рассчитать анизотропию параметра Грюнайзена [3]. КУТП также используются для анализа взаимодействия акустических волн конечной амплитуды в твердых телах [4–8]. Кроме того, повышенный интерес к исследованию нелинейных свойств материалов вызван тем, что в работах [9, 10] была установлена корреляция между нелинейностью и прочностью не только в конструкционных материалах, но и в кристаллах. Поэтому исследование нелинейных упругих свойств материалов имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение [11, 12]. Для исследования нелинейных свойств разработан ряд экспериментальных методов [5, 13, 14]. Нами для измерения нелинейных упругих свойств поликри-

сталлического сплава АМг6 использовался метод Терстона–Браггера [13].

УПРУГИЕ ВОЛНЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Внутреннюю энергию $E(U_{ij}, S)$ деформированного твердого тела при постоянной энтропии S можно записать в следующем виде [11, 12]:

$$E(U_{ij}, S) = E(0, S) + \frac{1}{2}C_{ijkl}U_{ij}U_{kl} + \frac{1}{6}C_{ijklgr}U_{ij}U_{kl}U_{gr}, \quad (1)$$

где $E(0, S)$ – внутренняя энергия недеформированного твердого тела; $C_{ijkl} = \frac{\partial^2 E}{\partial U_{ij}\partial U_{kl}}$ – коэффициенты упругости второго порядка (КУВП); $C_{ijklgr} = \frac{\partial^3 E}{\partial U_{ij}\partial U_{kl}\partial U_{gr}}$ – КУТП; $U_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial a_j} + \frac{\partial U_j}{\partial a_i} + \frac{\partial U_t}{\partial a_i}\frac{\partial U_t}{\partial a_j}\right)$ – тензор деформации, $i, j, k, l, g, r, t = 1, 2, 3$.

Из уравнения (1) можно получить уравнение состояния твердого тела в квадратичном приближении (нелинейный закон Гука для анизотропного твердого тела):

$$T_{ij} = \frac{\partial E}{\partial U_{ij}} = C_{ijkl}U_{kl} + \frac{1}{2}C_{ijklgr}U_{kl}U_{gr}. \quad (2)$$

Уравнение (2) совместно с уравнением движения

$$\rho_0\frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial a_j} \quad (3)$$

описывает распространение объемных акустических волн (ОАВ) в анизотропных твердых телах, где T_{ij} – тензор механического напряжения; U_{kl} – тензор деформации; ρ_0 – плотность материала; $U_i = x_i - a_i$ – компоненты единичного вектора смещения $\mathbf{U}$; a_i – координаты точки в исходном недеформированном состоянии; x_i – координата точки в данный момент.

В случае распространения ОАВ малой амплитуды в недеформированном твердом теле уравнение (3) имеет вид

$$\rho_0\frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U_k}{\partial a_j \partial a_m}C_{ijkm}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) можно получить выражение, описывающее анизотропию скорости ОАВ малой амплитуды в недеформированном твердом теле:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\rho_0}C_{jrks}U_jU_kN_rN_s}, \quad (5)$$

где ρ_0 – плотность недеформированного материала; U_k, N_r – компоненты единичного вектора смещения $\mathbf{U}$ и волнового вектора $\mathbf{N}$ ОАВ соответственно.

В изотропном твердом теле отличны от нуля 12 КУВП, из которых линейно независимыми являются только два. Из удобства экспериментального определения выбираются, как правило, C_{11} и C_{44}. Остальные являются линейной комбинацией этих двух КУВП [8]:

$$C_{11} = C_{22} = C_{33},$$
$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu,$$
$$C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_{21} = C_{31} = C_{32} = (C_{11} - 2C_{44}) = \lambda,$$

где μ, λ – коэффициенты Ламэ [15]. КУВП и КУТП в дальнейшем будут приводиться в матричном обозначении (нотация Фойгта). В изотропном твердом теле распространяется два типа ОАВ: продольная волна со скоростью V_L и сдвиговая волна со скоростью V_T. Выражения для скоростей этих волн малой амплитуды в изотропном твердом теле, как следует из (5), имеют вид

$$V_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho_0}}, \quad V_T = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12}}{2\rho_0}}. \quad (6)$$

Выражения (6) позволяют рассчитать в изотропных твердых телах КУВП по результатам экспериментально измеренных величин скоростей ОАВ.

В [13] проанализировано распространение ОАВ малой амплитуды в однородно деформированных твердых телах и получена система уравнений, позволяющая по результатам экспериментального измерения зависимости скорости ОАВ малой амплитуды в твердом теле от величины приложенного к нему одноосного сжатия P рассчитать все КУТП в исследуемом образце:

$$\left[\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P}\right]_{P=0} = (2\rho_0 W^2 F + G), \quad (7)$$

где W – "естественная скорость" ОАВ; $F = S^T_{jkab}M_aM_bU_jU_k$; $G = S^T_{ipab}C_{jrksip}U_jU_kN_rN_sM_aM_b$; M_i – компоненты единичного вектора $\mathbf{M}$ в направлении одноосного сжатия.

В изотропном твердом теле имеется 18 отличных от нуля компонент тензора КУТП, но только три коэффициента – $C_{111}, C_{112}, C_{123}$ – считаются независимыми, а остальные являются их линейной комбинацией [16]:

$$C_{111} = C_{222} = C_{333},$$
$$C_{112} = C_{113} = C_{122} = C_{133} = C_{223} = C_{233},$$
$$C_{144} = C_{255} = C_{366} = (C_{122} - C_{123})/2,$$
$$C_{155} = C_{166} = C_{244} = C_{266} = C_{344} = C_{355} = (C_{111} - C_{112})/4,$$
$$C_{456} = (C_{111} - 3C_{112} + 2C_{123}).$$

В первых работах по нелинейной упругости изотропных твердых тел Мурнаган [17] для описания их нелинейных свойств пользовался КУТП l, m, n; Ландау в [18] были введены коэффициенты A, B, C, а в [19] КУТП обозначались как ν_1, ν_2, ν_3. Позже в [13] были определены КУТП для анизотропных кристаллов в матричном виде C_{ilk}. Такое определение КУТП в современной научной литературе считается стандартным. Различие в определении КУТП связано с тем, что в [13, 17–19] разложение внутренней энергии E деформированного твер-

Таблица 1. Соотношения между КУТП в изотропных твердых телах

Murnaghan [17]	Toupin and Bernstein [19]	Standard [13], C_{ijr}
$l = B + C$	$\nu_1 = 2C$	$C_{123} = 2C$ $C_{111} = 2A + 6B + 2C$
$m = A/2 + B$	$\nu_2 = B$	$C_{144} = B$ $C_{112} = 2B + 2C$
$n = A$	$\nu_3 = A/4$	$C_{166} = A/2 + B$

дого тела проводилось по разным переменным. Например, в [17] внутренняя энергия E разлагалась в ряд по компонентам тензора деформации U_{kl}, а в [18] по инвариантам тензора деформации U_{kl}. Однако между КУТП, определенными в [13, 17–19], имеется однозначная связь, которая приведена в табл. 1 [20].

Для определения трех независимых коэффициентов C_{111}, C_{112}, C_{123} в изотропном твердом теле необходимо проведение трех независимых измерений зависимости скорости ОАВ от величины одноосного сжатия P при следующем взаимном расположении единичных векторов **M**, **N**, **U**:

$$\mathbf{N} \parallel \mathbf{U} \perp \mathbf{M},\ \mathbf{N} \perp \mathbf{U} \parallel \mathbf{M},\ \mathbf{N} \perp \mathbf{U} \perp \mathbf{M}.$$

Направление одноосного сжатия при всех измерениях должно быть перпендикулярно направлению распространения упругой волны. Свертки для ρ_0, W^2, F, G в (6) для этих случаев приведены в табл. 2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Ультразвуковые исследования в работе проводились на экспериментальной установке, блок-схема которой приведена на рис. 1. Она состоит из ультразвукового автоматизированного комплекса Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM, работающего в импульсном режиме, и системы для создания контролируемого одноосного сжатия в исследуемом образце. Для наблюдения за серией упругих импульсов в исследуемом образце использовался цифровой осциллограф Infiniti Vision DS07034B.

Для создания контролируемого одноосного сжатия 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. Сила, прикладываемая к образцу домкратом, контролировалось электромеханическим датчиком, который вырабатывал постоянное напряжение, пропорциональное приложенной к образцу силе. Это напряжение передавалось в 12-разрядный АЦП, расположенный в Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM, где оцифровывалось и поступало в персональный компьютер. Измерение скорости упругих волн 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 упругих волн в образце, вызванное приложенным к нему статическим сжатием, определялось соотношением $\Delta V/V = -\Delta\tau/\tau$, где $\Delta\tau$ – изменение времени распространения упругой волны при этом. Комплекс автоматически измеряет изменение фазы акустической волны $\Delta\varphi = 2\pi F\Delta\tau$, связанное с изменением времени ее распространения. Измерение величины $\Delta\varphi$ позволяет определить относительное изменение скорости волны $\Delta V/V = -\Delta\tau/\tau = \Delta\varphi/2\pi F\tau$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ КУВП

Для проведения ультразвуковых измерений было приготовлено два образца из поликристаллического сплава АМг6. Образцы были выполнены из круга промышленного сплава АМг6, соот-

Таблица 2. Свертки $\rho_0 W^2$, F, G для изотропного твердого тела

№	**N**	**U**	**M**	$\rho_0 W^2$	F	G
1	[100]	[100]	[001]	C_{11}	S_{12}	$S_{12}C_{111} + (S_{11} + S_{12})C_{112}$
2	[100]	[010]	[010]	C_{44}	S_{11}	$[(S_{11} + S_{12})C_{111} - 2S_{12}C_{123} + (S_{12} - S_{11})C_{112}]/4$
3	[100]	[010]	[001]	C_{44}	S_{12}	$[S_{12}C_{111} - S_{11}C_{123} - (S_{12} - S_{11})C_{112}]/4$

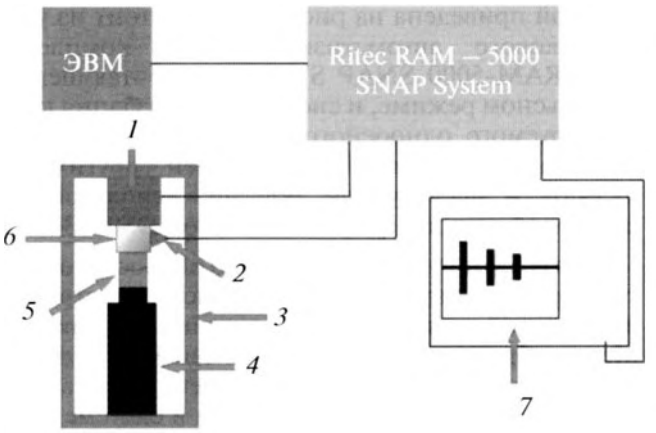

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной ультразвуковой установки для измерения упругих свойств твердых тел: *1* – датчик давления; *2* – пьезоэлектрический преобразователь; *3* – рама; *4* – домкрат; *5* – шарнир; *6* – образец; *7* – осциллограф.

ветствующего ГОСТ 4784-74. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами сторон 20 × 20 × 40 мм. Противоположные грани образца полировались и были строго параллельны. Для возбуждения ОАВ в образцах использовались стандартные пьезоэлектрические преобразователи, используемые в неразрушающем контроле. Измерение скорости продольных волн проводилось на частоте 10 МГц, а сдвиговых волн – на частоте 5 МГц. Ошибка в измерении скоростей ОАВ не превышала 0.5%. Предварительно были измерены плотность ρ_0 и скорости продольных V_L и сдвиговых V_T ОАВ в этом материале. Численные значения скоростей ОАВ в образце, измеренные вдоль трех направлений, параллельных ребрам образца, в пределах ошибок измерений совпали. Это позволило считать наши образцы изотропными. Проведенные измерения скоростей ОАВ и плотности в образцах позволили рассчитать в образцах поликристаллического сплава алюминия АМг6 коэффициенты КУВП C_{11} и C_{44}, коэффициенты податливости S_{11}, S_{12}, модуль Юнга E, коэффициент объемного сжатия B, коэффициент Пуассона σ и параметры Ламэ λ, μ. Значения этих величин приведены в табл. 3.

ИЗМЕРЕНИЕ КУТП В СПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ АМГ6

Для определения трех независимых КУТП методом Терстона–Браггера в образцах сплава алюминия АМг6 были измерены зависимости относительного изменения скорости ($\Delta V/V$) продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия P при различных направлениях единичных векторов **N**, **U** и **M** (рис. 2). Направление распространения упругой волны в образце и направление одноосного сжатия были ортогональны. Для повышения точности определения трех независимых КУТП нами было проведено четыре из-

Таблица 3. Коэффициенты упругости второго порядка в сплаве АМг6

Материал	$C_{ij}\times10^{-10}$, Н/м^2		$S_{ij}\times10^{12}$, м^2/Н		$\mu\times10^{-10}$, Н/м^2	$\lambda\times10^{-10}$, Н/м^2	$E\times10^{-10}$, Н/м^2	$B\times10^{-10}$, Н/м^2	σ	ρ, кг/м^3	Скорость акустических волн, м/с	
	C_{11}	C_{44}	S_{11}	S_{12}							V_L	V_T
АМг6	10.6 ± ± 0.2	2.59 ± ± 0.03	14.2 ± ± 0.2	–4.81 ± ± 0.07	2.59 ± ± 0.03	5.2 ± ± 0.08	7.04 ± ± 0.07	6.92 ± ± 0.06	0.33 ± ± 0.01	2630 ± ± 14	6340 ± ± 30	3140 ± ± 30

Таблица 4. Экспериментальные значения величин $\left(\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P}\right)_{P=0}$ в сплаве алюминия АМг6

№	**N**	**U**	**M**	$\left(\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P}\right)_{P=0}$
1	[100]	[100]	[010]	2.74
2	[100]	[100]	[001]	2.95
3	[100]	[010]	[001]	0.665
4	[100]	[010]	[010]	–3.16

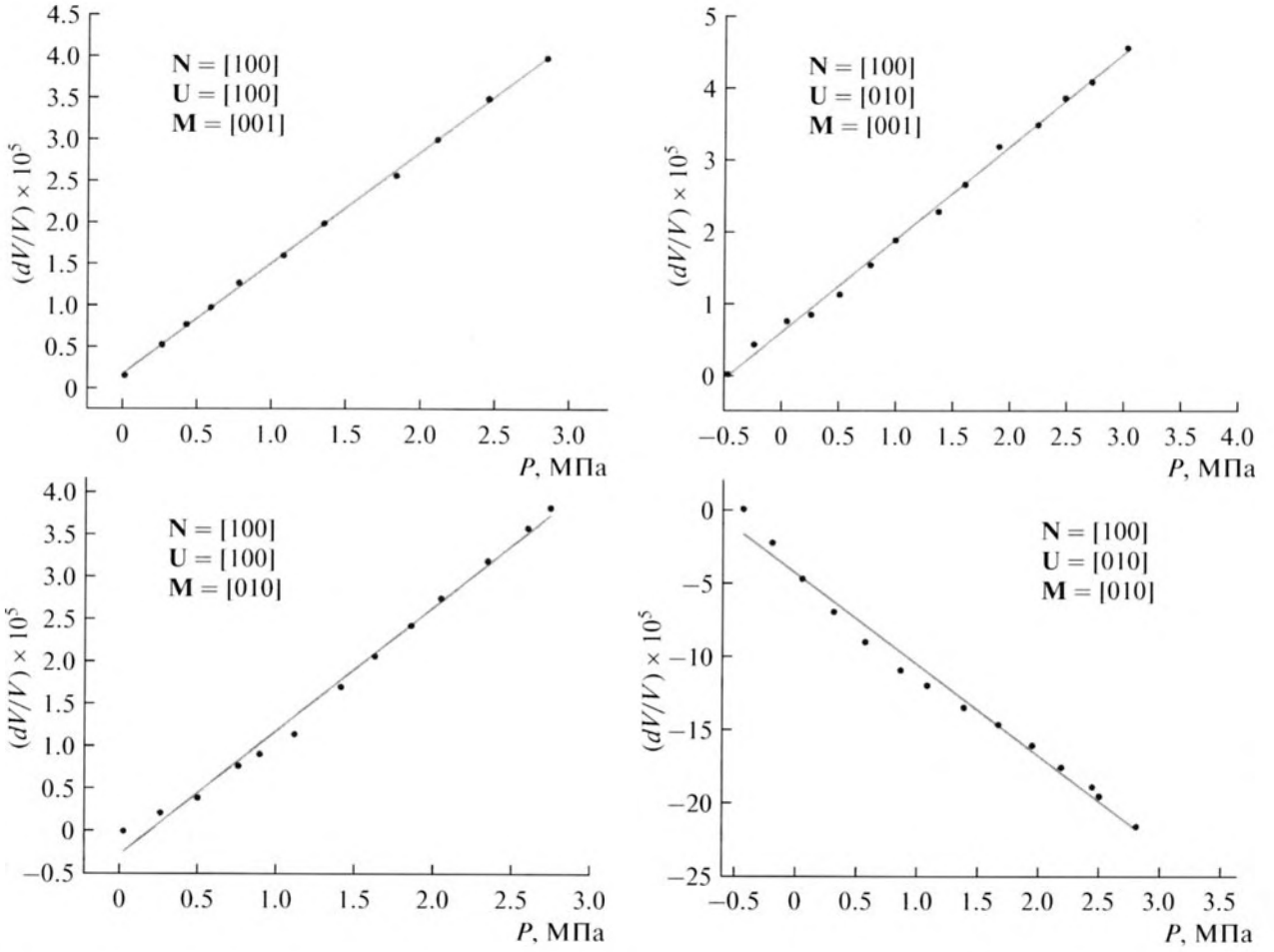

Рис. 2. Зависимости относительного изменения скорости продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия P при различных направлениях единичных векторов **N**, **U** и **M** в АМг6.

мерения зависимости относительного изменения скорости в образце от величины одноосного сжатия P в интервале 0–350 МПа. В этом интервале давлений зависимость скорости ОАВ от величины сжатия P линейна (рис. 2). Экспериментальные зависимости на рис. 2 были аппроксимированы прямой линией, тангенс угла наклона которой равен $\left(\frac{\partial(V)}{V\partial P}\right)_{P=0}$. Проведенные измерения зависимостей скоростей ОАВ от одноосного сжатия позволили определить в сплаве АМг6 значения $\left(\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P}\right)_{P=0} = \left[2\rho_0 V^2\left(\frac{\partial V}{V\partial P}\right)\right]_{P=0}$ для всех случаев возможной взаимной ориентации векторов **M**, **N**, **U** (табл. 4).

На основе экспериментально измеренных величин и соотношений, приведенных в табл. 2–4, была получена система из четырех линейных уравнений для определения трех независимых УПТП в сплаве алюминия АМг6. Эта система была решена на компьютере методом наименьших квадратов, и были определены три независимых КУТП: C_{111}, C_{112}, C_{123} в сплавах алюминия АМг6. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Пользуясь определенными значениями КУТП C_{111}, C_{112}, C_{123} в сплаве АМг6, мы рассчитали коэффициенты упругости третьего порядка l, m, n, ν_1, ν_2, ν_3, A, B, C. Результаты расчетов приведены в табл. 6. Величины погрешностей КУПТ в табл. 6 не превышают 10%.

Таблица 5. Коэффициенты упругости третьего порядка C_{ijk} в сплаве алюминия АМг6 в Н/м^2

Материал	$C_{111}\times10^{-11}$	$C_{112}\times10^{-11}$	$C_{123}\times10^{-11}$
АМг6	-34.2 ± 2.3	-13.1 ± 1.2	-8.6 ± 0.7

Таблица 6. Коэффициенты упругости третьего порядка l, m, n, ν_1, ν_2, ν_3, A, B, C в сплаве АМг6 в 10^{11} Н/м^2

Материал	l	m	n	ν_1	ν_2	ν_3	A	B	C
АМг6	−6.5	−5.3	−6.0	−8.6	−2.3	−1.5	−6.0	−2.3	−4.3

Таблица 7. Коэффициенты упругости третьего порядка C_{ijk} в 10^{11} Н/м^2 в сплавах алюминия АМг6, В95 и Д16

Материал	C_{111}	C_{112}	C_{123}	
АМг6	-34.2 ± 2.3	-13.1 ± 1.2	-8.6 ± 0.7	В наст. работе
В95	-0.9 ± 0.4	1.68 ± 0.25	4.46 ± 0.15	[21]
Д16	-2.96 ± 0.1	-0.92 ± 0.3	2.38 ± 0.3	[22]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В поликристаллическом сплаве алюминия АМг6 ультразвуковым методом измерены все независимые КУВП. Были проведены измерения зависимости скорости сдвиговых и продольных ОАВ в зависимости от одноосного сжатия. Эти измерения с использованием соотношений Терстона–Браггера позволили определить в АМг6 все независимые КУТП C_{ijk}. Численные значения этих величин позволили рассчитать альтернативные КУТП в изотропном сплаве АМг6: l, m, n, ν_1, ν_2, ν_3, A, B, C, с помощью которых также можно изучать нелинейные взаимодействия ОАВ в сплаве АМг6. Анализ приведенных в [1, 2] коэффициентов упругости второго порядка в различных сплавах алюминия показывает, что величины этих коэффициентов в пределах ошибки в 15–20%, как правило, совпадают. В [21, 22] были определены КУВП (в 10^{10} Н/м^2) сплава В95 (система Al–Zn–Mg–Cu), $C_{11} = 10.2$, $C_{44} = 2.4210$ и сплава Д16 (Al–Cu–Mg), $C_{11} = 13.5$; $C_{44} = 2.76$. Также в этих работах были измерены КУТП данных сплавов, которые приведены в табл. 7. Анализ величин КУВП показывает, что их различие в сплавах АМг6, В95 и Д16 не превышает 30% для C_{11}, и 10% для C_{44}. Однако значения КУТП в сплавах АМг6, В95 и Д16 различаются в разы или даже в десятки раз (таблица 7). Так, например, величина коэффициента C_{111} в сплаве В95 более чем в три раза меньше коэффициента C_{111} в сплаве Д16, и почти в 20 раз меньше коэффициента C_{111} в сплаве АМг6. Это указывает на то, что КУТП более чувствительны к химическому составу, структуре, стехиометрии материала, чем КУВП.

Образцы для измерений были приготовлены в рамках соглашения № 14.583.21.0005 от 22.08.2014 г. (Проект ID RFMEFI58314X0005). Измерения КУВП и КУТП были выполнены за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 14-22-000420).

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. *Такер Д., Рэмптон В.* Гиперзвук в физике твердого тела. М.: Мир, 1975.
4. *Ермилин К.К., Лямов В.Е., Прохоров В.М.* Поляризационные эффекты в линейной и нелинейной кристаллоакустике (Обзор) // Акуст. журн. 1979. Т. 25. С. 161–179.
5. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
6. *Гольдберг З.А.* Взаимодействие одномерных акустических стоячих волн в твердом теле // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 1. С. 73–78.
7. *Красильников В.А.* Нелинейная акустика конденсированных сред: история и развитие // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 3. С. 423–430.
8. *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.
9. *Зарембо Л.К., Красильников В.А., Румянцева В.А., Сердобольская О.Ю.* Акустическое исследование предела прочности монокристалла триглицинсульфата в области фазового перехода // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 5. С. 784–789.
10. *Зарембо Л. К., Красильников В. А., Школьник И.Е.* К вопросу о нелинейной акустической дефектоскопии хрупких неоднородных материалов и оценки их прочности // Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 76–83.
11. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нели-

нейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176. С. 77.

12. *Руденко О.В.* Нелинейные методы акустической диагностики // Дефектоскопия. 1993. № 8. С. 24–32.
13. *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.
14. *Breazeale M.A., Philip J.* Determination of third-order elastic constants from ultrasonic harmonic generation measurements in physical acoustics. Ed. by Mason W.P. and Turston R.N. New York: Academic Press, 1980. № 18. P. 1–60.
15. *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982.
16. *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллоакустики. М.: Наука, 1975. 680 с.
17. *Murnaghan F.D.* Finite Deformations of an Elastic Solid. New York: Chapman & Hall, 1951.
18. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953.
19. *Toupin R.A., Bernstein B.* Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect // J. Acoust. Soc. Am. 1961. V. 33. P. 216–225.
20. *Norris A.* Finite amplitude waves in solids / Nonlinear Acoustics. Ed. by Hamilton M.F., Blackstock D.T. Chap. 9. San Diego: Academic Press, 1998. P. 263–277.
21. *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.
22. *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.