

07,01

## Зависимость от давления коэффициентов упругости алюминий-магниевого сплава AMg6 и нанокompозитного сплава $n$ -Mg6/C<sub>60</sub>

© В.М. Прохоров<sup>1</sup>, Е.Л. Громницкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Институт физики высоких давлений РАН, Москва, Троицк, Россия

E-mail: pvm@tisnum.ru

(Поступила в Редакцию 31 октября 2017 г.)

Приведены результаты измерений ультразвуковым методом зависимости коэффициентов упругости второго порядка поликристаллического алюминий-магниевого сплава AMg6 и приготовленного на его основе нанокompозита  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub> от гидростатического давления до 1.6 ГПа. Ультразвуковые измерения были проведены на пьезометрической установке высокого давления типа поршень–цилиндр. Установленные в работе значения производных по давлению коэффициентов упругости второго порядка сравнивались с рассчитанными по значениям коэффициентов упругости третьего порядка, которые были ранее определены методом Терстона–Браггера. С привлечением литературных данных установлены зависимости производных по давлению коэффициентов упругости второго порядка сплава AMg6 от содержания Mg и наноструктурирования.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов“ (ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ), поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.593.21.0007 от 28.08.2017, ID RFMEFI59317X0007.

DOI: 10.21883/FTT.2018.04.45690.300

### 1. Введение

Линейные упругие характеристики, определяемые коэффициентами упругости второго порядка  $C_{ijkl}$  (КУВП), и нелинейные упругие характеристики, определяемые коэффициентами упругости третьего порядка  $C_{ijkqr}$  (КУТП) и производными по давлению КУВП — это важные физические параметры материалов. КУВП служат параметрами линейной зависимости деформации от напряжения в твердом теле, описываемой законом Гука. КУТП являются коэффициентами разложения упругой энергии при деформации в третьей степени и отражают отклонения от линейной зависимости закона Гука. КУТП 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 и как диагностический параметр несовершенства (дефектности) структуры твердых тел [1,2]. Производная по давлению объемного модуля упругости — важный параметр уравнения состояния твердого тела. Производные по давлению КУВП могут быть выражены через КУТП и определены непосредственно и с хорошей точностью, путем измерения зависимости КУВП от давления.

Широко распространенный литой поликристаллический сплав алюминия AMg6 принадлежит к си-

стеме Al–Mg–Mn (включает: до 93.68% алюминия, 5.8–Z6.8% магния, 0.5–0.8% марганца и прочие примеси) и относится к наиболее прочным сплавам системы алюминий–магний [3,4]. Он характеризуется высокой технологической пластичностью, а также относительно высокими пределом прочности ( $\sigma_b = 110–310$  МПа) и текучести ( $\sigma_{0.2} = 40–160$  МПа), по сравнению с другими алюминиевыми сплавами в отожженном состоянии. Его высокие характеристики пластичности, как при комнатной, так и при повышенных температурах, высокая коррозионная стойкость в различных средах, в том числе и в морской воде, объясняют широкое применение этого сплава в различных областях промышленности. Сплавы этого семейства могут упрочняться только холодной пластической деформацией.

### 2. Постановка задачи

Механические и нелинейные упругие характеристики сплава AMg6 исследованы в ряде недавних работ [5–9], в которых также изучалось влияние наноструктурирования сплава на эти характеристики. Было установлено, что значения КУТП в сплаве AMg6 и его нанокompозите  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>, отличаются в разы или даже в десятки раз. Так, например, величина коэффициента  $C_{111}$  в сплаве AMg6 примерно в полтора раза больше величины этого коэффициента в образцах нанокompозитного сплава  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>. Это указывает на то, что КУТП более

**Таблица 1.** Усредненные значения КУТП сплава AMg6 и нанокompозита *n*-AMg6/C<sub>60</sub> (в GPa)

Alloys	$C_{111} (\pm 240)$	$C_{112} (\pm 120)$	$C_{123} (\pm 70)$	$\nu_1 = C_{123} (\pm 70)$	$\nu_2 = C_{144} (\pm 20)$	$\nu_3 = C_{456} (\pm 10)$
AMg6	-3420	-1310	-860	-860	-230	-150
<i>n</i> -AMg6/C <sub>60</sub>	-2770	-980	-680	-680	-150	-150

чувствительны к химическому составу, структуре, стехиометрии материала, чем КУВП, а наноструктурирование материала приводит к значительным изменениям как пределов прочности и текучести, так и нелинейных упругих характеристик — КУТП и нелинейного акустического параметра [8–9].

Изотропное твердое тело характеризуется двумя независимыми КУВП —  $C_{11}$  и  $C_{44}$  (или модулями Ламе  $\lambda = C_{11} - 2C_{44}$  и  $\mu = C_{44}$ ) и тремя КУТП —  $C_{111}$ ,  $C_{112}$  и  $C_{123}$  (или модулями третьего порядка  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ) [10]. Остальные КУВП и КУТП изотропного твердого тела выражаются через эти независимые коэффициенты упругости.

Экспериментально КУВП определяются, в большинстве случаев, путем измерений скоростей продольных и сдвиговых объемных акустических волн (ОАВ), а КУТП по измерениям зависимости скоростей ОАВ от гидростатического сжатия (давления) и/или одноосного сжатия. В экспериментах по гидростатическому сжатию непосредственно определяются производные по давлению КУВП:  $\partial C_{11}/\partial P$  и  $\partial C_{44}/\partial P$ . Для вычисления 3-х независимых КУТП измерения в гидростатических условиях необходимо дополнить измерениями в условиях одноосного сжатия. С другой стороны, для определения трех независимых КУТП  $C_{111}$ ,  $C_{112}$ ,  $C_{123}$  в изотропном твердом теле достаточно проведение трех независимых измерений зависимости скоростей ОАВ от величины одноосного сжатия  $P$  при следующем взаимном расположении единичных векторов  $\mathbf{M}$  (вектор направления одноосного сжатия),  $\mathbf{N}$  (вектор направления распространения ОАВ) и  $\mathbf{U}$  (вектор поляризации ОАВ):

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

Направление одноосного сжатия при всех измерениях должно быть перпендикулярно направлению распространения упругой волны [11]. Для повышения точности измерений часто проводятся измерения для более чем трех комбинаций направлений единичных векторов  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{U}$ .

В [9] для определения трех независимых КУТП методом Терстона–Браггера [10], в образцах исследуемых материалов были измерены зависимости относительного изменения скорости ( $\Delta V/V$ ) продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия  $P$  (до 3 и 6 МПа, соответственно) при различных направлениях единичных векторов  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{M}$ . Результаты этих измерений воспроизведены в табл. 1.

Для верификации установленных в [9] значений для КУТП сплавов AMg6 и *n*-AMg6/C<sub>60</sub> мы, в данной работе, провели измерения зависимости скоростей продольной и

сдвиговой ОАВ от гидростатического давления, что дало возможность напрямую определить производные по давлению КУВП и сравнить их значения с рассчитанными по значениям КУТП, представленными в табл. 1.

### 3. Производные по давлению КУВП

Для расчетов производных по давлению КУВП использовались соотношения, полученные в [12], в виде

$$-3V\partial C_{11}/\partial P = C_{11} + C_{111} + 2C_{112};$$

$$-3V\partial C_{12}/\partial P = C_{12} + C_{123} + 2C_{112};$$

$$-3V\partial C_{44}/\partial P = C_{44} + C_{144} + 2C_{166};$$

$$\partial B/\partial P = (\partial C_{11}/\partial P - 4/3\partial C_{44}/\partial P)$$

$$= -(C_{11} + 2C_{12} + C_{111} + 6C_{112} + 2C_{123})/9V, \quad (1)$$

где  $B = (C_{11} + 2C_{12})/3$  — объемный модуль,  $C_{166} = (C_{111} - C_{112})/4$ ,  $C_{144} = (C_{112} - C_{123})/2$ .

Также, производные по давлению КУВП можно выразить через модули второго и третьего порядков, согласно [10]

$$-B\partial B/\partial P = (\nu_1 + 2\nu_2 + 8/9\nu_3),$$

$$-B\partial C_{44}/\partial P = (\nu_2 + 4/3\nu_3 + \lambda + \mu).$$

Результаты расчетов производных по давлению КУВП сплавов AMg6 и *n*-AMg6/C<sub>60</sub> по формулам (1), на основе данных табл. 1, представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наноструктурирование приводит к снижению рассчитанных из КУТП значений производных по давлению. Это обусловлено снижением значений КУТП в этих материалах. (Как отмечалось в [8,9], и, как следует из анализа литературных данных, значения КУВП в алюминиевых сплавах, принадлежащих к одному семейству, отличаются незначительно и не зависят от наноструктурирования). Рассчитанные значения производных по давлению КУВП из полученных в [9] экспериментальных значениях КУТП для поликристаллического сплава алюминия AMg6 и нанокompозитного сплава *n*-AMg6/C<sub>60</sub>, заметно превосходят значения

**Таблица 2.** Значения производных по давлению КУВП сплавов AMg6 и *n*-AMg6/C<sub>60</sub>, рассчитанные из значений КУТП

Материал	$\partial C_{11}/\partial P$	$\partial B/\partial P$	$\partial C_{44}/\partial P$
AMg6	27.4	20.7	5.0
<i>n</i> -AMg6/C <sub>60</sub>	22	16.7	4.1

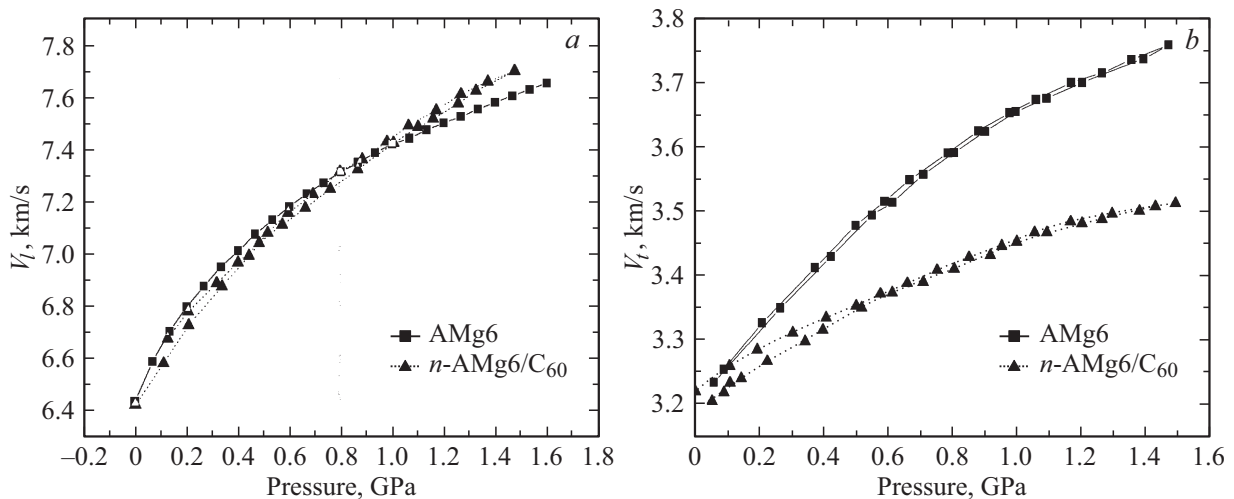


Рис. 1. Зависимости от давлений продольной  $V_l$  (a) и поперечной  $V_t$  (b) скоростей упругих волн в сплавах AMg6 и  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>.

литературных и табличных данных для других алюминиевых сплавов [13]. Поэтому возникла необходимость верификации определенных методом Терстона–Браггера значений КУТП для сплавов AMg6 и  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>.

#### 4. Образцы, методики и результаты исследований

В работе [9] детально описан метод приготовления образцов нанокompозита  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>. В качестве исходного материала для получения нанокompозита применялся поликристаллический промышленный сплав алюминия AMg6, соответствующий ГОСТ 4784-74. Нанокompозитный алюминиевый сплав получен путем совместного 24-часового размола в шаровой мельнице стружки исходного материала и фуллерита C<sub>60</sub> с последующей консолидацией порошковой смеси методом горячей экструзии.

Из проведенного сравнения значений производных по давлению КУВП для сплавов семейства Al–Mg, видна зависимость этих значений от содержания Mg в сплаве. Для более точного определения содержания Mg в исследуемых сплавах AMg6 и  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub> мы провели измерения элементного (химического) состава образцов методом дисперсионной рентгеновской спектроскопии, с использованием электронного сканирующего микроскопа JEM 7600F с приставками для энерго-дисперсионного и волнового анализа (EDS и WDS) характеристических спектров химических элементов.

Химический состав исходного сплава AMg6 и нанокompозитного  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub> представлен в табл. 3. Снижение процентного содержания Mg в  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub> произошло, вероятно, за счет увеличения процентного содержания углерода при формировании нанокompозита  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>.

Измерения зависимостей скоростей ОАВ в образцах сплавов AMg6 и  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub> были проведены ультра-

звуковым методом на пьезометрической установке типа „поршень–цилиндр“ с системой регистрации прошедших и отраженных ультразвуковых сигналов на базе платформы PXI (National Instruments) [14]. Измерения длины пути, проходимого УЗ сигналами измерялись с погрешностью 0.005 mm. Погрешность определения объема образца под давлением составляла несколько процентов. Измерения изменений времени пробега ультразвуковых импульсов продольных ОАВ на частоте 10 MHz и сдвиговых ОАВ на частоте 5 MHz осуществлялось с погрешностью  $\pm 0.001 \mu s$ . Погрешность определения давления составила 0.03 GPa. Специальные эксперименты были проведены с целью коррекции данных на деформацию камеры с изменением давления и температуры.

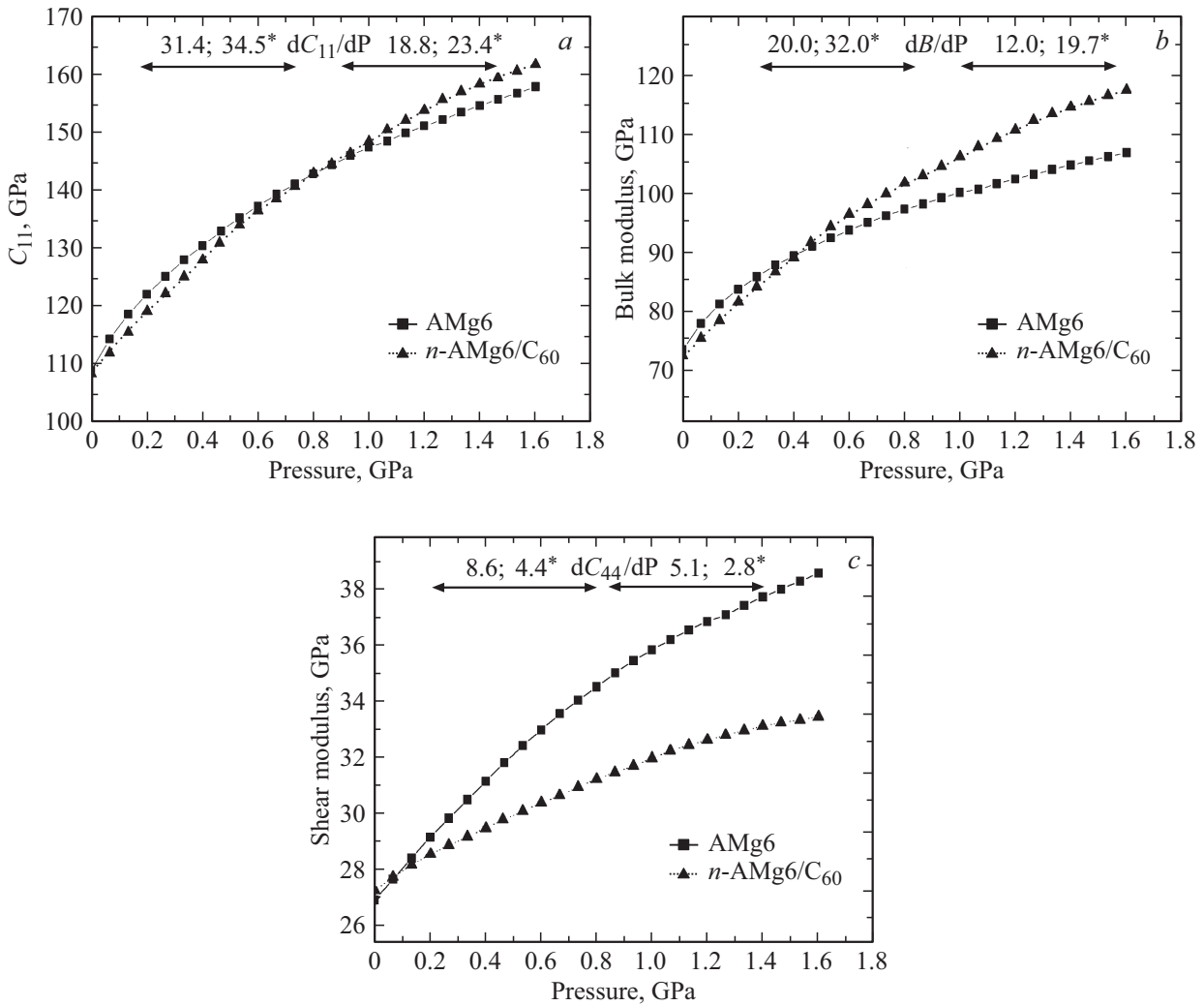
Полученные зависимости скоростей продольных и сдвиговых ОАВ и КУВП от давления представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Прежде всего, отметим заметный нелинейный характер зависимостей КУВП от давления. Вероятно, это обусловлено особенностями микроструктуры образцов и генерации давления в камере в начальном диапазоне давлений. Расчеты производных по давлению КУВП проводились для двух диапазонов давления 0.2–0.8 и 0.8–1.6 GPa.

На рис. 2 два отрезка со стрелками в верхней части графиков указывают диапазоны давлений, для которых определены производные по давлению упругих модулей образцов сплавов AMg6 и  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>, а над отрезками приведены их значения.

Таблица 3. Химический состав сплавов AMg6 и  $n$ -AMg6/C<sub>60</sub>

Alloys	Chemical composition, at.%					
	Al	Mg	Mn	O	C	Total
AMg6	62.09	6.78	0.18	1.22	29.66	99.93
$n$ -AMg6/C <sub>60</sub>	60.63	6.31	0.26	1.35	31.38	99.93



**Рис. 2.** Зависимости от давления КУВП в сплавах AMg6 и n-AMg6/c60. Отрезки в верхней части графиков указывают диапазон давлений, в котором определены производные по давлению, их значения для AMg6 и n-AMg6/c60 (\*) указаны над отрезками.

Установленные значения производных по давлению КУВП значительно превосходят известные из литературы данные для алюминиевых сплавов. Согласно этим данным, наибольшими значениями производных обладают алюминиевые сплавы, содержащие магний. В [15] были экспериментально, методом Терстона–Браггера, определены КУТП и рассчитаны производные по давлению модулей упругости алюминиевых сплавов D54S (Mg-4.5%, Mn-0.8%, Cr-0.1%) и B53S (Mg-2.8%, Mn-0.8%, Cr-0.1%). Сравнение полученных в настоящей работе и известных из литературы данных, приведенных в табл. 4, указывает на наличие зависимости производных по давлению КУВП Mg-содержащих алюминиевых сплавов от концентрации Mg в сплаве. С привлечением наших данных видно, что эти производные по давлению КУВП монотонно возрастают с увеличением содержания Mg в сплаве, по крайней мере до концентрации Mg примерно в 6 at.%. Для исследованных в настоящей работе сплавов в табл. 4 приведены средние, по двум

диапазонам давлений, значения производных по давлению КУВП, а в скобках даны значения, установленные на более линейном участке: в диапазоне давлений 0.8–1.6 GPa. Рассчитанные через КУТП и измеренные в данной работе производные хорошо согласуются между собой.

**Таблица 4.** Производные по давлению КУВП Mg-содержащих алюминиевых сплавов

Alloys	Mg (at.%)	$\partial C_{11}/\partial P$	$\partial B/\partial P$	$\partial C_{44}/\partial P$	Источник
AMg6	6.78	27.4	20.7	5.0	[9]
AMg6	6.78	25.1 (18.8)	16.0 (12.0)	6.8 (5.1)	В наст. работе
n-AMg6	6.31	22	16.7	4.1	[9]
n-AMg6	6.31	30.65 (23.4)	25.8 (19.7)	3.6 (2.8)	В наст. работе
D54S	4.5	18.4	12.8	3.5	[14]
B53S	2.8	9.7	6.0	2.1	[14]

Анализ полученных данных указывает, что наноструктурирование приводит к закономерному снижению  $\partial C_{44}/\partial P$ . Для  $\partial C_{11}/\partial P$  и  $\partial B/\partial P$  такая закономерность отсутствует и наблюдается значительный разброс значений в обоих диапазонах давлений. Этот результат согласуется с выводами работы [15], согласно которым, для алюминиевых сплавов характерен значительно более широкий разброс значений производных по давлению объемного модуля  $\partial B/\partial P$ , чем разброс значений  $\partial C_{44}/\partial P$ , что обусловлено предысторией изготовления и обработки этих сплавов.

Заметим, что в [9] КУТП измерялись при одноосном давлении до 6 МПа, а в [15] до 150 МПа. Как видно из рис. 2, при малом гидростатическом давлении ( $< 200$  МПа) производные по давлению  $\partial C_{11}/\partial P$  и  $\partial B/\partial P$  для *n*-АМг6 меньше, чем для АМг6/С60.

## 5. Заключение

Производные по давлению КУВП в алюминиевом сплаве АМг6 и нанокompозите *n*-АМг6/С60 определены экспериментально с использованием пьезометрической установки высокого давления типа поршень–цилиндр. Измерялись зависимости от давления до 1.6 ГПа скоростей продольных и сдвиговых упругих волн, а также плотности образцов, и рассчитывались зависимости от давления КУВП. Установлен нелинейный вид зависимости КУВП от давления. Производные по давлению КУВП вычислялись в диапазонах давлений 0.2–0.8 и 0.8–1.6 ГПа. Полученные данные сравнивались с рассчитанными для данных материалов по значениям КУТП и данными, известными из литературы для Mg-содержащих алюминиевых сплавов. Полученные результаты хорошо согласуются между собой, что указывает на корректность определения КУТП методом Терстона–Браггера. Установлено, что производные по давлению КУВП Mg-содержащих алюминиевых сплавов монотонно возрастают с увеличением концентрации магния. Наноструктурирование сплава АМг6 приводит к снижению значения производной по давлению модуля сдвига ( $G = C_{44}$ ) при незначительных изменениях производных по давлению продольного ( $C_{11}$ ) и объемного ( $B$ ) модулей.

## Список литературы

- [1] Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. Введение в нелинейную акустику. Наука, М. (1966). 519 с.
- [2] О.В. Руденко. УФН **176**, 77 (2006).
- [3] Конструкционные материалы. Справочник / Под ред. Б.Н. Арзамасова. Машиностроение, М. (1990). 688 с.
- [4] Физические величины. Справочник / Под ред. Е.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Энергоатомиздат, М. (1991). 1232 с.
- [5] А.И. Коробов, В.М. Прохоров, Д.М. Мехедов. ФТТ **55**, 10 (2013).
- [6] А.Д. Волков, А.И. Кокшайский, А.И. Коробов, В.М. Прохоров. Акуст. журн. **61**, 685 (2015).
- [7] N. Lvova, I. Evdokimov, S. Perfilov. Adv. Mater. Res. **1119**, 9 (2015).
- [8] V. Prokhorov, A. Korobov, A. Kokshaiskii, S. Perfilov, A. Volkov. AIP Conf. Proc. **1685**, 080008, (2015).
- [9] А.И. Коробов, А.И. Кокшайский, В.М. Прохоров, И.А. Евдокимов, С.А. Перфилов, А.Д. Волков. ФТТ **58**, 2384 (2016).
- [10] R.N. Thurston, K. Brugger. Phys. Rev. **133**. PA1604 (1964).
- [11] В.Д. Бланк, В.М. Прохоров, Б.П. Сорокин, Г.М. Квашнин, А.В. Теличко, Г.И. Гордеев. ФТТ **56**, 1523 (2014).
- [12] D.C. Wallace. In: Solid State Physics / Ed. by H. Ehrenreich, F. Seitz, D. Turnbull. Academic, N. Y. (1970), Vol. 25, 301 p.
- [13] И.Н. Францевич, Ф.Ф. Воронов, С.А. Бакута. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Наук. думка, Киев (1982). 288 с.
- [14] O.V. Stal'gorova, E.L. Gromnitskaya, D.R. Dmitriev, F.F. Voronov. Instrum. Exp. Techn. **39**, 880 (1996).
- [15] R.T. Smith, R. Stern, R.W.B. Stephens. J. Acoust. Soc. Am. **40**. 1002. (1966).