

01

Упругие постоянные второго и третьего порядков алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз

© А.И. Коробов¹, В.М. Прохоров², Д.М. Мехедов¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Троицк, Московская обл., Россия

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

(Поступила в Редакцию 4 апреля 2012 г.
В окончательной редакции 7 июня 2012 г.)

Определены все независимые упругие постоянные второго и третьего порядков в алюминиевом сплаве В95 и композите В95/наноалмаз. Для определения упругих постоянных второго порядка измерены плотности и скорости продольных и сдвиговых объемных акустических волн в исследуемых материалах. Для количественной характеристики нелинейных упругих свойств определены упругие постоянные третьего порядка (УППП) сплава В95 и композита В95/наноалмаз. Для экспериментального определения УППП использован метод Терстона–Браггера. Для этого в исследуемых образцах экспериментально измерены относительные изменения скорости объемных волн в зависимости от приложенного к образцу одноосного сжатия и рассчитаны все независимые УППП. Скорости упругих волн измерялись ультразвуковым импульсным методом на частоте 10 МГц. Приводится обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ НШ-2631.2012.2, гранта Правительства РФ № 11.G34.31.0066, гранта РФФИ № 11-02-00277-а и госконтракта Минобрнауки РФ № 16.552.11.7014.

1. Введение

Для описания нелинейных упругих свойств твердых тел используются упругие постоянные третьего порядка (УППП). УППП описывают отклонение от закона Гука и определяют ангармонические свойства кристаллической решетки, такие как тепловое расширение, высокочастотное затухание ультразвука. Они также используются для анализа взаимодействия акустических волн в твердых телах [1]. Для измерения УППП разработан ряд экспериментальных методов [2,3]. Одновременно с экспериментальными методами для оценки величин УППП используются теоретические расчеты [4]. Нами для определения УППП использовался квазистатический метод Терстона–Браггера [3]. В последнее время появилось большое количество конструкционных материалов, в том числе композитов, нелинейные упругие свойства которых полностью не изучены. Повышенный интерес к исследованию нелинейных свойств конструкционных материалов вызван тем, что в работе [5] была установлена заметная корреляция между нелинейностью и прочностью таких материалов. Поэтому исследование нелинейных упругих свойств материалов имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение [6–7].

Настоящая работа посвящена исследованию линейных и нелинейных упругих свойств конструкционных материалов: четырехкомпонентного (Al–Zn–Mg–Cu) алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз с наночастицами алмаза детонационного синтеза в качестве армирующей добавки.

2. Экспериментальная методика и материалы

Скорости V объемных акустических волн (ОАВ) малой амплитуды в твердых телах произвольной симметрии определяются через упругие постоянные второго порядка (УПВП) [8]:

$$V^2 = \frac{1}{\rho_0} C_{j_r k_s} U_j U_k N_r N_s, \quad (1)$$

где ρ_0 — плотность недеформированного материала, $C_{j_r k_s}$ — УПВП, U_k , N_r — компоненты единичного вектора смещения \mathbf{U} и волнового вектора \mathbf{N} ОАВ. Выражение (1) позволяет по результатам экспериментально измеренных скоростей акустических волн рассчитать УПВП в твердых телах. В изотропном твердом теле отличны от нуля 12 УПВП, из которых линейно независимыми являются только две: C_{11} и C_{44} . Остальные являются линейной комбинацией этих двух УПВП [8]. Для изотропного твердого тела из (1) следует $\rho_0 V_L^2 = C_{11}$, $\rho_0 V_T^2 = C_{44}$.

Для определения УППП, как уже отмечалось ранее, нами использовался квазистатический метод Терстона–Браггера [3], заключающийся в измерении зависимости скорости ОАВ в твердом теле от величины приложенного к нему одноосного сжатия P :

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

где ρ_0 — плотность среды при $P = 0$; W — „естественная скорость“ акустической волны; $G = S_{i_p a b} C_{j_r k_s i_p} u_j u_k N_r N_s M_a M_b$; $S_{i_p a b}$ — компоненты

тензора упругой податливости; C_{ijklqr} — УППП; $\rho_0 W^2 = C_{j r k s}^S U_j U_k N_r N_s$; $F = S_{j k a b}^T M_a M_b U_j U_k$; $C_{j r k s}$ — компоненты тензора адиабатических УПВП; U_i, N_r — компоненты единичного вектора смещения \mathbf{U} и волнового вектора \mathbf{N} ОАВ; M_i — компоненты единичного вектора \mathbf{M} в направлении одноосного сжатия. В изотропном твердом теле отличны от нуля 18 УППП. При этом три коэффициента $C_{111}, C_{112}, C_{123}$ считаются независимыми, а остальные являются их линейной комбинацией [9]

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

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

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

Свертки $\rho_0 W^2, F, G$ (2) для этих случаев приведены в табл. 1.

В качестве материалов для исследования нами использовались образцы четырехкомпонентного (Al–Zn–Mg–Cu) алюминиевого сплава В95 и композит В95/наноалмаз — сплав В95 с наночастицами алмаза детонационного синтеза в объеме 0.1 wt.%. Образцы композита В95/наноалмаз были приготовлены прямым расплавлением промышленного сплава В95 при $T_m \approx 1000$ К, введением нанопорошка алмаза в расплав, перемешиванием расплава с помощью Ag-барботирования с последующим охлаждением расплава в режиме выключенной печи.

Порошок наноалмаза был получен в результате детонационного синтеза, его характеристики приведены в [10].

Предварительно полученные образцы композита В95/наноалмаз были исследованы с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

Таблица 1. Свертки $\rho_0 W^2, F, G$ для изотропного твердого тела

| N_q п/п | \mathbf{N} | \mathbf{U} | \mathbf{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} | $[S_{12}C_{111} - S_{11}C_{123} - (S_{12} - S_{11})C_{112}]/4$ |

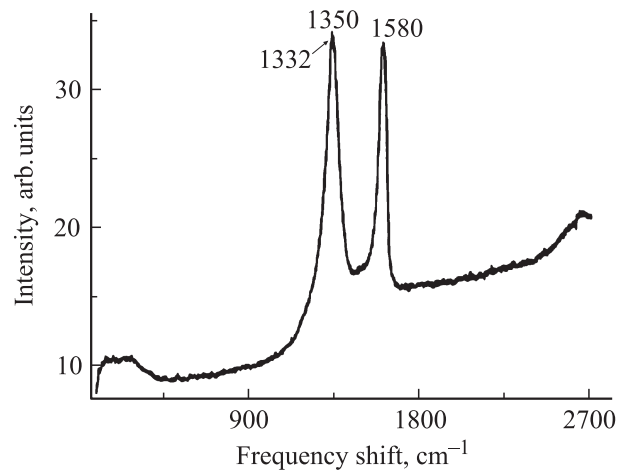


Рис. 1. Спектр резонансной рамановской спектроскопии в образце нанокомпозита В95/наноалмаз.

В спектре обнаружены линии алмаза 1332 cm^{-1} и линии в области 1350 cm^{-1} (D -линия графита) и 1580 cm^{-1} (G -линия графита). Линии D и G сравнительно узкие и имеют одинаковую интенсивность, что указывает на наличие нанокластеров углерода (алмаза) в образце (рис. 1). В [11] были проведены детальные исследования фазового превращения наноалмаза в графит при отжиге в интервале температур от 720 до 1400 К, которые показали, что в этом интервале температур отжига алмазная структура в наночастицах алмаза детонационного синтеза сохраняется. Зарождение графитовой фазы наблюдалось только при температуре отжига более 1200 К. Наши КРС-исследования композита, в который наноалмаз вводился при температуре ~ 1000 К, подтверждают сохранение алмазной фазы в наночастицах композита.

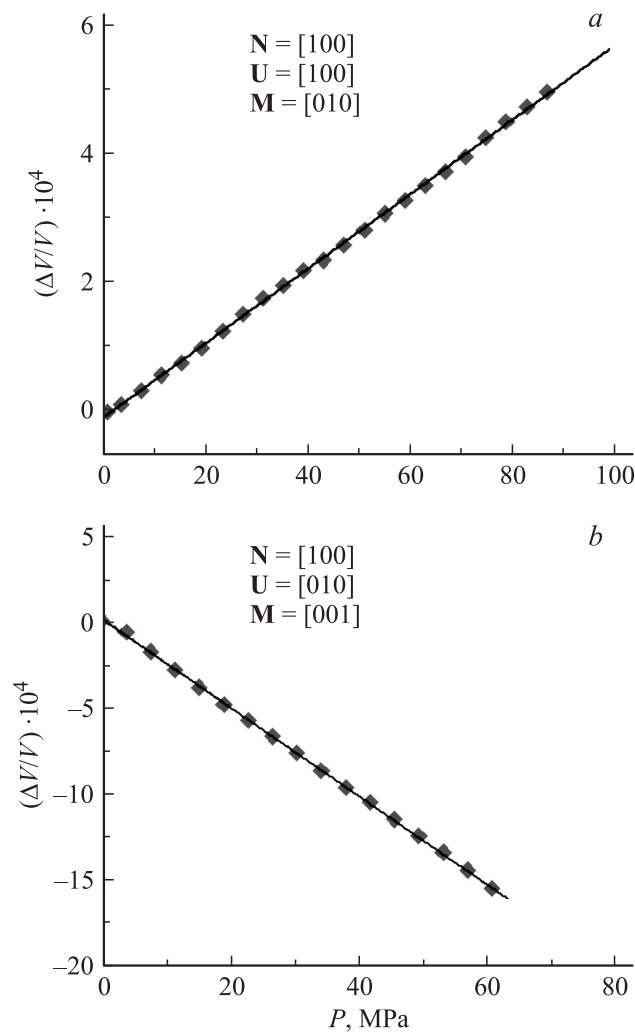
3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проведения ультразвуковых измерений из исходных материалов сплава В95 и композита В95/наноалмаз были вырезаны образцы в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами ребер $10 \times 12 \times 50 \text{ mm}$. Противоположные грани образцов полировались и были строго параллельны друг другу. Предварительно нами были измерены плотность ρ_0 и скорости продольных V_L и сдвиговых V_T ОАВ в этих материалах. Численные значения скоростей ОАВ в образцах, измеренные вдоль трех направлений, параллельных их ребрам, в пределах ошибок измерений совпали. Это позволило считать наши образцы изотропными. Все измерения были выполнены на автоматизированной экспериментальной ультразвуковой установке Ritec RAM-5000 (США), в которой реализован импульсный метод измерений [12]. Измерение скоростей ОАВ в образцах и их изменения при приложении давления одноосного сжатия проводилось на частоте 10 МГц. Ошибка измерений абсолютных зна-

Таблица 2. Коэффициенты упругости второго порядка в сплавах В95 и В95/наноалмаз

| Материал | $C_{ij} \cdot 10^{-10}$, N/m ² | | $S_{ij} \cdot 10^{12}$, m ² /N | | $E \cdot 10^{-10}$, N/m ² | $B \cdot 10^{-10}$, N/m ² | σ | ρ_0 , kg/m ³ | Скорости упругих волн, м/с | |
|---------------|---|----------|---|----------|--|--|----------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|
| | C_{11} | C_{44} | S_{11} | S_{12} | | | | | V_L | V_T |
| В95 | 10.2 | 2.42 | 15.4 | -5.28 | 8.21 | 6.97 | 0.34 | 2700 | 6140 ± 60 | 3000 ± 30 |
| В95/наноалмаз | 10.3 | 2.61 | 14.4 | -4.74 | 8.98 | 6.82 | 0.33 | 2810 | 6040 ± 60 | 3050 ± 30 |

чений скоростей ОАВ не превышала 1–2%. Установленные значения скоростей продольных V_L и сдвиговых V_T ОАВ позволили в приближении изотропного твердого тела рассчитать УППП C_{ij} , модули податливости второго порядка S_{ij} , модуль Юнга E , модуль объемного сжатия B и коэффициент Пуассона σ в образцах сплава В95 и композита В95/наноалмаз. Ошибки в определении этих коэффициентов не превышали 3–4%. Численные значения этих коэффициентов, найденные в настоящей работе, приведены в табл. 2.

**Рис. 2.** Зависимость относительного изменения скорости ОАВ ($\Delta V/V$) от величины приложенного давления P в образцах В95 (а) и В95/наноалмаз (б).**Таблица 3.** Значения величин $(\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P})_{P=0}$ в сплавах В95 и В95/наноалмаз

| № п/п | N | U | M | $(\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P})_{P=0}$ | |
|----------|-------|-------|-------|---|-------------------|
| | | | | В95 | В95/ наноалмаз |
| 1 | [100] | [100] | [010] | 1.12 | 1.86 |
| 2 | [100] | [100] | [001] | 1.07 | 1.71 |
| 3 | [100] | [010] | [010] | 0.83 | 0.41 |
| 4 | [100] | [010] | [001] | -0.98 | -1.33 |

Давление одноосного сжатия создавалось с помощью гидравлического пресса. Измерение силы, прикладываемой к исследуемому образцу, проводилось с помощью образцового динамометра. В образцах сплава алюминия В95 и композита В95/наноалмаз были измерены зависимости относительного изменения скорости ($\Delta V/V$) продольных и сдвиговых ОАВ от величины давления одноосного сжатия P при различном направлении единичных векторов N , U и M . Направление распространения упругой волны в образце и направление одноосного сжатия были ортогональными. Приложенное к образцам давление P изменялось в пределах 0–80 МПа. В этом интервале давлений зависимость $\Delta V/V$ от величины P была линейной. Примеры таких измерений приведены на рис. 2. Проведенные измерения позволили определить значения $(\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P})_{P=0}$ для всех случаев возможной взаимной ориентации векторов M , N , U (табл. 3). Для повышения точности определения трех независимых УППП нами было проведено по четыре измерения зависимости относительного изменения скорости от давления в каждом из образцов. С помощью значений, приведенных в табл. 1–3, были получены системы из четырех линейных уравнений для определения трех независимых УППП в каждом из материалов. Эти системы были решены методом наименьших квадратов. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Анализ экспериментальных результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что соответствующие величины УППП в алюминиевом сплаве В95 и композите В95/наноалмаз в пределах ошибки измерения совпадают. Это позволяет сделать вывод, что добавление в сплав В95 наночастиц алмаза не оказало существенного влия-

Таблица 4. Коэффициенты упругости третьего порядка в сплавах алюминия В95, В95/наноалмаз и Д16 (в 10^{11} N/m²)

| Материал | C_{111} | C_{112} | C_{123} | Лит. ссылка |
|---------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| В95 | -0.9 ± 0.4 | 1.68 ± 0.25 | 4.46 ± 0.15 | Наст. раб. [13] |
| В95/наноалмаз | -7.07 ± 1.53 | -0.62 ± 0.76 | 4.51 ± 0.44 | |
| Д16 | -2.96 ± 0.1 | -0.92 ± 0.3 | 2.38 ± 0.3 | |

ния на его линейные упругие свойства. Анализ линейных упругих свойств широко распространенных сплавов на основе алюминия [14,15] показал, что независимо от их состава различие величин УПВП не превышает нескольких процентов. Однако, как видно из табл. 4, значения УППП в алюминиевых сплавах В95, В95/наноалмаз и Д16, измеренных в одной лаборатории с использованием одного метода (метода Терстона–Браггера), значительно различаются. Так, например, величина коэффициента C_{111} в сплавах В95, В95/наноалмаз, Д16 различается в несколько раз. Аналогичное поведение упругих постоянных второго и третьего порядков наблюдается в кристаллах. Так, например, в [16–18] приведены значения УПВП и УППП в кубическом кристалле титаната стронция (SrTiO_3). Численные значения величин УПВП в кристаллах титаната стронция находятся в хорошем согласии друг с другом. Однако значения отдельных УППП в этих же кристаллах существенно различаются. Необходимо отметить, что для проведения исследований в этих работах использовались образцы монокристаллов титаната стронция, выращенных в разных лабораториях. Причиной такого различия численных значений УППП наряду с разной методикой их измерения могут быть незначительные вариации состава, структуры и стехиометрии исследованных в работах [16–18] кристаллов.

4. Заключение

В работе определены все независимые УПВП и УППП в алюминиевом сплаве В95 и композите В95/наноалмаз. Сравнение величин УПВП в материалах В95 и В95/наноалмаз показало, что в пределах ошибки эксперимента они совпадают. Значения величин УППП в этих материалах существенно различаются. Отсюда следует, что УППП более чувствительны к составу, структуре и стехиометрии материала, чем УПВП.

Список литературы

- [1] Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. Введение в нелинейную акустику. Наука, М. (1966). 519 с.
- [2] M.A. Breazeale, J. Philip. In: Physical acoustics. Principles and methods/Eds W.P. Mason, R.N. Thurston. Academic Press. N.Y.–London. (1984). V. XVII. P. 2.
- [3] R.N. Thurston, K. Brugger. Phys. Rev. **133**, PA1604 (1964).
- [4] С.Ю. Давыдов. ФТТ. **53**, 617 (2011).
- [5] Л.Л. Зарембо, В.А. Красильников, И.Е. Школьник. Дефектоскопия **10**, 76 (1989).
- [6] О.В. Руденко. Дефектоскопия **8**, 76 (1993).
- [7] О.В. Руденко. УФН, **176**, 77 (2006).
- [8] Э. Дьелесан, Д. Руайе. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. Наука, М. (1982). 424 с.
- [9] Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. Основы кристаллоакустики. Наука, М. (1975). 680 с.
- [10] V. Prokhorov, V. Kulibaba, A. Korobov, S. Stavrev, S. Kolev. Machines, technologies, materials **11**, 40 (2011).
- [11] А.Е. Алексенский, М.В. Байдакова, А.Я. Вуль, В.Ю. Давыдов, Ю.А. Певцова. ФТТ **39**, 1125 (1997).
- [12] Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Мир, М. (1972). 307 с.
- [13] А.И. Коробов, А.В. Батенев. Ю.А. Бражкин. Дефектоскопия **2**, 39 (2000).
- [14] Физические величины. Справочник / Под ред. Е.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Энергоатомиздат, М. (1991). 1232 с.
- [15] Конструкционные материалы. Справочник / Под ред. Б.Н. Арзамасова. Машиностроение, М. (1990). 688 с.
- [16] А.И. Коробов, Б.Б. Воронов. ФТТ **38**, 2159 (1996).
- [17] J.E. Mackey, I.J. Arnold. J. Appl. Phys. **40**, 4808 (1969).
- [18] A.G. Beattie, G. Samara. J. Appl. Phys. **42**, 2376 (1971).