УДК 538.95:534.2

## ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ УПРУГОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И ЗАТУХАНИЕМ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

© 2020 г. М. А. Луговая<sup>1, \*</sup>, Н. А. Швецова<sup>1</sup>, А. Н. Резниченко<sup>1</sup>, А. В. Наседкин<sup>1</sup>, А. Н. Рыбянец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Ростов-на-Дону, Россия

> \**E-mail: lugovaya\_maria@mail.ru* Поступила в редакцию 10.04.2020 г. После доработки 29.04.2020 г. Принята к публикации 27.05.2020 г.

Экспериментально исследованы частотные зависимости комплексных модулей упругости керамоматричных пьезокомпозитов керамика/кристалл с высокими упругими потерями и дисперсией. Экспериментальные результаты сопоставлены с теоретическими зависимостями, полученными с использованием общих соотношений Крамерса—Кронига.

DOI: 10.31857/S0367676520090239

Существенный прогресс в развитии технологии керамоматричных композитов (КМК) в последние годы позволил существенно улучшить свойства керамических материалов [1]. Многофазные КМК являются сложными объектами для теоретического моделирования, неразрушающего контроля и ультразвуковых измерений. Для полного описания свойств пьезоактивных КМК необходима оценка механических, пьезоэлектрических и диэлектрических потерь с учетом несинфазного отклика материала на внешние воздействия [2].

Целью настоящей работы являлась экспериментальная валидация общих соотношений между упругой дисперсией и затуханием в КМК с сильной пространственной дисперсией и высокими упругими потерями.

В качестве образцов для исследования были выбраны КМК керамика—кристалл, состоящие из сегнетомягкой матрицы цирконата-титаната свинца (ЦТС) состава PbTi<sub>0.45</sub>Zr<sub>0.53</sub>(W<sub>1/2</sub>Cd<sub>1/2</sub>)<sub>0.02</sub>O<sub>3</sub> с произвольно распределенными кристаллическими включениями корунда ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с различным средним размером и объемным содержанием частиц [3, 4].

Комплексные модули упругости КМК ЦТС/α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также их частотные зависимости определяли методом пьезорезонансного анализа импедансных спектров и программного обеспечения PRAP [5]. Программа PRAP реализует полный автоматический анализ пьезорезонансных спектров импеданса посредством сопоставления теоретических зависимостей импеданса от частоты со спектром, измеренным на образце соответствующей геометрии и размеров для получения комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических констант пьезорезонатора. Эта программа использует генерализированную форму метода Смита для определения свойств материала для любой стандартной (ОСТ № 11 0444-87) резонансной моды колебаний и обобщенный метод отношений для радиальной моды, справедливый для материалов с произвольной добротностью [5].

Измерения были выполнены на стандартных образцах КМК ЦТС/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, поляризованных по толщине. Прецизионные измерения импедансных спектров для толщинной моды колебаний пьезокомпозитных образцов выполняли с помощью анализатора импеданса Agilent 4294A.

Для выявления микроструктурных особенностей КМК керамика—кристалл (размер и распределение кристаллитов  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также пор в керамической матрице) были выполнены микроструктурные исследования. Исследования проводили на полированных срезах образцов с использованием оптического микроскопа NeoPhot-21. На рис. 1 в качестве примера показаны оптические микрофотографии полированной поверхности КМК ЦTC/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с содержанием  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10 об. %, полученные при различном увеличении.

Характер и распределение кристаллитов  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также пор на полированных срезах образцов с различным содержанием  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показаны на микрофотографиях. Образцы композита демон-



**Рис. 1.** Оптические микрофотографии полированной поверхности образцов КМК ЦТС/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с содержанием  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равным 10 об. %, полученные при различном увеличении. Средний размер кристаллических включений  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 150 мкм.



**Рис. 2.** Частотные зависимости действительных частей модулей упругости  $C_{33}^{'D}$  и соответствующих упругих потерь  $Q_M^{-1} = C_{33}^{'D}/C_{33}^{'D}$  (*a*), а также скорости звука  $V_t^D$  и соответствующих коэффициентов затухания  $\alpha(V_t^D)$  для КМК ЦТС/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с содержанием  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равным 10 об. % (*b*).

стрируют три уровня черно-белого контраста: белый — пьезокерамика, серый — частицы оксида алюминия и черный — поры. Даже при небольшом содержании частиц  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 об. %) наблюдается существенное увеличение пористости пьезокерамической матрицы. Большинство пор в этом случае по размерам незначительно превышает размеры пор, наблюдающиеся для обычной пьезокерамики. В тоже время наблюдается появление более крупных пор, особенно вблизи частиц  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Таким образом, приведенные ниже частотные зависимости упругих параметров КМК должны рассматриваться с учетом экспериментально зафиксированного появления микропористости наряду с влиянием непьезоэлектрических жестких включений  $\alpha\text{-Al}_2O_3.$ 

На рис. 2 приведены частотные зависимости действительной части модуля упругости  $C_{33}^{'D}$  при постоянной электрической индукции *D* и упругих потерь  $Q_M^{-1} = C_{33}^{'D} / C_{33}^{'D}$  (рис. 2*a*), а также скорости звука  $V_t^{D} = \sqrt{C_{33}^{'D} / \rho}$  и коэффициентов затухания  $\alpha(V_t^{D})$  толщинной моды колебаний (рис. 2*b*) для КМК ЦТС/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с содержанием  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равным 10 об. %.

Из рис. 2 видно, что модуль упругости  $C_{33}^{'D}$  и скорость звука  $V_t^D$  увеличиваются с ростом часто-

том 84

ты вследствие пространственной дисперсии, вызванной рассеянием ультразвука на кристаллических включениях  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рассеяние на границах зерен и микропорах в данном случае несущественно ввиду малого размера последних ~3-5 мкм в сравнении с размером кристаллитов α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равным ~150 мкм). Легко заметить также, что частотные зависимости упругих потерь  $Q_M^{-1}$  линейны, а зависимости  $\alpha(V_t^D)$  квадратичны, что соответствует стохастическому типу рассеяния  $\alpha(V_t^D)$  ~

~  $Df^2$ ,  $Q_M^{-1}$  ~ Df при  $\lambda$  ~ D, где D – средний размер рассеивающих частиц, f – частота [6].

В результате исследований установлено, что в зависимости от диапазона частот и размера рассеивающих частиц механизм рассеяния может меняться от Рэлеевского ( $\lambda \ge D$ ) к стохастическому типу ( $\lambda \sim D$ ), что приводит к соответствующим изменениям характера дисперсии и хорошо согласуется с общими акустическими соотношениями Крамерса-Кронига [7-9]:

$$\alpha(\omega) = \frac{\pi\omega^2}{2V_0^2} \frac{dV(\omega)}{d\omega} \quad \text{in } \Delta V = V(\omega) - V_0 =$$
$$= \frac{2V_0^2}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2} d\omega',$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $V_0$  – скорость звука при фиксированной частоте  $\omega_0$ , а скорость звука  $V(\omega)$ записывается как  $V + \Delta V(\omega)$  при  $\Delta V(\omega) \ll V_0$  и сохраняются только члены порядка  $\Delta V(\omega)$ .

Одним из наиболее важных результатов, полученных в настоящей работе, является подтвер-

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ

ждение применимости общих акустических соотношений Крамерса-Кронига для описания КМК керамика-кристалл с сильной пространственной дисперсией и высокими упругими потерями, обусловленными рассеяниям ультразвука на кристаллических включениях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание в сфере научной деятельности. Южный федеральный университет, 2020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Bowen C.R., Topolov V.Y., Kim H.A. // Springer Ser. Mater. Sci. 2016. V. 238. P. 1.
- 2. Zhao D., Lenz T., Gelinck G.H. et al. // Nat. Commun. 2019. V. 10. № 1. P. 2547.
- 3. Луговая М.А., Швецов И.А., Швецова Н.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 3. С. 356; Lugovaya M.A., Shvetsov I.A., Shvetsova N.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 3. P. 310.
- 4. Рыбянец А.Н, Константинов Г.М., Науменко А.А. u dp. // ФТТ. 2015. T. 57. № 3. C. 515; Rybyanets A.N., Konstantinov G.M., Naumenko A.A. et al. // Phys. Sol. St. 2015. V. 57. № 3. P. 527.
- 5. www.tasitechnical.com.

2020

Nº 9

- 6. Naumenko A.A., Shcherbinin S.A., Makariev D.I., *Rybyanets A.N.* // Phys. Proc. 2015. V. 70. P. 171.
- 7. Хилл К., Бамбер Дж., тер Хаар Г. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. М.: Физматлит. 2008. 544 с.
- 8. Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Shcherbinin S.A. et al. Piezoelectrics and nanomaterials: fundamentals, developments and applications. Ch. 7. N.Y.: Nova Sci. Publ. Inc., 2015. P. 169.
- 9. O'Donnell M., Jaynes E.T., Miller J.J. // Acoust. Soc. Am. 1981. V. 69. P. 696.