

Это соответствует закону  $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_0/kT)$  для термоактивационного механизма проводимости. Энергии активации, отвечающие линейным участкам ниже и выше температуры максимума соответственно, составляют: для объемного нитрита натрия  $E_{a1} = 2,02$  эВ и  $E_{a2} = 0,59$  эВ; для нанокompозитного образца  $E_{a1} = 0,81$  эВ и  $E_{a2} = 1,21$  эВ. Уменьшение энергии активации для наноразмерного нитрита натрия связано с большой площадью границ раздела в матричном образце и наличием на этих границах несвязанных зарядов.

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследований диэлектрических и проводящих свойств нитрита натрия в порах силикатных матриц 3D-SBA-15. Показано, что для нитрита натрия в наноразмерном состоянии значения действительной диэлектрической проницаемости на низких частотах примерно в 10 раз больше, чем у объемного нитрита натрия. На низких частотах основной вклад в диэлектрическую проницаемость дает доменная поляризация и поляризация Максвелл – Вагнера. С ростом частоты вклад этих механизмов быстро убывает, что приводит к низкочастотной дисперсии. Показано, что основным механизмом проводимости в обоих образцах является термоактивационный механизм, энергия активации для наноразмерного нитрита натрия меньше, чем для объемного.

---

1. Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1981. – 736 с.

2. Pan'kova, S.V., Poborchii, V.V., Solov'ev, V.G. The giant dielectric constant of opal containing sodium nitrate nanoparticles // Journal of Physics: Condensed Matter. – 1996. – V. 8, № 12. – P. L203.

3. Барышников, С.В., Стукова, Е.В., Чарная, Е.В., Tien, Cheng, Lee, M.K., Bohlmann, W., Michel, D. Диэлектрические и ЯМР-исследования нанопористых матриц, заполненных нитритом натрия // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48. – С. 551.

4. Алексеева, О.А., Борисов, С.А., Королева, Е.Ю., Набережнов, А.А., Стукова, Е.В., Симкин, В.Г., Hoffmann, J.-U. Анализ структуры и диэлектрического отклика композитов  $(1-x)\text{NaNO}_2+x\text{BaTiO}_3$  при  $x=0.05$  и  $0.1$  // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59. – С. 730-735.

УДК534.6

К.А. Драчёв, В.И. Римлянд

## ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Приведены результаты экспериментальных измерений скорости звука и коэффициента затухания композиционных материалов на основе полимерного связующего с армированием стекло- и углетканью. Приводятся зависимости акустических параметров от плотности армирования.*

*Ключевые слова: ультразвук, композиционные материалы, армирование, акустические свойства.*

## INVESTIGATION OF ACOUSTIC PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS

*Results of experimental measurements of the sound speed and the attenuation coefficient of composite materials on the basis of polymeric binding with reinforcing glass - and carbon tissue are given. Dependences of acoustic parameters on reinforcing density are provided.*

*Key words: ultrasound, composition material, reinforcement, acoustic properties.*

В настоящее время наблюдается общемировая тенденция широкого использования композиционных материалов (КМ), которые позволяют добиться снижения веса и повышения эксплуатационных характеристик деталей и узлов, применяемых в машиностроении, космической и авиационной технике. К данному классу материалов выдвигаются повышенные требования по надежности и отсутствию дефектов. Активно разрабатываются и методы неразрушающего контроля [1-3]. При этом каждый класс КМ требует применения определенных методов дефектоскопии. Методы неразрушающего контроля КМ на основе полимерных связующих с различными армирующими элементами (ткани, волокна, нити, тонкодисперсные частицы и др.) имеют ряд особенностей по сравнению с однородными материалами [4]. КМ можно отнести к наиболее сложным объектам контроля. Они характеризуются неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разбросом физико-механических характеристик. Как следствие, для дефектоскопии КМ используются различные методы НК: визуальные, акустические, радиационные, тепловые, микрорадиоволновые и др. Наиболее широкое распространение получили акустический, ультразвуковой и рентгеновский методы контроля. При этом применение ультразвуковых акустических методов, составляет более 60% от всех методов контроля [1, 2, 5]. Использование ультразвуковых методов требует знания воздействия структуры и дефектов на распространение различных типов волн в КМ.

Основная цель данной работы – экспериментальное изучение особенностей распространения акустических волн в полимерных КМ, армированных стекло- и углетканями.

Для измерения скорости распространения акустических волн в образцах композиционных материалов использовалась информационно-измерительная система, блок-схема которой на приведена на рис. 1.

В качестве возбуждающего сигнала использовался импульс длительностью 1 мкс, амплитудой 10 В и частотой повторения 100 Гц, сформированный встроенным генератором сигнала специальной формы ГСПФ-052. Регистрация поступающего с выходов широкополосного усилителя сигнала УШ и его запись в память компьютера (ПК) производилась с помощью встроенного цифрового осциллографа BORDO B-222. Для контроля работы системы использовался двухканальный осциллограф Tektronix TDS 1002. Для уменьшения влияния шумов осуществлялось усреднение по ста цифровым реализациям. В эксперименте в качестве излучателя и приемника акустических сигналов использовались пьезоэлектрические прямые совмещенные датчики с рабочей частотой 1,25 МГц.

Исследования акустических свойств проводились на образцах в виде прямоугольника с размерами 50×50×10 мм, с различным количеством армирующих слоев: 0, 5, 10, 18 и 35 на 1 см. В качестве матрицы использовалась эпоксидно-диановая смола Ероху 520 с добавлением в качестве отвердителя полиэтиленполиамин (10%). Армирование основы производилось с помощью стекло- и углетканей.

Скорость акустических волн определялась на основе измерения времени прохождения ультразвукового импульса (УИ) от излучателя до приемника. Распространение акустических волн в образцах исследовалось по двум основным направлениям – вдоль слоев армирования и поперек слоев армирования (пьезопреобразователи устанавливались на противоположных сторонах образцов). Данный метод измерения был выбран в связи с тем, что и обнаружить дефекты в КМ рассматриваемого типа можно, используя импульсные эхо-теневой и эхометод [6]. Коэффициент затухания  $\alpha$  определялся как относительное уменьшение амплитуды первого прошедшего импульса к амплитуде переотраженного импульса.

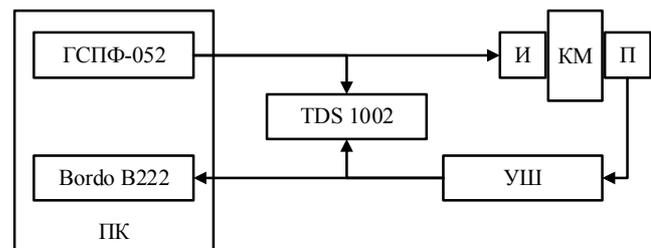


Рис. 1. Блок-схема информационно-измерительной системы.

Время прихода ультразвукового  $t$  определялось по началу регистрации первой полуволны, амплитуда которой на 10% отличается от уровня фонового сигнала в усредненной осциллограмме сигнала. В расчетах учитывались поправки для  $t$ , связанные с работой аппаратуры и пьезодатчиками. Анализ полученных сигналов позволял определять скорость продольной волны для каждого образца в зависимости от расположения пьезоэлектрических датчиков относительно слоев армирования. Погрешность измерения скорости в экспериментах составляла  $\Delta C = \pm 10$  м/с.

Проведенные измерения показали, что на скорость продольной волны влияет направление распространения относительно слоев армирования. Вдоль слоев скорость распространения выше, чем при распространении поперек слоев армирования.

Исследование влияния плотности укладки слоев армирования композитного материала на скорость распространения акустических волн в образцах показало, что с увеличением количества слоев скорость возрастает (особенно сильно при распространении волн вдоль слоев армирования). Это хорошо видно на рис. 2.

Полученная экспериментальная зависимость подтверждается расчетами на основе работ для слоистых сред [7, 8]. Результаты расчета в сравнении с экспериментальными значениями скорости продольных волн приведены на рис. 2. В формулах для расчета скорости использовалась эффективная толщина слоя армирования, которая составила 60% от исходной толщины армировочной ткани (стеклоткани). На рисунке видно, что скорость продольных волн при их распространении вдоль слоев армирования возрастает с увеличением количества слоев.

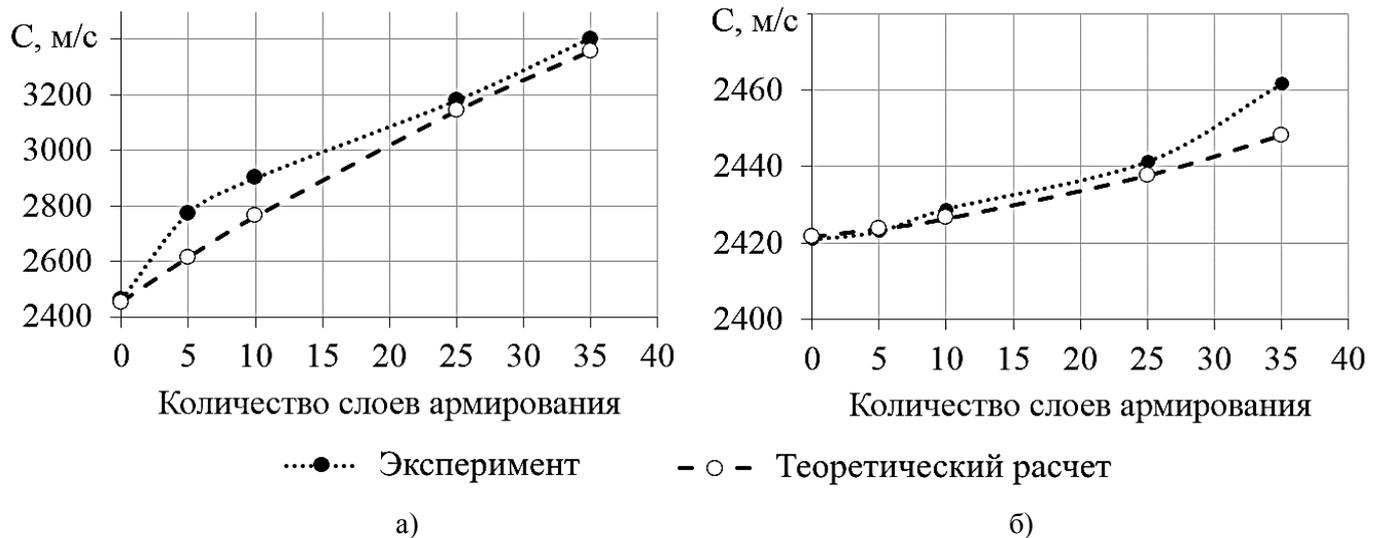


Рис. 2. Скорость распространения продольных волн в образце с армированием стеклотканью:

а – вдоль волокон; б – поперек волокон.

При увеличении количества слоев стеклоткани возрастает отклонение рассчитанных значений от экспериментальных значений скоростей продольной волны (при распространении волн поперек слоев). Это можно объяснить тем, что в расчете не учитываются факторы, возникающие на границе раздела «матрица – волокно». Данная граница обычно представляет собой область скачкообразного изменения состава, кристаллической и молекулярной структуры и других свойств материалов. Характеристики границы раздела специфичны для каждой пары «матрица – волокно» и определяются множеством факторов (поверхностная шероховатость волокна, адгезионными связями, межфазные взаимодействия и т.д.).

Коэффициент  $\alpha$  для продольной волны существенно зависит от направления распространения волны относительно слоев армирования в КМ. Значение  $\alpha$  волны практически не зависит от плотности укладки слоев армирования при распространении вдоль слоев армирования в образце. Значение  $\alpha$

для образцов КМ составляет 170 дБ/м вдоль слоев армирования и 570 дБ/м – поперек. Средняя величина коэффициента затухания в образцах, армированных 18 слоями углеткани, при распространении вдоль и поперек слоев армирования составляет соответственно 240 дБ/м и 530 дБ/м.

Для проверки возможности обнаружения дефекта в КМ дополнительно была проведена серия измерений с использованием методики, основанной на отражении акустического сигнала от дефекта (эхометод), на образце композитного с 18 слоями углетканевого материала с заранее заложенным дефектом в виде непрочлея слоев размером  $15 \times 15 \times 2$  мм, глубиной расположения 4,5 мм. Измерения проводились также для КМ, образцов армированных 18 слоями углеткани и 35 слоями стеклоткани без дефектов. В качестве преобразователя использовался раздельно-совмещенный пьезопреобразователь с рабочей частотой 1,25 МГц и диаметром рабочей поверхности 18 мм, установленный на поверхности образца.

В результате серии измерений получены цифровые осциллограммы для образцов с дефектами и без дефектов. На цифровых осциллограммах для образцов с дефектом хорошо фиксировался УИ, отраженный от дефекта. Рассчитанная по времени прихода отраженного импульса глубина залегания дефекта составила 5,5 мм, что фактически совпадает с реальной. Амплитуда сигнала позволяла количественно рассчитать размеры дефекта. Однако «толщину» непрочлея определить не представлялось возможным.

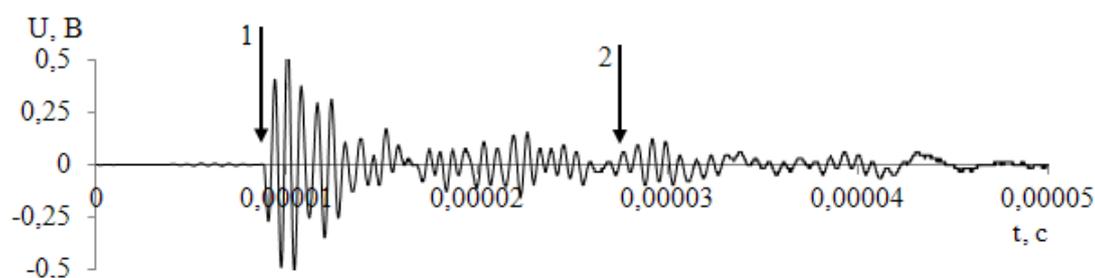


Рис. 3. Осциллограмма акустического сигнала при распространении волн вдоль слоев армирования в образце с дефектом в виде непрочлея слоев.

При расположении раздельно-совмещенного пьезопреобразователя на торце образца (УИ распространялся вдоль слоев армирования) отраженный от дефекта импульс фиксировался на осциллограмме (рис. 3, амплитуда зондирующего импульса составляла 60 В). Анализ осциллограмм, полученных от образца с дефектом, позволил вычислить расстояние до дефекта, которое составило в измерениях 15,4 мм. На рис. 3 можно выделить, помимо пришедшего отраженного импульса от дефекта (индекс 1), еще и отраженный от противоположного торца акустический импульс (индекс 2), который плохо выделяется из общего фона. Время прихода этого импульса соответствует размеру образца (длине) – 50 мм.

Проведенные исследования показывают, что примененные ультразвуковые методы позволяют проводить неразрушающий контроль данного типа композиционных материалов, при этом результаты расчетов акустических параметров на основе известных методик дают качественное совпадение с экспериментом.

1. Schwartz, Mel M. Composite materials. V. I: Properties, non-destructive testing, and repair. Farmington (Connecticut): United Technologies Corporation, 1997. – 432 p.

2. Мурашов, В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. – М.: Спектр, 2016. – 244 с.

3. Schwartz, Mel M. Composite Materials. V. II: Processing, Fabrication, and Applications. – Farmington (Connecticut): United Technologies Corporation, 1997. – 302 p.

4. Троицкий, В.А., Карманов, М.Н., Троицкая, Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 29-33.
5. Бойцов, Б.В., Васильев, С.Л., Громашев, А.Г., Юргенсон, С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Труды МАИ (Электронный журнал). – 2011. – № 49. Режим доступа: [http://mai.ru/upload/iblock/3c1/metody-nerazrushayushchego-kontrolya\\_-primenyayemye-dlya-konstruktsiy-iz-perspektivnykh-kompozitsionnykh-materialov.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/3c1/metody-nerazrushayushchego-kontrolya_-primenyayemye-dlya-konstruktsiy-iz-perspektivnykh-kompozitsionnykh-materialov.pdf)
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. – Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
7. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
8. Зинченко, В.Ф., Негреева, С.Н. Исследование взаимосвязей между некоторыми показателями структуры и физико-механических свойств органо- и углепластиков. // Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. – Рига: «Зинатне», 1983. – С. 158-165.

УДК 537.533.9:537.226.4

А.Г. Масловская, А.В. Павельчук

### ОЦЕНКА ПОЛЕВЫХ ЭФФЕКТОВ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ, ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

*В работе представлены результаты моделирования полевых эффектов инжектированных зарядов в сегнетоэлектрических материалах при исследовании методами растровой электронной микроскопии. Физико-математическая модель основана на диффузионно-дрейфовом подходе, который включает гибридную схему расчета транспорта электронов в облученной мишени и алгоритм вычисления динамических характеристик процесса зарядки. Приведены данные вычислительного эксперимента по оценке характеристик электронно-индуцированной зарядки на примере сегнетоэлектрического кристалла танталата лития.*

*Ключевые слова: электронное облучение, растровый электронный микроскоп, сегнетоэлектрик, процесс зарядки диэлектриков, модель динамической зарядки, вычислительный эксперимент.*

### ESTIMATION OF INJECTED CHARGE FIELD EFFECTS IN FERROELECTRICS IRRADIATED BY AVERAGE ENERGY ELECTRON BEAMS

*The paper presents results of simulation of injected charge field effects in ferroelectrics at diagnostics with scanning electron microscope techniques. The physicomathematical model is based on drift-diffusion approach which includes a hybrid computational scheme of electron transport in the irradiated target and an algorithm of calculation of dynamic charging process characteristics. Data of a computing experiment were proposed to estimate of electron beam-induced charging characteristics on the example of lithium tantalate ferroelectric crystal.*

*Key words: electron irradiation, scanning electron microscope, ferroelectric, process of dielectric charging, model of dynamic charging, computing experiment.*