

УДК 669.14.017:620.181

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ  
КАК ОСНОВА ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНТРОЛЯ ИХ СВОЙСТВ

Кустов А.И.<sup>1</sup>, Мигель И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный педагогический  
университет»

<sup>2</sup>Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение  
высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и  
Ю.А. Гагарина»» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации  
E-mail: [akvor@yandex.ru](mailto:akvor@yandex.ru)

**Аннотация:** В работе рассмотрены основы методов акустомикроскопической дефектоскопии и алгоритмы их применения для контроля структуры и свойств композиционных материалов. На основе анализа фундаментальных физических принципов в области акустики разработан метод акустической визуализации структуры материалов, в том числе и подповерхностной. Он позволяет определять размеры частиц наполнителя, характер их пространственного распределения, адгезионные параметры, а по ним рассчитывать некоторые механические характеристики материала.

**Ключевые слова:** акустические волны, акустомикроскопическая дефектоскопия, акустическая визуализация, композиционные материалы, мониторинг свойств композитов.

FUNDAMENTAL PHYSICAL PRINCIPLES AS THE BASIS  
OF INNOVATIVE METHODS OF STUDY COMPOSITE MATERIALS  
AND CONTROL OF THEIR PROPERTIES

Kustov A.I.<sup>1</sup>, Migel I.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh state  
pedagogical University»

<sup>2</sup>Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education  
«Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy  
named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin»» (Voronezh) of the  
Ministry of Defense of the Russian Federation

E-mail: [akvor@yandex.ru](mailto:akvor@yandex.ru)

**Summary:** The paper discusses the basics of methods of acoustic microscopic flaw detection and algorithms for their application to control the structure and properties of composite materials. Based on the analysis of fundamental physical principles in the field of acoustics, a method of acoustic visualization of the structure of materials, including subsurface. It allows you to determine the size of the filler particles, the nature of their spatial distribution, adhesion parameters, and calculate some of the mechanical characteristics of the material.

**Keywords:** acoustic waves, acoustomicroscope defectoscopy, acoustic imaging, composite materials, monitoring properties of the composites.

В современной промышленности, в научных приложениях всё более широкое распространение получают композиционные материалы. Данный факт связан с наличием ряда существенных преимуществ у них, как в области механических параметров, так и электрических, магнитных, оптических. Они обладают низкой удельной плотностью, повышенными прочностными и временными характеристиками. Использование таких материалов породило проблему изучения их структуры и свойств, прогнозирования поведения в меняющихся условиях. На наш взгляд успешное решение данной проблемы возможно при комплексном использовании инновационных методов изучения композиционных материалов на основе фундаментальных физических принципов. В частности, к таким методам следует отнести методы акустомикроскопической дефектоскопии (АМД-методы) [1-3].

Рассмотрим кратко суть ведущих АМД-методов – метода акустической визуализации [4, 5] и метода  $V(Z)$ -кривых [6, 7]. Первый позволяет получать акустические изображения структуры подповерхностных слоев материала и, путем анализа, рассчитывать его физико-механические характеристики. Второй обеспечивает фиксацию характерной для каждого конкретного материала интерференционную зависимости выходного сигнала на пьезопреобразователе акустической линзы ( $V$ ) от расстояния линза-поверхность объекта ( $Z$ ) [8]. Такие зависимости принято называть  $V(Z)$ -кривыми. Анализ формы кривых позволяет рассчитать скорости акустических волн в материале образцов, соответствующие им коэффициенты затухания. Эти характеристики, в свою очередь, обеспечивают определение степени анизотропности изучаемых структур, их текстурированность, упругие модули и проч.

В настоящей работе экспериментальная часть состояла из исследований материалов в жидкой и в твердой фазах. В обоих случаях в полной мере осно-

вой инновационных методов исследований явились фундаментальные физические принципы.

В авиационной технике, например, используются закономерности механики, квантовой физики термодинамики, оптики, электромагнетизма, колебательных и волновых процессов. В настоящее время, назрела необходимость дополнить массивы информации, получаемые традиционными методами за счет внедрения инновационных технологий. Существенную роль в авиационной технике играют жидкости, находящиеся в своем большинстве в виде растворов. При этом, практически все из них являются оптически активными. Это означает, что плоскость поляризации вектора  $E$  при распространении в них поляризованных световых волн, образует в пространстве винтовую фигуру (рис. 1, а). На рисунке 1, б представлен принцип получения поляризованного света.

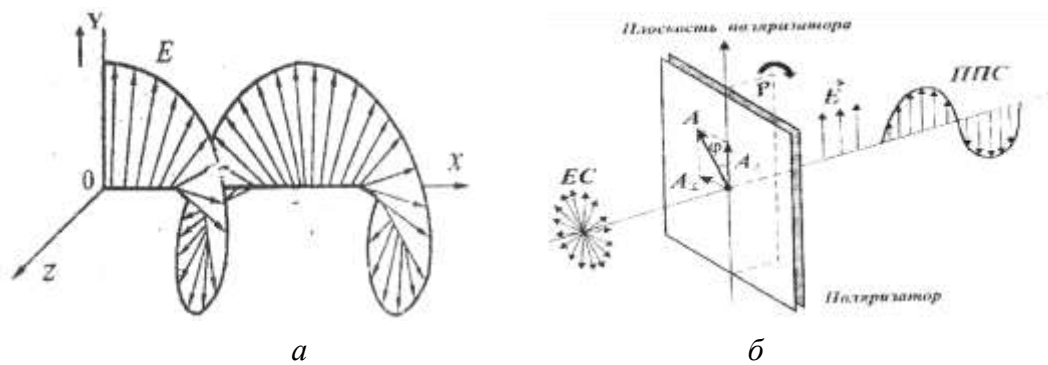


Рисунок 1 – (а) – Изменение ориентации вектора  $E$  в пространстве при явлении оптической активности; (б) – Принцип действия поляризатора электромагнитных волн на основе закона Малюса

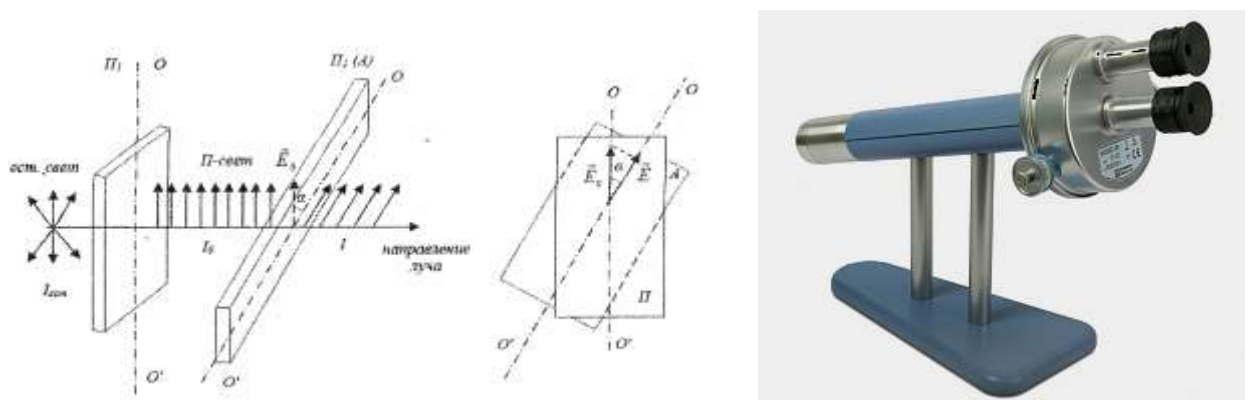


Рисунок 2 – Принцип действия поляриметра (закон Малюса) и внешний вид прибора

Принцип действия поляриметра – прибора, созданного на основе закона Малюса понятен из рисунка 2, а его внешний вид представлен на рисунке 2, б. Схема функционирования, возможные варианты расположения поляризатора,

анализатора и кварцевой пластины приведены на рисунке 3, а.

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha = I_{ECT} \cdot \cos^2 \alpha \cdot 0,5. \quad (1)$$

Оптический поляриметр – это инструмент для измерения угла вращения оптически активных объектов. В нем используются измерительные кюветы определенной длины (в нашем случае 220 мм) для расчета значений концентрации оптически активных веществ в различных растворах и их оптического вращения. Встроенный в поляриметр светодиодный источник излучения имеет конкретные, заданные длины волн (в нашем случае 589,3 нм).

Выполнение измерений в этой области требует владения представлениями и закономерностями ряда тем: 1. Поляризованный свет; 2. Магнитная индукция; 3. Вектор напряженности магнитного поля; 4. Электромагнитные волны; 5. Закон Брюстера; 6. Монохроматические электромагнитные волны; 7. Абсолютный показатель преломления среды; 8. Закон преломления; 9. Относительный показатель преломления; 10. Полное внутреннее отражение; 11. Коэффициент отражения; 12. Интерференция света; 13. Напряженность электрического поля; 14. Плоскость поляризации; 15. Закон Малюса; 16. Поперечные электромагнитные волны.

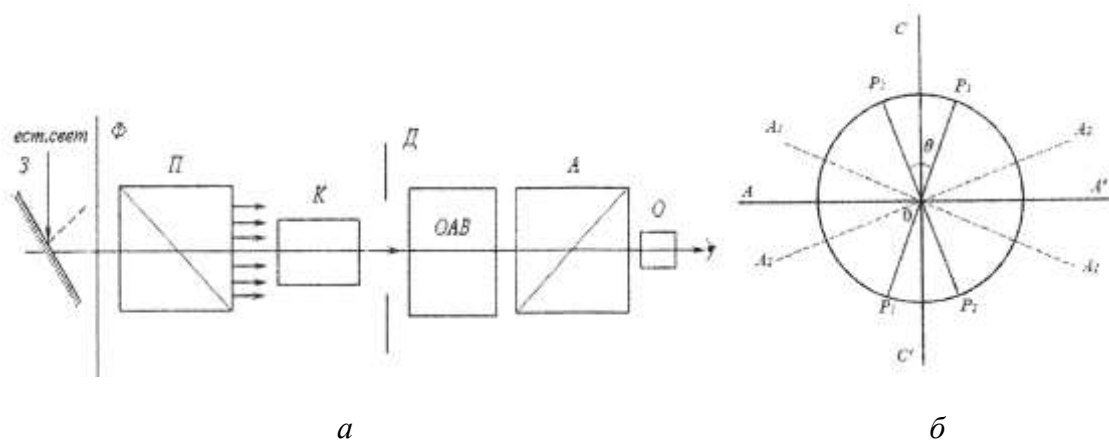


Рисунок 3 – (а) – Схема работы поляриметра (З – зеркало, Ф – фильтр, П – поляризатор, К – кювета, ОАВ – оптически активное вещество, А – анализатор, О – окуляр); (б) – Схема плоскостей поляризации волн прошедших через поляризатор ( $P_1P_1$ ), кварцевую пластинку ( $P_2P_2$ ), и возможные положения плоскости поляризации анализатора ( $AA'$ ,  $A_1A_1$ ,  $A_2A_2$ )

Именно владение в необходимой степени фундаментальными физическими знаниями и принципами в рамках этих тем позволило сделать их основой инновационных методов изучения материалов. Из закона Малюса (1) и следствия из него (2), при известных значениях удельного вращения ( $\alpha$ ) и длине кюветы ( $l$ ), можно по величине угла поворота плоскости поляризации ( $\varphi$ ) рассчитать искомую концентрацию вещества в растворе ( $C$ ).

$$\Delta\varphi = \alpha \cdot l \cdot C. \quad (2)$$

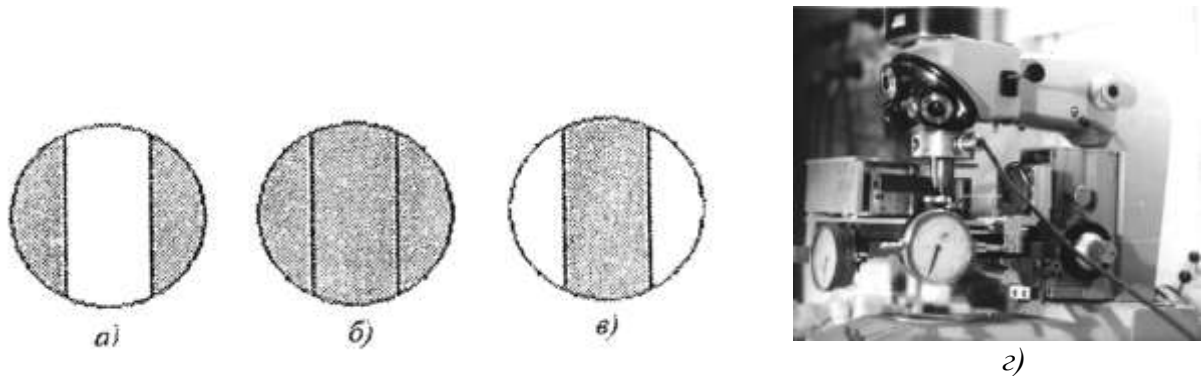


Рисунок 4 – Возможные варианты поля зрения поляриметра: (а) – поляризатор и анализатор скрещены (наличие кварцевой пластинки); (б) – плоскость поляризации анализатора перпендикулярна биссектрисе плоскости поляризатора ( $P_1P_1$ ) и кварцевой пластинки ( $P_2P_2$ ); (в) – плоскости поляризации анализатора и кварцевой пластинки перпендикулярны); (г) – общий вид блоков сканирования и визуализации сканирующего акустического микроскопа (САМ)

Нами было предложено измерить концентрацию раствора вещества (на примере сахара) с использованием АМД-методов [9]. Для этого был применен разработанный сканирующий акустический микроскоп (САМ) отражательного типа [10], блок механического сканирования которого представлен на рисунке 4, г. В соответствии с канонами метода  $V(Z)$ -кривых [11] была получена характерная кривая для исследованного неоднократно и с высокой степенью точности монокристалла кремния ( $\text{Si} \langle 111 \rangle$ ). По форме полученной кривой (рис. 5, а) определяли значения  $\Delta Z_N$  – характерного расстояния между «горбами», а затем, в соответствии с выражением (3) [12, 13], рассчитывали значения скорости  $\nu_R$  поверхностных акустических волн (ПАВ). Для различных типов растворов были получены корреляционные зависимости для концентраций и скоростей ПАВ. На рисунке 5, б представлен пример такой зависимости для раствора сахара.

$$\Delta Z_N = \frac{\nu_l}{2 \cdot f} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\nu_l}{\nu_R} \right)^2} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Таким образом, была разработана методика определения концентрации сахара с погрешностью  $< 1\%$  по измеренным значениям скорости  $\nu_R$  (точность которых составляла  $\sim 2$  м/с).

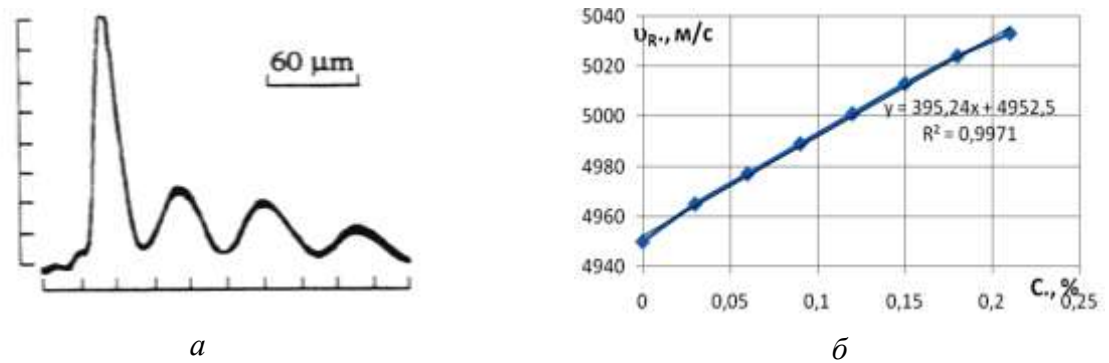


Рисунок 5 – (а) – Характерная интерференционная зависимость –  $V(Z)$  – кривая для монокристаллического кремния  $Si \langle 111 \rangle$ ,  $f = 0,5$  ГГц, масштаб 18 мкм/дел., 1 V,  $\Delta Z_N = 39,7$  мкм; (б) – Корреляционная кривая для оценки концентрации раствора по значениям скорости ПАВ

Следующий, основной этап исследований, связан с определением характеристик металлических материалов, прежде всего сталей, и композиционных материалов. Были получены акустические изображения зеренной структуры стали на различной глубине от поверхности (рис. 6, а, б). Затем рассчитывались значения размера зерна путем статистической обработки экспериментально определенных значений и получены корреляционные зависимости  $v_R - d_3$ . По величине скорости ПАВ определены параметры прочности для испытываемых образцов, рассчитаны упругие модули  $E$  и  $G$  и оценены значения предела пропорциональности:

$$\sigma_{0,2} \cong \frac{G}{10^2 \cdot n \cdot \pi} \cdot \quad (4)$$

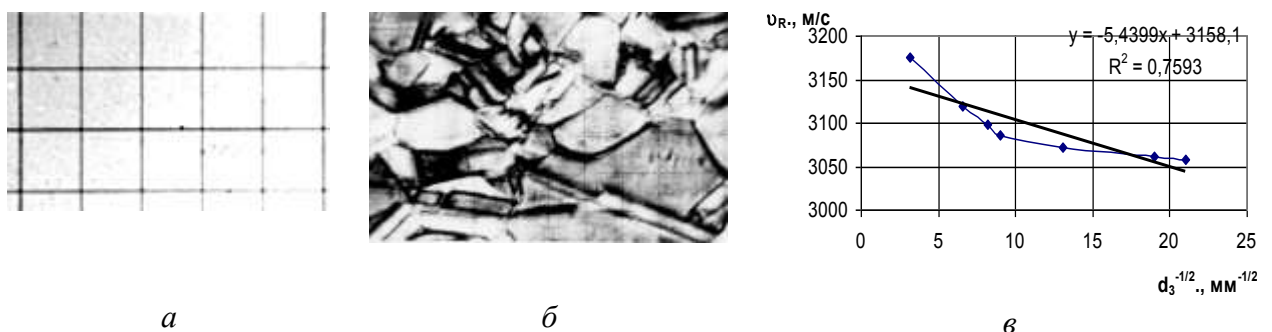


Рисунок – 6 Сравнительные оптическое (а) и акустическое (б) изображения приповерхностных слоев ст. ВНС-2М : (а)  $\sim 200\times$ ; (б) –  $H_2O$  ( $f = 407$  МГц, масштаб 28 мкм/дел.,  $Z = -12$  мкм); в) изменение скорости ПАВ ( $v_R$ ) от размера зерна стали 18ХГТ

Сравнение полученных данных со значениями, полученными другими авторами [14-16] позволяет сделать вывод о том, что измеряя  $v_R$  (или  $d_3$ ) можно просто и

надежно оценивать значения  $\sigma_{0,2}$ . И, наконец, представим результаты исследования композиционных материалов, с использованием АМД-методов для анализа их строения. Объекты исследования в этом случае – пьезокерамический наполнитель в полимерной матрице. На первой стадии были проведены прямые эксперименты – акустическая визуализация строения на выбранной глубине. Рисунок 7 демонстрирует высокий акустический контраст изображения (рис. 7, б), позволяющий надежно контролировать количество частиц наполнителя в растре, их пространственное распределение, оценивать степень изотропности. На оптическом изображении такая информация отсутствует (рис. 7, а).



Рисунок –7 Оптическое (а) и акустическое (б) изображения приповерхностных слоев образца пьезокомпозиата ПВХ с ЦТС-23 ( $Z = -17$  мкм,  $H_2O$ , 407 МГц, масштаб 40 мкм/дел.)

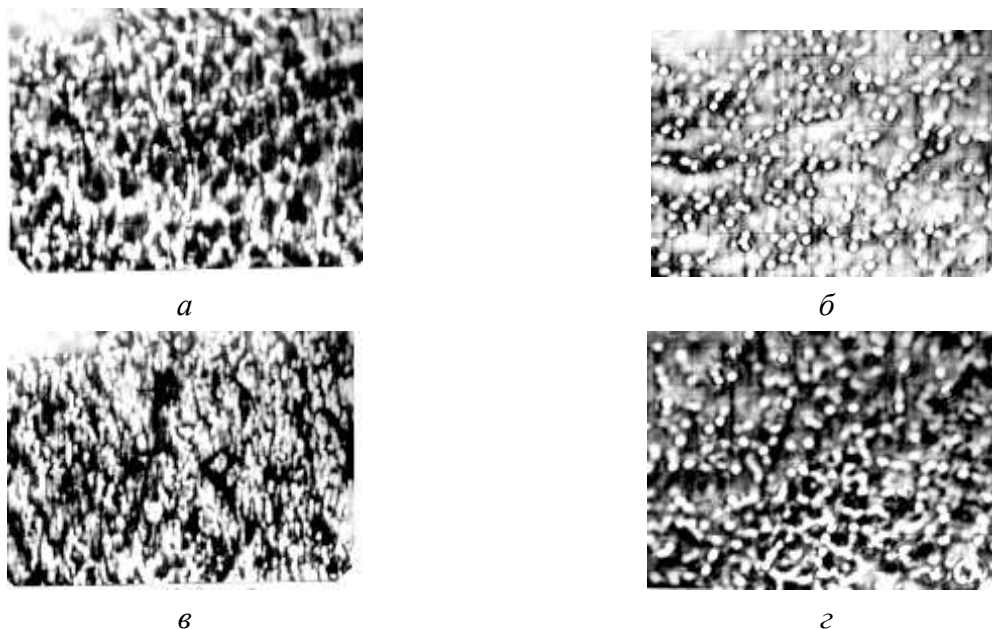


Рисунок – 8 Акустические изображения композита НВ-1 и ЦТС-19 (Hg, 404 МГц, масштаб 40 мкм/дел.), (а), (в) – плоскости, (б), (г) – торцы образцов, (а), (б) – верх, (в), (г) – низ; вертикальная заливка;  $Z_{a-в} = -44$  мкм,  $Z_{б-г} = -32$  мкм

Прямая акустическая визуализация позволяет оценивать оптимальность строения получаемого тем или иным способом пьезокомпозиата (рис. 8). САМ

обеспечивает различие распределения частиц наполнителя как в различных взаимно перпендикулярных направлениях ( $a$  и  $b$ ,  $v$  и  $z$ ), так и при изменении позиции по вертикали ( $a$  и  $v$ ,  $b$  и  $z$ ) при выбранном способе изготовления лент пьезокомпозита.

Следует отметить, что данный метод эффективен и при определении оптимального количества наполнителя в композите, так как при росте доли наполнителя от нуля до некоторого критического значения свойства наполнителя трансформируются в соответствии с непрерывным законом, а после этого критического – скачком, так как образуются специфические конгломераты (см. рисунок 9,  $a$ ,  $b$ ,  $v$  и  $z$ ).

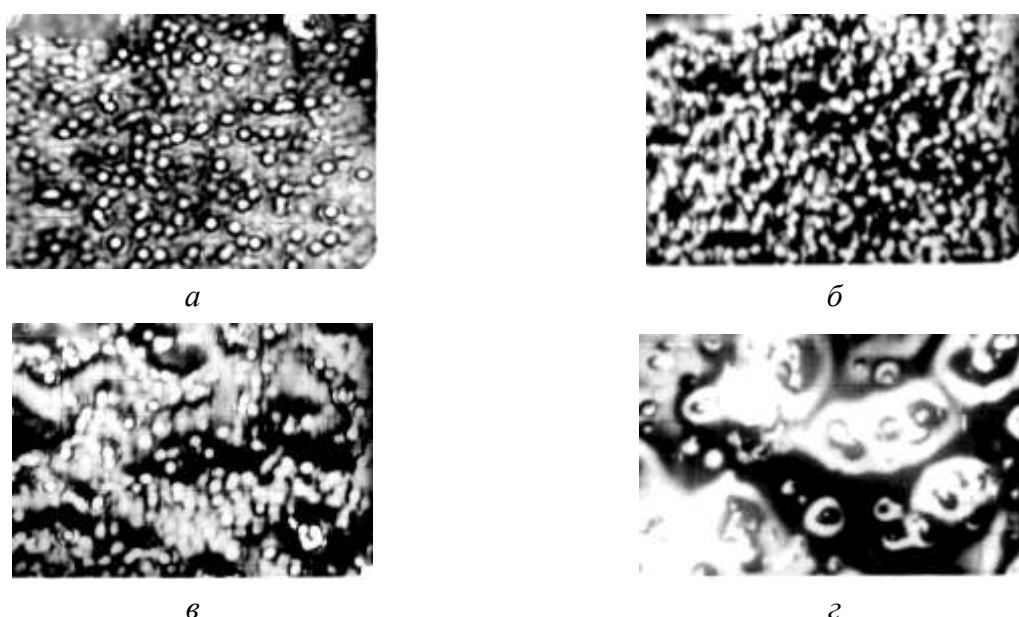


Рисунок 9 – Акустические изображения композита ИНСК-3 и ЦТС-19 (Hg, 404 МГц, масштаб 40 мкм/дел.), ( $a$ ) – образец № 1, ( $b$ ) – образец № 5, ( $v$ ) – образец № 9, ( $z$ ) – образец № 13; вертикальная заливка;  $Z = -30-35$  мкм

Существует принципиальная возможность определения акустических параметров пьезокомпозита с помощью САМ в режиме  $V(Z)$ -кривых. Например, этот метод информативен и дополняет метод акустической визуализации при изучении условий полимеризации пьезокомпозитов.

На рисунках 10 и 11 представлены результаты анализа материала марки ИНСК-3, которые демонстрируют, что получение полной кривой для большинства полимерных матриц затруднительно (отсутствует область  $\Delta Z_N$  за счет высокого уровня поглощения акустических волн (АВ)). Однако, даже в этом случае ряд параметров объекта может быть оценен по уровню затухания АВ (см. рис. 11).



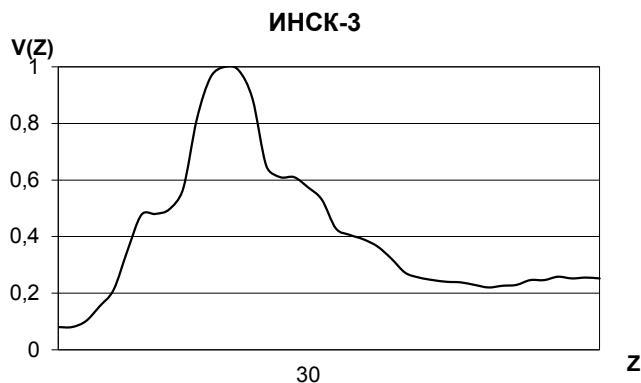


Рисунок –10 V(Z)-кривая для композита ИНСК-3 с ЦТС-19

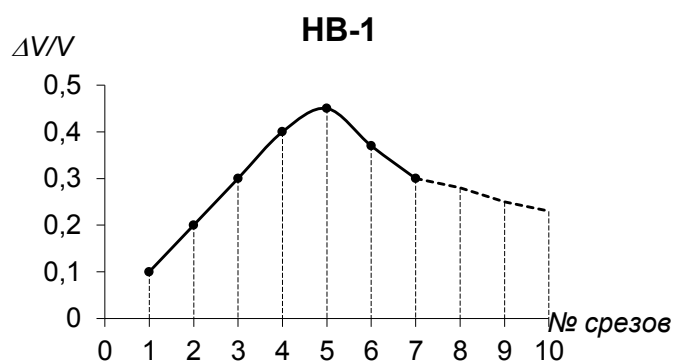


Рисунок – 11 Зависимость демпфирующей характеристики  $\Delta V/V$  для пьезокомпозита НВ-1 с ЦТС-19 от номера среза (высоты выбранного образца в заливке)

Представленные результаты демонстрируют перспективность использования фундаментальных физических принципов для создания инновационных методов изучения и контроля свойств материалов, в том числе и композиционных. На основе разработанных АМД-методов исследования надежно определены размеры частиц наполнителя, характер их пространственного распределения. Подтверждено экспериментально наличие зависимости акустических характеристик пьезокомпозита от характера процесса его полимеризации, от количества частиц наполнителя в объеме. Следующий этап исследований будет посвящен изучению явления адгезии на границе наполнитель-матрица и оценке влияния адгезионных параметров на механические и электрические характеристики материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Acoustic microscopy of Solid Materials [Text] / J. M. R. Weaver, C. Plett, M.

G. Somekh, G. A. D. Briggs // *Metallography*. –1985. –V.17. – P. 3-34.

2 Мигель, И. А. Изучение металлических слоев и полимерных композитов с помощью акустических волн [Текст] / И. А. Мигель, А. И. Кустов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2015. – Т.12. – № 2. – С. 241-247.

3 Weglein, R. D. Acoustic microscopy of material and surface layers [Text] / R. D. Weglein, R. F. Wilson // *J. Appl. Phys.* – 1984. – V. 55. – № 9. –P. 3261-3275.

4 Kustov, A. I. Analysis of the Evolution of Mechanical Properties of Metallic Materials by AMD-Methods for Thermo-mechanical Impacts [Text] / A. I. Kustov, I. A. Migel // *Defects and Diffusion Forum*, Edited by Goroh Itoh, Rustam Kaibyshev, Eric M. Taleff, Marina Tikhonova and Eiichi Sato. – Trans Tech Publications, Switzerland, 2018. – V. 385. – P. 314-318.

5 Kustov, A. I. Development of methods of acoustic microscopy inspection for monitoring of structure and properties coatings for various purposes [Text] / A. I. Kustov, I. A. Migel // *Materials today : Proceedings*. – 2019. – V. 11. – Iss. P1. – P. 203–211.

6 Parmon, W. Ray interpretation of the material signatures in the acoustic microscope [Text] / W. Parmon, H. L. Bertoni // *Electron. Lett.* – 1979. – V. 15. – № 21. – P. 684-686.

7 Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах [Текст] / Л. М. Бреховских. – М. : Наука, 1973. – 343 с.

8 Kustov, A. I. Evaluation of Physical Parameters of the Surface Layers Materials after Processing with Use of Acoustic Waves [Text] / A. I. Kustov, V. M. Zelenev, I. A. Migel // *Materials today : Proceedings*. – 2019. – V. 11. – Iss. P1. – P. 218-227.

9 Окадзаки, К. Технология пьезоэлектрических диэлектриков [Текст] / К. Окадзаки. – М. : Энергия, 1976. – 336 с.

10 Кустов, А. И. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов [Текст] / А. И. Кустов, И. А. Мигель // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2014. – Т. 11. – № 4/2. – С. 592-599.

11 Atalar, A. A. Physical model for acoustic signatures [Text] / A. A. Atalar // *J. Appl. Phys.* – 1979. – V. 50. – № 12. – P. 8237-8239.

12 Викторов, И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах [Текст] / И.

А. Викторов. – М. : Наука, 1981. – 287с.

13 Шутилов, В. А. Основы физики ультразвука [Текст] / В. А. Шутилов. – Ленинград : Изд. Ленинградского университета, 1980. – 280 с.

14 Microwave Acoustics Handbook [Text] / Ed. Slobodnik, E. D. Conway. – N. Y. : Office of aerospace Research United State Air Force, 1970. –Vol. 1. – 228 p.

15 Справочник химика. Том 3. Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов, электродные процессы / Под ред. Б. П. Никольского. – М.-Л. : Химия, 1965. – 1005 с.

16 Adda, Y. La diffusion dans les solides [Text] / Y. Adda, J. Philibert. – Paris : Press Universitaires de France, 1966. – Vol. 2. – P. 87-95.