



ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 31–44
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 1. P. 31–44
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-31-44>, EDN: EIZAWY

Научная статья
УДК 535.326:535.361.22:535.326:620.186.5

Анализ структурных изменений СВЧ- и УЗ-модифицированных углепластовых композитов методом низкокогерентной рефлектометрии

М. В. Алонова¹, И. В. Злобина^{1✉}, Н. В. Бекренев¹, Д. А. Зимняков^{1,2}

¹Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

Алонова Марина Васильевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>, AuthorID: 667431

Злобина Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника», irinka_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>, AuthorID: 686083

Бекренев Николай Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника», nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>, AuthorID: 271817

Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹заведующий кафедрой «Физика», ²главный научный сотрудник лаборатории проблем лазерной диагностики технических и живых систем, zimnykov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>, AuthorID: 29094

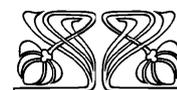
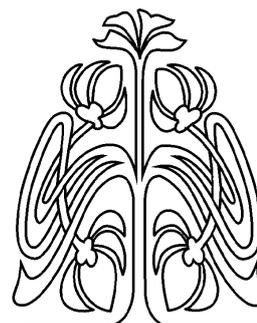
Аннотация. Метод низкокогерентной рефлектометрии применён к анализу структуры углепластовых композитных материалов в исходном состоянии и после СВЧ или ультразвукового воздействия. В качестве инструментальной основы для рефлектометрических измерений использован оптический когерентный томограф OCS 1300 SS в режиме В-сканирования. Анализ ОКТ-изображений образцов углепластовых композитов в исходном и модифицированном состоянии показал, что ультразвуковая модификация приводит к уменьшению коэффициента обратного рассеяния зондирующего пучка в зонах контакта углеродных волокон и полимерного наполнителя. При этом максимальный эффект достигается в случае применения в качестве модифицирующего фактора ультразвукового излучения с частотой 44 кГц и плотностью мощности 10 Вт/см². В работе обсуждаются возможные физические механизмы уменьшения коэффициента обратного рассеяния, обусловленные увеличением степени однородности структуры полимерной составляющей на супрамолекулярном уровне, и критерии обнаружения неоднородностей в зонах контакта «полимер–волокно».

Ключевые слова: низкокогерентная рефлектометрия, полимерные композиционные материалы, углеродные волокна, полиэфирэфиркетон

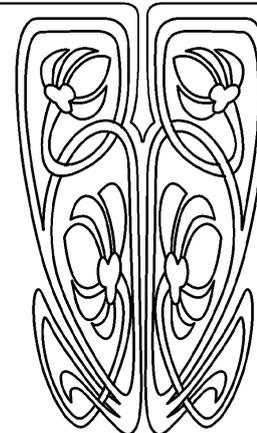
Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00039, <https://rscf.ru/project/23-79-00039/>).

Для цитирования: Алонова М. В., Злобина И. В., Бекренев Н. В., Зимняков Д. А. Анализ структурных изменений СВЧ- и УЗ-модифицированных углепластовых композитов методом низкокогерентной рефлектометрии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 31–44. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-31-44>, EDN: EIZAWY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Article

Analysis of structural changes in microwave- and ultrasound-modified carbon-fiber-reinforced polymer composites by low-coherence reflectometry

M. V. Alonova¹, I. V. Zlobina¹✉, N. V. Bekrenev¹, D. A. Zimnyakov^{1,2}

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

² Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia

Marina V. Alonova, alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>, AuthorID: 667431

Irina I. V. Zlobina, irinka_7_@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>, AuthorID: 686083

Nikolay V. Bekrenev, nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>, AuthorID: 271817

Dmitriy A. Zimnyakov, zimnykov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>, AuthorID: 29094

Abstract. Background and Objectives: Low-coherence reflectometry has traditionally been used to study the microstructure of biological tissues. Currently, the scope of its application is expanding, and the method is increasingly being employed to assess the characteristics of layered structures. The paper discusses possible physical mechanisms underlying the decrease in the scattering coefficient in the near-infrared region, attributed to an increased structural homogeneity of the polymer component at the supramolecular level. **Materials and Methods:** The low-coherence reflectometry method was applied to analyze the structure of carbon-fiber-reinforced polymer composite materials in their initial state and after microwave or ultrasonic treatment. An OSC 1300 SS optical coherence tomograph operating in B-scan mode was used as the instrumental platform for reflectometric measurements. **Results:** Analysis of the statistical and correlation characteristics of B-scan images of the surface layer of both pristine and modified composites has revealed that the modification leads to a reduction in the scattering coefficient of the probing radiation (wavelength 1300 nm) within the polymer matrix of the composite. The maximum effect is achieved when ultrasonic radiation with a frequency of 44 kHz and a power density of 10 W/cm² is used as the modifying agent. **Conclusion:** Further development of this research direction could facilitate the use of optical coherence tomography as a rapid, non-destructive method for quality control of the binder-filler interface in the surface layers of polymer composites.

Keywords: low-coherence reflectometry, polymer composite materials, carbon fibers, polyetheretherketone

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-79-00039, <https://rscf.ru/project/23-79-00039/>).

For citation: Alonova M. V., Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Zimnyakov D. A. Analysis of structural changes in microwave- and ultrasound-modified carbon-fiber-reinforced polymer composites by low-coherence reflectometry. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 31–44 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-31-44>, EDN: EIZAWY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

На протяжении последних десятилетий неуклонно отмечается рост использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) во всех ключевых отраслях экономики [1]. Наибольший стоимостной вес в общем объеме рынка имеют стекло- и углеволокна, используемые в качестве наполнителей для ПКМ [2, 3]. Кроме того, можно отметить возрастание доли композитов, сформированных на основе термопластичных матриц [4]. Преимущественно в их состав вводят в качестве армирующего компонента короткие волокна, что позволяет получать объекты с экономией времени до 80% по сравнению с изделиями, получаемыми из композитов на основе реактопластов и непрерывных волокон [5]. В настоящее время получили развитие технологии, благодаря которым становится возможным формирование полимерных композитов на основе термопластов с армированием непрерывными волокнами, что открывает дополнительные возможности по быстрому изготовлению объектов различного

назначения с заданным распределением армирующих компонентов [6]. Одним из недостатков их использования является достаточно высокая дефектность объектов, что обусловлено не всегда достаточным разогревом термопласта в процессе изготовления [7–9]. Для снижения дефектности существует ряд методов, наиболее перспективными из которых являются электрофизические методы (в частности, ультразвуковое и СВЧ-воздействие) [10–13], что обусловлено их упрочняющим влиянием на готовые объекты [13].

В связи с тем, что ПКМ в числе прочих отраслей используются в самолето-, ракетостроении, судостроении [14], особое внимание необходимо уделять обеспечению надежной и безопасной эксплуатации ответственных конструкций из них [15]. Для этого необходимо применение методов неразрушающего контроля [16], среди которых можно выделить оптические [17–19], электрические [20, 21], акустические [19, 22, 23], магнитные [24, 25], тепловые [26–28], микрорадиоволновые [29].



Каждый из этих методов имеет определенные ограничения по чувствительности, сложности аппаратного оформления и условиям проведения измерений [30].

В данной работе рассмотрен метод низкокогерентной рефлектометрии для выявления дефектов в объеме полимера и пограничных зонах между волокнами и полимерным наполнителем в композитах на основе термопласта и непрерывного углеродного волокна.

Важной составляющей реализации методов низкокогерентной рефлектометрии является использование современного программного обеспечения, предназначенного для управления системой регистрации и визуализации изучаемых областей с обеспечением необходимого разрешения, с минимальным количеством артефактов и значительным снижением искажений [31].

В [32–34] авторами была продемонстрирована эффективность этого метода при мониторинге диффузии химических агентов в dentine зуба человека. В [5] авторы показали возможность применения низкокогерентной рефлектометрии применительно к исследованию проникновения наночастиц диоксида титана в эмаль и dentin зубов человека *in vitro*. Были получены ОКТ-изображения среза зуба до и после обработки наночастицами диоксида титана. Для их количественной оценки были построены усредненные А-сканы, полученные в различные моменты времени в процессе обработки образца наночастицами диоксида титана.

Результаты ОКТ-сканирования и обработки полученных изображений позволили оценить заметное увеличение сигнала ОКТ с глубин, достигающих 300–600 мкм [35].

Авторами работы [36] оптическая когерентная томография (ОКТ) была применена для бесконтактной характеристики фантомов – тест-объектов, имитирующих оптические свойства биологических объектов [36–43]. В работе [36] фантомы изготавливались из поливинилхлорид-пластизола и силикона и использовались для моделирования оптических свойств кожи и капилляров.

Анализ литературы показал, что основное число работ по диагностическому использованию ОКТ выполнено применительно к ограниченной группе объектов преимущественно для решения диагностических задач в биологии и медицине [44–46].

Метод низкокогерентной рефлектометрии может быть применен для исследования состава

и структуры ряда объектов, которые характеризуются наличием слоев или отдельных включений, имеющих различные показатели преломления. Отметим, что объектами исследования могут служить не только биологические системы, но и системы искусственного происхождения, в частности наполненные полимеры.

1. Материалы

В исследованиях использованы образцы монослоя композита, сформированного на 3D принтере Anisoprint Composer A4 из препрега, армированного жгутом из непрерывных углеродных волокон, пропитанного эпоксидной смолой марки ЭД-20 и покрытого полиэфирэфиркетонном (ПЭЭК). Поверхность образцов, которую использовали непосредственно для исследования, представляла собой слой ПЭЭК. Ниже него располагался тонкий слой реактопластичного полимера (эпоксидная смола марки ЭД-20), в средней части располагались углеродные волокна (рис. 1).

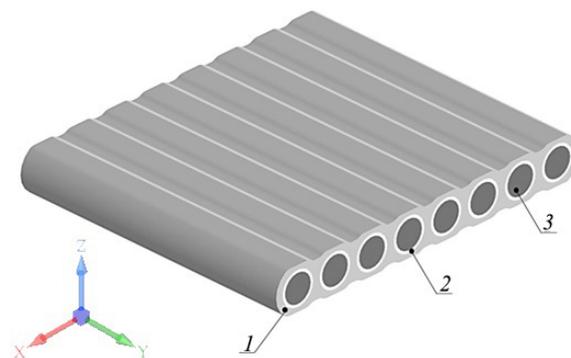


Рис. 1. Монослой полимерного композиционного материала: 1 – термопласт (ПЭЭК), 2 – реактопласт (эпоксидная смола марки ЭД-20), 3 – углеродное волокно

Fig. 1. Monolayer of polymer composite material: 1 – thermoplastic (PEEK), 2 – thermosetting plastic (ED-20 epoxy resin), 3 – carbon fiber

Были изготовлены 5 групп образцов размерами 30×10×1.2 мм: контрольные и модифицированные с применением СВЧ и ультразвуковой (УЗ) обработки. Ультразвуковую обработку образцов осуществляли на экспериментальной ультразвуковой установке с многочастотным ультразвуковым генератором, обеспечивающим частотный диапазон 20–60 кГц с дискретностью регулировки 10 Гц, что позволяет осуществлять точную настройку системы в резонанс.

В процессе обработки образец закрепляли на специальном перемещающемся столе



со встроенной пружиной нагружения. Инструмент-концентратор диаметром 14 мм, обеспечивающий перекрытие всего поперечного размера образца, подводили до касания с образцом, плавно увеличивали нагрузку до 25 Н и выдерживали в течение 15 с. Далее нагрузку снимали, а образец перемещали на расстояние 10 мм в продольном направлении так, чтобы обеспечивалось перекрытие зон воздействия не более 5 мм. Операцию повторяли до обработки всей поверхности образца. Амплитуда колебаний инструмента составляла 10–12 мкм при резонансной частоте 24.5 кГц.

Обработку образцов в СВЧ электромагнитном поле осуществляли на экспериментальных СВЧ технологических установках при частоте излучения 2450 МГц в течение 2 мин и при частоте 915 МГц в течение 10 мин. Как показали ранее проведенные исследования [47], при данных режимах обеспечивается наибольшая эффективность модификации ПКМ, армированных углеродным волокном или тканями на его основе.

Обработку образцов в СВЧ электромагнитном поле осуществляли на лабораторных СВЧ технологических установках производства НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск, Калужской обл.) и НПП «Исток» (г. Фрязино, Московской обл.).

Подробное описание структуры используемого композитного материала и методов его модификации приведено в [47–50].

2. Методы

Для инструментальной реализации метода низкокогерентной рефлектометрии был использован оптический когерентный томограф OCS 1300 SS (ThorLabs, США) с длиной волны зондирующего излучения 1300 нм, максимальной глубиной зондирования 3 мм, длиной трека сканирования 5 мм в поперечном направлении. Размер получаемых в режиме *B*-сканирования составлял 512 на 720 пикселей.

Образцы помещались на предметный столик так, что углеродные волокна располагались параллельно оси *Y* (см. рис. 1); сканирование по глубине происходило вдоль оси *Z* через слой полимера к волокнам, а поперечное сканирование осуществлялось вдоль оси *X* – перпендикулярно волокнам. Сканирование образца по глубине при фиксированном *x* формирует *A*-скан, а совокупность *A*-сканов, последовательно полученных вдоль трассы поперечного сканирования, является *B*-сканом. В качестве примера на рис. 2, а представлен *B*-скан для одного из контрольных образцов; зеленой линией отмечен выбранный для анализа *A*-скан. Соответственно, на рис. 2, б приведена зависимость амплитуды регистрируемого ОКТ-сигнала (в относительных единицах) от глубины зондирования для выбранного *A*-скана.

Отметим, что значение ОКТ-сигнала для глубины зондирования *z* определяется локальным

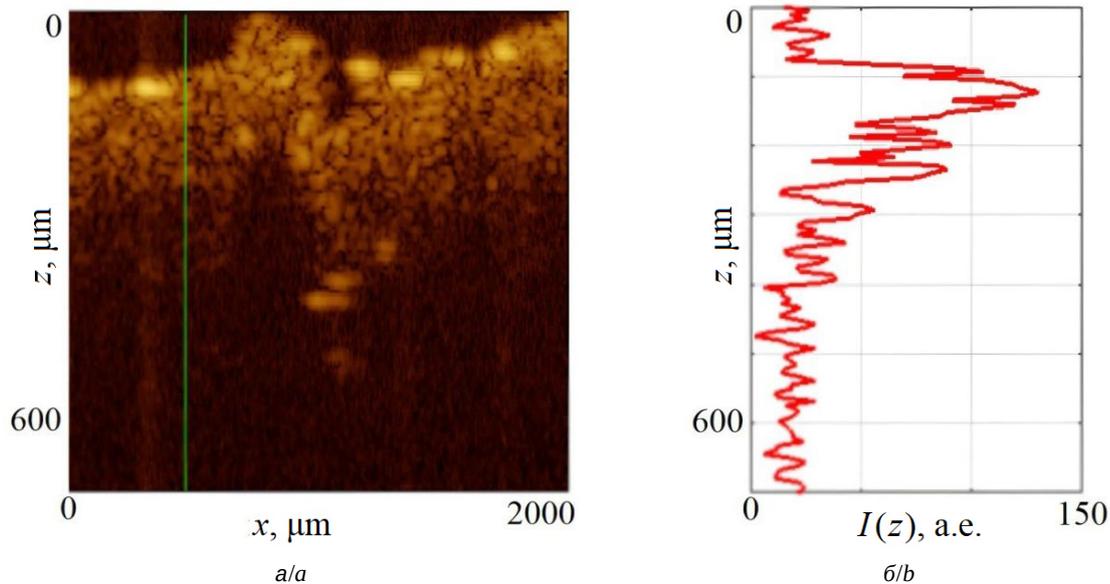


Рис. 2. Фрагмент *B*-скана исследуемого композита (а); амплитуда ОКТ-сигнала в зависимости от глубины зондирования для *A*-скана, выделенного зеленым на левой панели (б) (цвет онлайн)

Fig. 2. Fragment of a *B*-scan of the polymer under study (a); the *A*-scan value, along the line highlighted in green (b) (color online)



значением коэффициента отражения нерассеянной составляющей зондирующего пучка на заданной глубине. В то же время в регистрируемом ОКТ-сигнале присутствует значительная доля диффузно отраженного назад зондирующего излучения с выраженным флуктуационным характером (спекл-модуляцией). Таким образом, наличие в структуре выраженных границ раздела структурных составляющих с существенно различающимися значениями показателя преломления приводит к высокоамплитудным всплескам ОКТ-сигнала для значений глубины зондирования, соответствующих положениям границ раздела в образце. Флуктуационная составляющая ОКТ-сигнала характеризует вклад обратного рассеяния, связанного со случайными флуктуациями показателя преломления в зондируемом объеме. Выделение тренда зависимости амплитуды ОКТ-сигнала от глубины зондирования позволяет определить коэффициент затухания сигнала, обусловленного рассеянием зондирующего пучка в образце.

В ходе экспериментов исследовались наборы из 5 образцов, соответствующих контрольной группе и группам, подвергаемым СВЧ и УЗ модификации. Для каждого образца записывалось по 7 В-сканов с шагом смещения в поперечном направлении, равным 3 мм, в центральной области образцов. Из каждого В-скана выбиралось по 50 А-сканов, подвергаемых дальнейшему анализу, методика которого описана ниже.

По полученным наборам А- и В-сканов определялись следующие характеристики:

- 1) усредненный по глубине зондирования коэффициент затухания ОКТ-сигнала k , определяемый по выделенному из ОКТ-сигнала затухающему экспоненциальному тренду;
- 2) среднеквадратичное значение σ флуктуационной составляющей ОКТ-сигнала ($F(z)$), получаемой в результате вычитания выделенной трендовой составляющей из ОКТ-сигнала;
- 3) L^* – суммарная протяженность участков В-сканов, на которых наблюдается резкий скачок регистрируемого ОКТ-сигнала.

Нормированная флуктуационная составляющая

$$F(z) = I(z)/I_0 - \exp(-kz)$$

характеризует локальные отклонения интенсивности регистрируемого ОКТ-сигнала от экспоненциального тренда и обусловленную многократным рассеянием спекл-модуляцию сигнала.

3. Результаты и их обсуждение

Анализ полученных В-сканов показывает различия в ОКТ сигналах, получаемых на образцах контрольной группы и СВЧ- и УЗ-модифицированных образцах. На рис. 3–7 представлены типичные зависимости амплитуды ОКТ-сигналов от глубины зондирования для участков образцов, на которых присутствует только полимерный наполнитель и отсутствуют углеродные волокна.

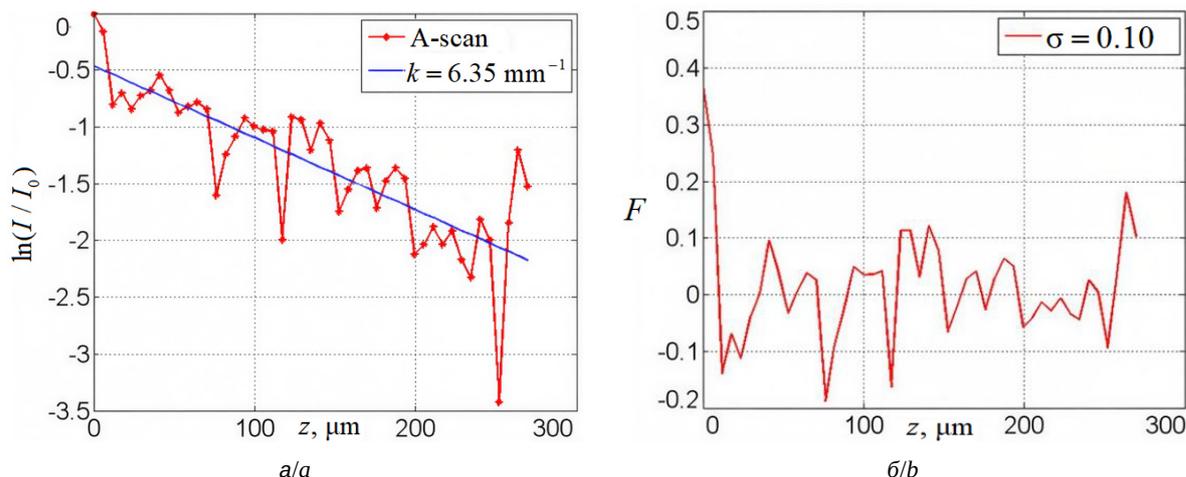


Рис. 3. Данные для контрольного образца композитного материала: ОКТ-сигнал и экспоненциальная аппроксимация с коэффициентом затухания $k = 6.35 \text{ мм}^{-1}$ (а); флуктуационная составляющая ОКТ-сигнала, характеризующаяся среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.10$ (б) (цвет онлайн)

Fig. 3. Data for the control sample of the composite material: OCT response and exponential approximation with an attenuation coefficient $k = 6.35 \text{ mm}^{-1}$ (a); A-scan fluctuation relative to the exponential trend with a standard deviation $\sigma = 0.10$ (color online)

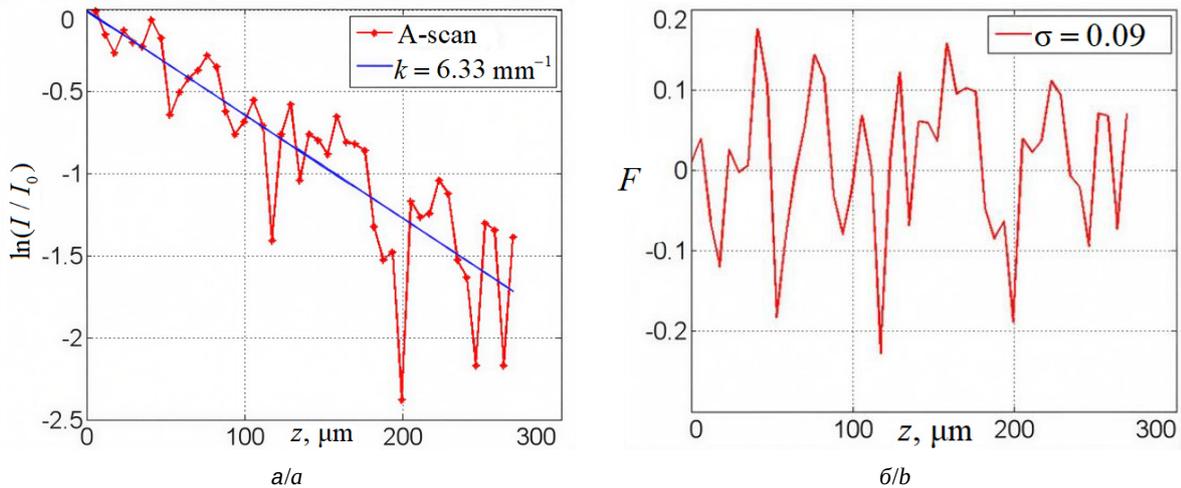


Рис. 4. Данные для образца, модифицированного воздействием СВЧ-излучения частотой 915 МГц: ОКТ-отклик и экспоненциальная аппроксимация с коэффициентом затухания $k = 6.33 \text{ мм}^{-1}$ (а); флуктуация А-скана относительно экспоненциального тренда со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.09$ (б) (цвет онлайн)

Fig. 4. Data for a sample modified by exposure to 915 MHz microwave radiation: OCT response and exponential approximation with an attenuation coefficient $k = 6.33 \text{ mm}^{-1}$ (a); A-scan fluctuation relative to the exponential trend with a standard deviation $\sigma = 0.09$ (b) (color online)

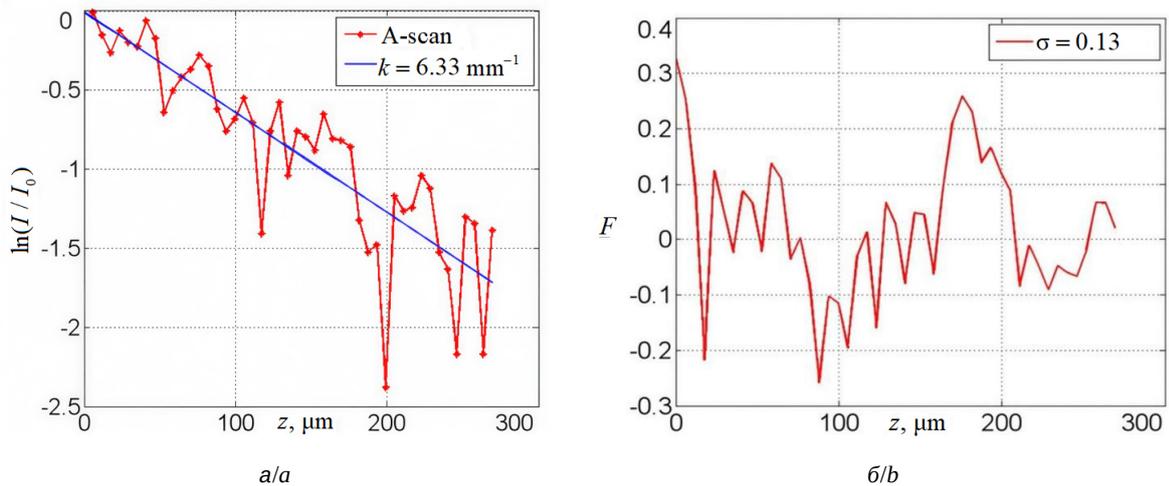


Рис. 5. Данные для образца, модифицированного под воздействием СВЧ-излучения частотой 2450 МГц: ОКТ-отклик и экспоненциальная аппроксимация с коэффициентом затухания $k = 6.33 \text{ мм}^{-1}$ (а); флуктуация А-скана относительно экспоненциального тренда со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.13$ (б) (цвет онлайн)

Fig. 5. Data for a sample modified by exposure to microwave radiation with a frequency of 2450 MHz: OCT response and exponential approximation with an attenuation coefficient $k = 6.33 \text{ mm}^{-1}$ (a); A-scan fluctuation relative to the exponential trend with a standard deviation $\sigma = 0.13$ (b) (color online)

На рис. 3, а – 7, а также присутствуют аппроксимирующие трендовые линии $I(z) = I_0 \exp(-kz)$, где I_0 – подгоночный коэффициент (синие линии). На рис. 3, б – 7, б представлены флуктуационные составляющие полученных ОКТ-сигналов с соответствующими значениями σ .

Для анализа морфологических изменений, происходящих в полимерной составляющей композитного материала, использовался получаемый в результате выделения экспоненциального трен-

да коэффициент затухания k . Анализ полученных В-сканов поверхностного слоя исходной и модифицированной составляющей композитов показал, что модификация приводит к незначительному снижению коэффициента затухания зондирующего излучения k на длине волны 1300 нм в полимерной составляющей (рис. 8).

В результате обработки композиционного материала различными модифицирующими воздействиями незначительно изменяются оптические

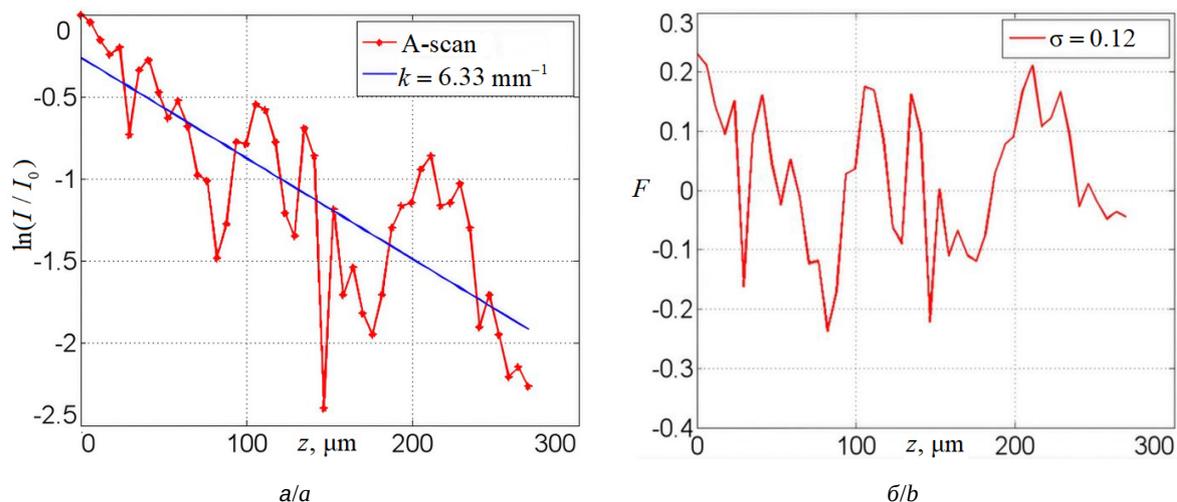


Рис. 6. Данные для образца, модифицированного под воздействием ультразвукового излучения частотой 22 кГц: ОКТ-отклик и экспоненциальная аппроксимация с коэффициентом затухания $k = 6.13 \text{ мм}^{-1}$ (а); флуктуация А-скана относительно экспоненциального тренда со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.12$ (б) (цвет онлайн)

Fig. 6. Data for a sample modified by ultrasonic radiation with a frequency of 22 kHz: OCT response and exponential approximation with an attenuation coefficient $k = 6.13 \text{ mm}^{-1}$ (a); A-scan fluctuation relative to the exponential trend with a standard deviation $\sigma = 0.12$ (b) (color online)

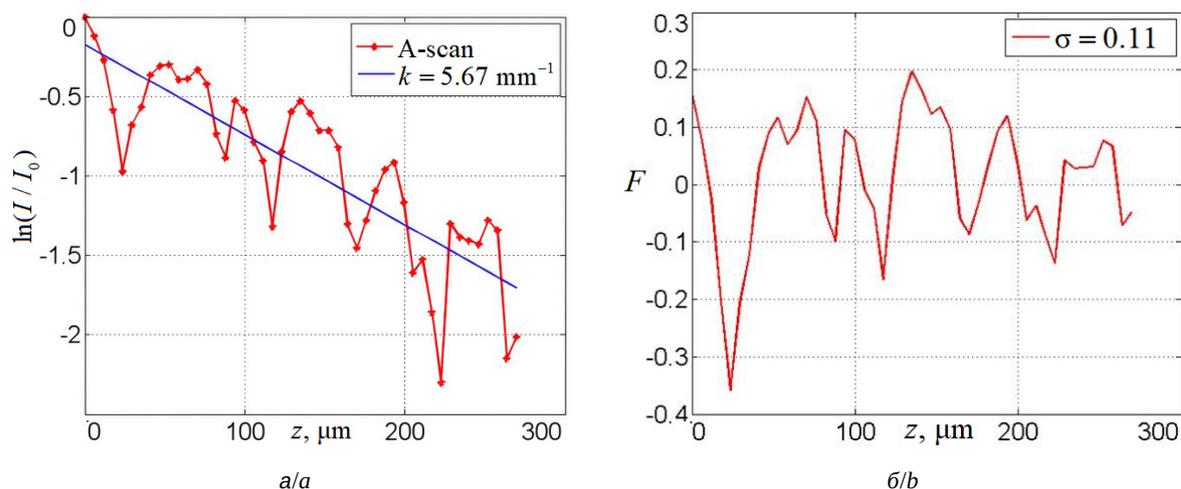


Рис. 7. Данные для образца, модифицированного под воздействием ультразвукового излучения частотой 44 кГц: ОКТ-отклик и экспоненциальная аппроксимация с коэффициентом затухания $k = 5.67 \text{ мм}^{-1}$ (а); флуктуация А-скана относительно экспоненциального тренда со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.11$ (б) (цвет онлайн)

Fig. 7. Data for a sample modified by ultrasonic radiation with a frequency of 44 kHz: OCT response and exponential approximation with an attenuation coefficient $k = 5.67 \text{ mm}^{-1}$ (a); A-scan fluctuation relative to the exponential trend with a standard deviation $\sigma = 0.11$ (b) (color online)

свойства слоя полимера. Коэффициент затухания, который определяется рассеянием света в образце, в среднем уменьшается на 11% при обработке ультразвуком на частоте 44 кГц, на 3% при обработке ультразвуком на частоте 22 кГц, на 10.5% при воздействии СВЧ излучения частотой 2450МГц и увеличивается на 0.55% при обработке СВЧ на частоте 915МГц.

При этом максимальный эффект достигается в случае применения в качестве модифицирующего

фактора ультразвукового излучения с частотой 44 кГц и плотностью мощности 10 Вт/см^2 . Возможный физический механизм убывания коэффициента затухания в ближней ИК области связан с повышением уровня однородности структуры полимерной составляющей на супрамолекулярном уровне (и, соответственно, уменьшением коэффициента рассеяния зондирующего излучения в слое полимера).

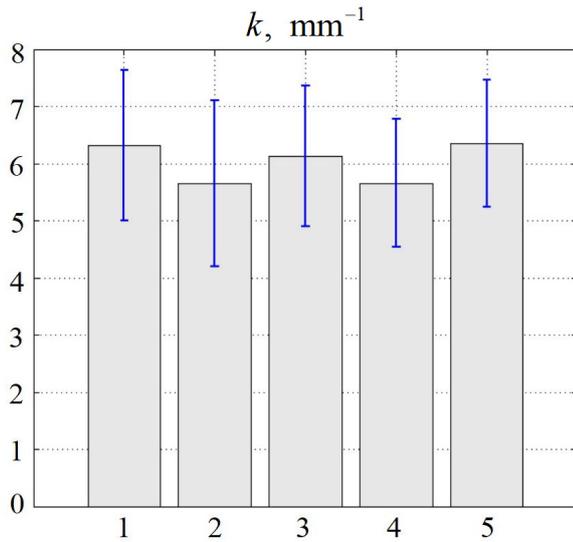


Рис. 8. Значения коэффициента затухания k : 1 – для контрольных образцов; 2, 3 – для образцов, прошедших обработку ультразвуком на частотах 44 и 22 кГц соответственно; 4, 5 – для образцов, модифицированных с помощью СВЧ излучения на частотах 2450 и 915 МГц соответственно

Fig. 8. Values of the attenuation coefficient k : 1 – for control samples; 2, 3 – for samples treated with ultrasound at the frequencies of 44 and 22 kHz; 4, 5 – for samples modified using microwave radiation at the frequencies of 2450 and 915 MHz

Среднеквадратичные значения флуктуаций ОКТ-сигналов (рис. 9) снижаются по сравнению с данными контрольного образца на 11.2% для образцов, обработанных на частоте 915 МГц, на 4.3% для образцов, прошедших обработку на частоте 2450 МГц, на 7.5% для материалов, модифицированных ультразвуком на частоте 22 кГц и на 2.5% для обработки на частоте 44 кГц. Соответственно, можно сделать вывод, что СВЧ и УЗ модификация полимерной составляющей в образцах композита не приводят к существенным изменениям коэффициента затухания зондирующего излучения в полимерной основе композита. Аналогичным образом несущественно изменяется среднеквадратичное значение флуктуационной составляющей, обусловленной эффектом спекл-модуляции ОКТ-сигнала вследствие многократного рассеяния.

В то же время было установлено, что эффект модификации проявляется в существенном изменении характера отражения зондирующего излучения на границах раздела «углеродное волокно – полимерная составляющая» в объеме образца. В частности, существенно уменьшается амплитуда всплесков ОКТ-сигнала на этих границах (рис. 10). Для количественных оценок этого

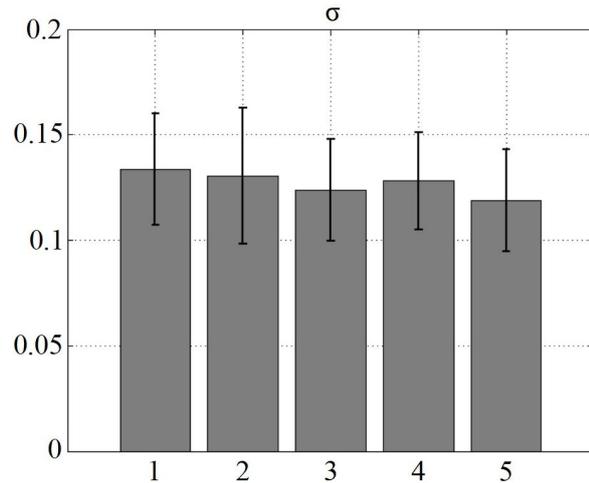


Рис. 9. Среднеквадратичные значения σ флуктуаций ОКТ-сигнала: 1 – для контрольных образцов; 2, 3 – для образцов, прошедших обработку ультразвуком на частотах 44 и 22 кГц соответственно; 4, 5 – для образцов, модифицированных с помощью СВЧ излучения на частотах 2450 и 915 МГц соответственно

Fig. 9. Values of the standard deviation σ of A-scan fluctuations: 1 – from the exponential trend for control samples; 2, 3 – for samples treated with ultrasound at frequencies of 44 and 22 kHz; 4, 5 – for samples modified using microwave radiation at frequencies of 2450 (4) and 915 MHz

эффекта для полученных В-сканов использовались отношения суммарной длины участков L^* , на которых идентифицируются границы раздела «волокно – полимер», к длине трассы сканирования L (рис. 10).

На рис. 10, а представлен фрагмент В-скана образца с ярко выраженными участками границ раздела «полимер-волокно». В то же время на рис. 10, б высокоамплитудные всплески ОКТ-сигнала в объеме зондируемого образца практически отсутствуют (изменение показателя преломления материала в областях вблизи границы раздела имеет плавный характер, и высокоамплитудные всплески ОКТ-сигнала существенно сглаживаются). Эта особенность предположительно обусловлена частичной диффузией полимера в объем углеродных волокон в результате модификации.

При анализе полученных значений наблюдаются существенные отличия характеристик модифицированных и контрольных образцов по введённому критерию L^*/L (рис. 11), т. е. относительная протяженность ярко выраженных границ после модификации значительно уменьшается. Анализ полученных данных показал снижение (по сравнению с контрольными образцами): на 70% для образцов после УЗ обработки на частоте 22 кГц, на 68% для образцов после СВЧ

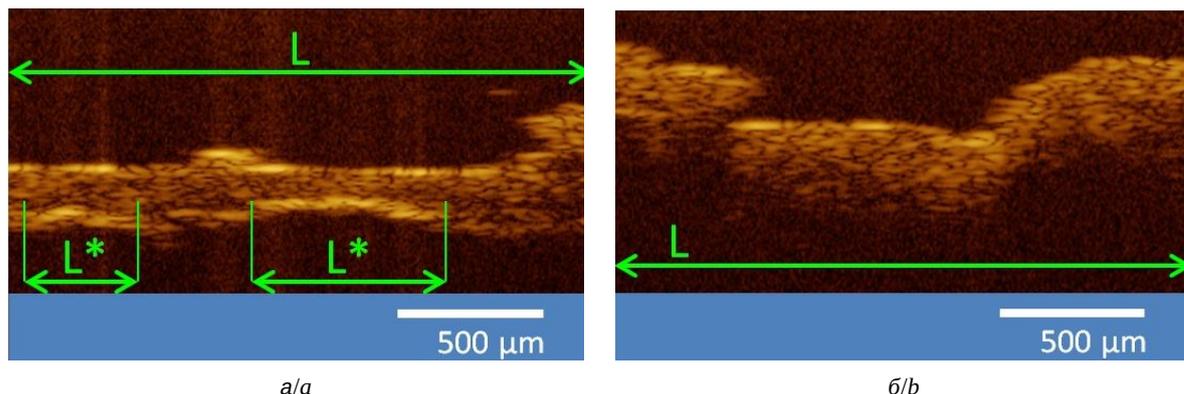


Рис. 10. Фрагменты В-скана контрольного образца (а) и прошедшего обработку СВЧ излучением на частоте 2450 МГц (б) (цвет онлайн)

Fig. 10. Fragments of the B-scan of the control sample (a) and the one processed by microwave radiation at a frequency of 2450 MHz (b) (color online)

обработки на частоте 2450 МГц, на 42% для образца, прошедшего УЗ обработку на частоте 44 кГц, на 40% при СВЧ обработке на частоте 915 МГц.

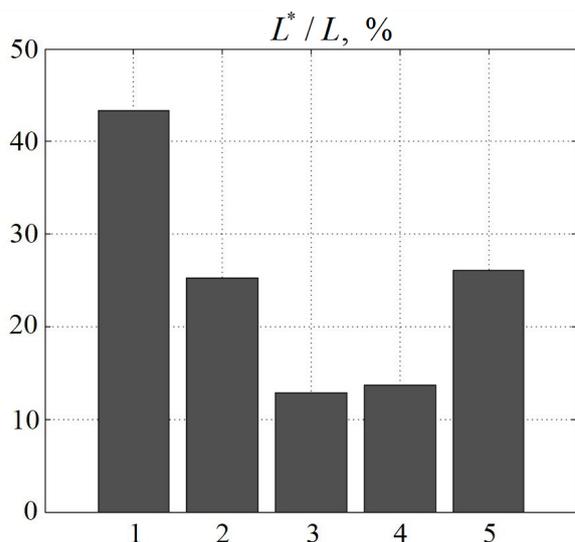


Рис. 11. Значения относительной протяженности фрагментов границы с резким скачком ОКТ-сигнала: 1 – для контрольных образцов; 2, 3 – для образцов, прошедших обработку ультразвуком на частотах 44 и 22 кГц соответственно; 4, 5 – для образцов, модифицированных с помощью СВЧ излучения на частотах 2450 и 915 МГц

Fig. 11. Values of the relative length of boundary fragments with a sharp jump in the refractive index to the total length of the sample: 1 – for control samples; 2, 3 – for samples treated with ultrasound at frequencies of 44 and 22 kHz respectively; 4, 5 – for samples modified using microwave radiation at frequencies of 2450 and 915 MHz

В таблице систематизированы результаты проведенного анализа В-сканов. Это дает возможность сопоставить данные, выявить закономерности и определить наиболее информативные параметры для количественной оценки эффективности электрофизической обработки образцов.

Цифрами обозначены: 1 – контрольные образцы; 2 – образцы, прошедшие обработку ультразвуком на частоте 44 кГц; 3 – образцы, прошедшие обработку ультразвуком на частоте 22 кГц; 4 – образцы, модифицированные с помощью СВЧ излучения на частоте 2450 МГц; 5 – образцы, модифицированные с помощью СВЧ излучения на частоте 915 МГц.

Результаты оценки диагностических параметров для контрольных и модифицированных образцов углепластового композита, исследованных методом низкокогерентной рефлектометрии

Summary table of the results of evaluation of optical parameters of carbon fiber reinforced plastic, which were studied by the low-coherence reflectometry method

Образец / Sample	k, mm^{-1}	σ	$L^*/L, \%$
1	6.31 ± 1.32	0.13 ± 0.02	43.33
2	5.65 ± 1.44	0.13 ± 0.03	25.23
3	6.13 ± 1.23	0.12 ± 0.02	12.88
4	5.65 ± 1.11	0.12 ± 0.02	13.71
5	6.35 ± 1.10	0.11 ± 0.02	26.07

Выводы

В работе представлены результаты исследования идентифицируемых с помощью низкокогерентной рефлектометрии структурных изменений, происходящих в полимерных композитных материалах при их модификации ультразвуковым и СВЧ воздействием. Полученные данные позволяют сделать вывод о несущественных изменениях коэффициента затухания и среднеквадратичного значения флуктуационной составляющей регистрируемого ОКТ-сигнала. Напротив,



в результате модификации существенно уменьшается относительная протяженность идентифицируемых участков границ раздела «углеродное волокно – полимер».

Выявленные особенности структуры ПМК после модификации состоят в следующем.

1. При электрофизической обработке на различных режимах коэффициент затухания в среднем незначительно уменьшается по сравнению с контрольным образцом. Это может свидетельствовать о небольшом возрастании степени однородности структуры полимерной матрицы. Наиболее существенное уменьшение наблюдается для образцов, обработанных ультразвуком на частоте 44 кГц, и составляет 14,5% от коэффициента затухания для контрольных образцов.

2. Среднеквадратичные значения флуктуационной составляющей сигнала изменяются в интервале 2,5–11,2% в сравнении с контрольным образцом.

3. В результате модификации уменьшается относительная протяженность участков границ раздела «углеродное волокно – полимер», идентифицируемых по резким скачкам ОКТ- сигнала. Наибольший эффект достигается при СВЧ модификации на частоте 2450 МГц; при этом относительная протяженность идентифицируемых участков составляет $\approx 0,13$, что в $\approx 3,4$ раза меньше соответствующей величины для контрольного образца.

Примененный метод исследования может быть использован для анализа морфологических изменений образцов полимерных композиционных материалов в результате различных модифицирующих воздействий.

Список литературы

1. Филатов А. И. Мировой рынок полимерных композиционных материалов: состояние, тенденции, перспективы. Ч. 3 // Полимерные материалы. 2025. № 7 (314). С. 24–29.
2. JEC Observer. Overview of the global composites market // JEC Composite Magazine. 2019. Special Issue. P. 60.
3. JEC Observer. Overview of the global composites market 2023–2028 // JEC Composite Magazine. 2024. Special Issue. P. 60.
4. JEC Observer. Overview of the global composites market 2024–2029 // JEC Composite Magazine. 2025. Special Issue. P. 72.
5. Fitch Solutions downgrades global steel price forecast for 2024 : [сайт]. URL: <https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/fitch-solutions-downgrades-global-steel-price-forecast-for-2024-1356645.htm> (дата обращения: 30.05.2025).
6. Сотов А. В., Зайцев А. И., Абдрахманова А. Э., Попович А. А. Аддитивное производство непрерывно армированных полимерных композитов с использованием промышленных роботов : обзор // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2024. Т. 18, № 1. С. 20–30. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-20-30>
7. Чулков А. О., Вавилов В. П., Кладов Д. Ю., Юркина В. А. Тепловой неразрушающий контроль композиционных и металлических деталей, изготовленных методом аддитивных технологий // Дефектоскопия. 2022. № 11. С. 50–55. <https://doi.org/10.31857/S0130308222110069>
8. Торубаров И. С. Технология аддитивного производства изделий с повышенными механическими характеристиками, армированных непрерывным волокном по пространственным траекториям : дис. ... канд. техн. наук: 2.5.6 / Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2024. 160 с.
9. Шкуро А. Е., Кривоногов П. С. Технологии и материалы 3D-печати : учеб. пособие. Екатеринбург : Издательство Уральского государственного лесотехнического университета, 2017. 99 с.
10. Галыгин В. Е., Баронин Г. С., Таров В. П., Завражин Д. О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов : учеб. пособие. Тамбов : Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2012. 180 с.
11. Jamora C., Rauch V., Kravchenko S. G., Kravchenko O. G. Effect of resin bleed out on compaction behavior of the fiber tow gap region during automated fiber placement manufacturing // Polymers. 2023. Vol. 16, № 31. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym16010031>
12. Lionetto F., Dell'Anna R., Montagna F., Maffezzoli A. Ultrasonic assisted consolidation of commingled thermoplastic/glass fiber rovings // Front. Mater. 2015. Vol. 2. P. 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00032>
13. Nurullaev E. M., Oniskiv V. D. Mechanical characteristics of a polymer composite material based on gamma-irradiated low-molecular-weight rubbers // Radiat. Chem. 2021. Vol. 55. P. 150–154. <https://doi.org/10.1134/S0018143921020107>
14. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие / под ред. А. А. Берлина. 3-е изд., испр. СПб. : Профессия, 2011. 560 с.
15. Барашков Н. Н. Полимерные композиты: получение, свойства, применение / отв. ред. Я. М. Колотыркин, Ю. К. Годовский. М. : Наука, 1984. 128 с.
16. Алешин Н. П., Григорьев М. В., Щипаков Н. А. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ // Инженерный вестник. 2015. № 1. С. 233–238. EDN: TQMOVN
17. Федотов М. Ю. Теоретические исследования встроенной волоконно-оптической системы контроля деформации и температуры полимерных композитов //



- Контроль и диагностика. 2023. № 5. С. 14–25. <https://doi.org/10.14489/td.2023.05.pp.014-025>
18. Януш О. В., Деркачева О. Ю., Гусарова Т. С. Оптическая спектроскопия полимеров : учеб. пособие. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2017. 47 с.
 19. Еремин А. В. Мониторинг оптическим и акустическим методами состояния армированных полимерных и металлических материалов при усталостном разрушении : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2018. 166 с.
 20. Михеев П. В., Бухаров С. В., Лебедев А. К., Сундер Р. Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов методом вихретоковой дефектоскопии в процессе циклического нагружения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 11. С. 1–13. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2314>
 21. Маркевич И. А., Дрокин Н. А., Селютин Г. Е. Исследование методом импедансной спектроскопии полимерного композита с углеродными нанотрубками в контакте с электролитом // ЖТФ. 2019. Т. 89, вып. 9. С. 1400–1405. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.09.48066.42-19>
 22. Буй Ван Донг. Акустический контроль композитных материалов малоракурсным теневым методом : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2015. 145 с.
 23. Bashkov O. V., Protsenko A. E., Bryanskii A. A., Romashko R. V. Diagnostics of polymer composite materials and analysis of their production technology by using the method of acoustic emission // Mech. Compos. Mater. 2017. Vol. 53. P. 533–540. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9683-7>
 24. Баршутина М. Н., Баршутин С. Н. Магнитно-полевой резонансно-туннельный метод измерения концентрации наночастиц в полимерных композитах // Вестник ТГТУ. 2018. Т. 24, № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2018.01.pp.024-029>
 25. Мельников Г. Ю., Лепаловский В. Н., Курляндская Г. В. Магнитный импеданс пленочных наноструктур для оценки полей рассеяния микрочастиц магнитных композитов // ЖТФ. 2022. Т. 92, вып. 2. С. 321–326. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.02.52024.259-21>
 26. Ходакова Н. Н., Самойленко В. В., Блазнов А. Н., Бычин Н. В. Термоаналитические исследования полимерного композиционного материала // Ползуновский вестник. 2016. № 4–1. С. 218–224. EDN: YHХHJ
 27. Антюфеева Н. В., Славин А. В., Большаков В. А. Практическое применение термического анализа при разработке и исследовании полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 25–27. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-25-27>
 28. Майникова Н. Ф. Методы и средства неразрушающего теплового контроля температурно-временных характеристик структурных превращений в полимерных материалах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13 / Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2007. 33 с.
 29. Мищенко С. В., Малков Н. А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов : учеб. пособие. Тамбов : Издательство ТГТУ, 2003. 128 с.
 30. Андреев И. Д., Лобанова И. С. Методы неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. С. 295–296. EDN: WTNTIN
 31. Гуров И. П., Жукова Е. В., Маргарянц Н. Б. Исследование внутренней микроструктуры материалов методом оптической когерентной микроскопии с перестраиваемой длиной волны // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3 (79). С. 40–45.
 32. Trunina N. A., Lychagov V. V., Tuchin V. V. OCT monitoring of diffusion of clearing agents within tooth dentin // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7443. Art. 74432D. <https://doi.org/10.1117/12.828646>
 33. Trunina N. A., Lychagov V. V., Tuchin V. V. OCT monitoring of diffusion of water and glycerol through tooth dentin in different geometry of wetting // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7563. Art. 75630U. <https://doi.org/10.1117/12.848585>
 34. Трунина Н. А., Лычагов В. В., Тучин В. В. Исследование диффузии воды через дентин зуба человека методом оптической когерентной томографии // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109, № 2. С. 190–196. EDN: MTJCGV
 35. Трунина Н. А., Тучин В. В. Визуализация проникновения наночастиц TiO₂ в ткани зуба человека методом оптической когерентной томографии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2011. Т. 11, вып. 2. С. 5–9. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2011-11-2-5-9>
 36. Быков А. В., Волков М. В., Вольинский М. А., Гуров И. П., Киннунен М., Маргарянц Н. Б., Попов А. П. Изготовление тканемитирующих фантомов и капилляров и их исследование методом оптической когерентной томографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 98–103.
 37. Bini M., Ignesti A., Millanta L., Olmi R., Rubino N., Vanni R. The polyacrylamide as a phantom material for electromagnetic hyperthermia studies // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1984. Vol. 31, iss. 3. P. 317–322. <https://doi.org/10.1109/TBME.1984.325271>
 38. Surowiec A., Shrivastava P., Astrahan M., Petrovick Z. Utilization of a multilayer polyacrylamide phantom for evaluation of hyperthermia applicators // Int. J. Hyperthermia. 1992. Vol. 8, iss. 6. P. 795–807. <https://doi.org/10.3109/02656739209005027>
 39. Royston D., Poston R., Prah S. Optical properties of scattering and absorbing materials used in the development of optical phantoms at 1064 nm // J. Biomed. Opt. 1996. Vol. 1, iss. 1. P. 110–116. <https://doi.org/10.1117/12.227698>



40. Iizuka M., Sherar M., Vitkin I. Optical phantom materials for near infrared laser photocoagulation studies // *Lasers Surg. Med.* 1999. Vol. 25, iss. 2. P. 159–169. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9101\(1999\)25:2<159::aid-lsm10>3.0.co;2-v](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9101(1999)25:2<159::aid-lsm10>3.0.co;2-v)
41. Kharine A., Manohar S., Seeton R., Kolkman R., Bolt R., Steenbergen W., de Mul F. Poly(vinyl alcohol) gels for use as tissue phantoms in photoacoustic mammography // *Phys. Med. Biol.* 2003. Vol. 48, iss. 3. P. 357–370. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/3/306>
42. De Korte C. L., Céspedes E. I., van der Steen A. F., Norder B., te Nijenhuis K. Elastic and acoustic properties of vessel mimicking material for elasticity imaging // *Ultrason. Imaging.* 1997. Vol. 19, iss. 2. P. 112–126. <https://doi.org/10.1177/016173469701900202>
43. Tomlins P., Woolliams P., Tedaldi M., Beaumont A., Hart C. Measurement of the 3D point-spread function in an OCT imaging system // *Proc. SPIE.* 2008. Vol. 6847. Art. 68472Q. <https://doi.org/10.1117/12.766576>
44. Zeppieri M., Marsili S., Enaholo E. S., Shuaibu A. O., Uwagboe N., Salati C., Spadea L., Musa M. Optical Coherence Tomography (OCT): A Brief Look at the Uses and Technological Evolution of Ophthalmology. *Medicina (Kaunas)*. 2023. Vol. 3, iss. 12. art. 2114. <https://doi.org/10.3390/medicina59122114>
45. Varghese M., Varghese S., Preethi S. Revolutionizing medical imaging: A comprehensive review of optical coherence tomography (OCT). *Journal of Optics.* 2025. Vol. 54, iss. 3. P. 1178–1195. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01765-6>
46. Bouma B. E., de Boer J. F., Huang D., Jang I. K., Yonetsu T., Leggett C. L., Leitgeb R., Sampson D. D., Suter M., Vakoc B., Villiger M., Wojtkowski M. Optical coherence tomography. *Nat. Rev. Methods Primers.* 2022. Vol. 2. Art. 79. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00162-2>
47. Злобина И. В., Бекренев Н. В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2022. Т. 22, вып. 2. С. 158–169. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-158-169>
48. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Чуриков Д. О. Эффективность влияния СВЧ-излучения и конвекционного нагрева на релаксацию внутренних напряжений в отвержденных полимерных композиционных материалах // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2025. Т. 25, вып. 2. С. 230–241. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241>
49. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Игнатьев М. А. Анализ особенностей микроструктуры полимерной матрицы в составе ПКМ, сформированных под влиянием электрофизических воздействий // *Пластические массы.* 2024. № 2. С. 12–16. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-02-12-16>
50. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Егоров А. С. Влияние электрофизических воздействий на микроструктуру торцевой поверхности отвержденного монослоя // *Конструкции из композиционных материалов.* 2024.

№ 1 (173). С. 29–35. <https://doi.org/10.52190/2073-2562-2024-1-29>

References

1. Filatov A. I. The global market of polymer composite materials: State, trends, prospects. Part 3. *Polimernye Materialy* [Polymer materials]. 2025, no. 7 (314), pp. 24–29 (in Russian).
2. JEC Observer. Overview of the global composites market. *JEC Composite Magazine*, 2019, Spec. iss., pp. 60.
3. JEC Observer. Overview of the global composites market 2023–2028. *JEC Composite Magazine*, 2024, Spec. iss., pp. 60.
4. JEC Observer. Overview of the global composites market 2024–2029. *JEC Composite Magazine*, 2025, Spec. iss., pp. 72.
5. *Fitch Solutions downgrades global steel price forecast for 2024*. Site. Available at: <https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/fitch-solutions-downgrades-global-steel-price-forecast-for-2024-1356645.htm> (accessed May 30, 2025).
6. Sotov A. V., Zaitsev A. I., Abdrakhmanova A. E., Popovich A. A. Additive manufacturing of continuously reinforced polymer composites using industrial robots: A review. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya* [Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2024, vol. 18, no. 1, pp. 20–30 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-20-30>
7. Chulkov A. O., Vavilov V. P., Klodov D. Yu., Yurkina V. A. Thermal non-destructive testing of composite and metallic parts manufactured by using additive technologies. *Defektoskopiya* [Flaw detection], 2022, no. 11, pp. 50–55 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0130308222110069>
8. Torubarov I. S. *Technology of additive manufacturing of parts with enhanced mechanical properties, continuously fiber-reinforced along spatial trajectories*. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Volgograd, 2024. 160 p. (in Russian).
9. Shkuro A. E., Krivonogov P. S. *Tekhnologii i materialy 3D-pechati* [3D printing technologies and materials: Textbook]. Ekaterinburg, Ural State Forest Engineering University Publ., 2017. 99 p. (in Russian).
10. Galygin V. E., Baronin G. S., Tarov V. P., Zavrzhin D. O. *Sovremennye tekhnologii polucheniya i pererabotki polimernykh i kompozitsionnykh materialov* [Modern technologies for production and processing of polymeric and composite materials: Textbook]. Tambov, TGTU Publ., 2012. 180 p. (in Russian).
11. Jamora C., Rauch V., Kravchenko S. G., Kravchenko O. G. Effect of resin bleed out on compaction behavior of the fiber tow gap region during automated fiber placement manufacturing. *Polymers*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym16010031>
12. Lionetto F., Dell'Anna R., Montagna F., Maffezzoli A. Ultrasonic assisted consolidation of commingled thermoplastic/glass fiber rovings. *Frontiers in Materials*, 2015, vol. 2, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00032>



13. Nurullaev E. M., Oniskiv V. D. Mechanical characteristics of a polymer composite material based on gamma-irradiated low-molecular-weight rubbers. *High Energy Chemistry*, 2021, vol. 55, pp. 150–154. <https://doi.org/10.1134/S0018143921020107>
14. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology. Ed/ by A. A. Berlin. 3rd ed.]. Saint Petersburg, Professiya, 2011. 560 p.
15. Barashkov N. N. *Polimernye kompozity: poluchenie, svoystva, primenenie* [Polymer Composites: Production, Properties, Applications. Ed. by Ya. M. Kolotyrykin, Yu. K. Godovskii]. Moscow, Nauka, 1984. 128 p. (in Russian).
16. Aleshin, N. P., Grigoryev, M. V., Shchipakov, N. A. Modern equipment and technologies for non-destructive testing of polymer composites. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, no. 1, pp. 233–238 (in Russian). EDN: TQMOBH
17. Fedotov M. Yu. Theoretical researches of the embedded fiber-optic system of testing deformation and temperature of polymer composites. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2023, no. 5, pp. 14–25 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/td.2023.05.pp.014-025>
18. Yanush O. V., Derkacheva O. Yu., Gusarova T. S. *Opticheskaya spektroskopiya polimerov* [Optical Spectroscopy of Polymers: Textbook]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design Publ., 2017. 47 p.
19. Eremin A. V. *Monitoring the condition of reinforced polymeric and metallic materials under fatigue failure by optical and acoustic methods*. Diss. ... Cand. Sci. (Eng.). Tomsk, 2018. 166 p. (in Russian).
20. Mikheev P. V., Bukharov S. V., Lebedev A. K., Sunder R. The eddy current flaw detection non-destructive testing of polymer composite materials in cyclic loading. *Inzhenernyi Zhurnal: Nauka i Innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2023, no. 11, pp. 1–13 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2314>
21. Markevich I. A., Selyutin G. E., Drokin N. A. Impedance spectroscopy study of a polymer composite with carbon nanotubes in contact with an electrolyte. *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 9, pp. 1324–1329. <https://doi.org/10.1134/S1063784219090093>
22. Bui Van Dong. *Acoustic inspection of composite materials by a limited-angle shadow method*. Diss. ... Cand. Sci. (Eng.). Tomsk, 2015. 145 p. (in Russian).
23. Bashkov O. V., Protsenko A. E., Bryanskii A. A., Romashko R. V. Diagnostics of Polymer Composite Materials and Analysis of Their Production Technology by Using the Method of Acoustic Emission. *Mech. Compos. Mater.*, 2017, vol. 53, pp. 533–540. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9683-7>
24. Barshtutina M. N., Barshtutin S. N. A magnetic field resonant tunneling method for measuring the concentration of the nanoparticles in the polymer composites. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 24–29 (in Russian). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2018.01.pp.024-029>
25. Melnikov G. Yu., Lepalovskij V. N., Kurlyandskaya G. V. Magnetic impedance of film nanostructures for stray magnetic field evaluation of microparticles in magnetic composites. *Technical Physics*, 2023, vol. 68 (Suppl. 3), pp. S568–S573. <https://doi.org/10.1134/S1063784223900875>
26. Khodakova N. N., Samoilenko V. V., Blaznov A. N., Bychin N. V. Thermoanalytical studies of a polymer composite material. *Polzunovskiy vestnik*, 2016, no. 4–1, pp. 218–224. EDN: YHXHJJ
27. Antyufeeva N. V., Slavin A. V., Bolshakov V. A. Practical application of thermal analysis in the development and study of polymer composites. *Plasticheskie Massy*, 2019, no. 3–4, pp. 25–27. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-25-27> (in Russian).
28. Maiknikova N. F. *Methods and means of non-destructive thermal monitoring of temperature-time characteristics of structural transformations in polymeric materials*. Thesis Diss. ... Dr. Sci. (Eng.). Tambov, 2007. 35 p. (in Russian).
29. Mishchenko S. V., Malkov N. A. *Proektirovanie radiovolnovykh (SVCh) priborov nerazrushayushchego kontrolya materialov: Uchebnoe posobie* [Design of radio-wave (microwave) instruments for non-destructive material testing: Textbook]. Tambov, TGTU Publ., 2003. 128 p. (in Russian).
30. Andreev I. D., Lobanova I. S. Non-destructive testing methods of composite materials. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current Issues in Aviation and Cosmonautics], 2016, vol. 1, pp. 295–296 (in Russian). EDN: WTNTIN
31. Gurov I. P., Zhukova E. V., Margaryants N. B. Investigation of materials internal microstructure by optical coherence microscopy with a tunable wavelength. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 3 (79), pp. 40–45 (in Russian).
32. Trunina N. A., Lychagov V. V., Tuchin V. V. OCT monitoring of diffusion of clearing agents within tooth dentin. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7443, art. 74432D. <https://doi.org/10.1117/12.828646>
33. Trunina N. A., Lychagov V. V., Tuchin V. V. OCT monitoring of diffusion of water and glycerol through tooth dentin in different geometry of wetting. *Proc. SPIE*. 2010, vol. 7563, art. 75630U. <https://doi.org/10.1117/12.848585>
34. Trunina N. A., Lychagov V. V., Tuchin V. V. Study of water diffusion in human dentin by optical coherent tomography. *Optics and Spectroscopy*, 2010, vol. 109, no 2, pp. 162–168. <https://doi.org/10.1134/S0030400X10080035>
35. Trunina N. A., Tuchin V. V. Visualization of Penetration of TiO₂ Nanoparticles into Tooth Tissues Samples Using Optical Coherence Tomography. *Izvestia of Saratov University. Physics*, 2011, vol. 11, iss. 2, pp. 5–9. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2011-11-2-5-9>
36. Bykov A. V., Volkov M. V., Volynsky M. A., Gurov I. P., Kinnunen M., Margaryants N. B., Popov A. P. Fabrication of tissue-simulative phantoms and capillaries and their investigation by optical coherence tomography techniques. *Scientific and Technical Journal of Information*



- Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 98–103 (in Russian).
37. Bini M., Ignesti A., Millanta L., Olmi R., Rubino N., Vanni R. The polyacrylamide as a phantom material for electromagnetic hyperthermia studies. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1984, vol. 31, iss. 3, pp. 317–322. <https://doi.org/10.1109/TBME.1984.325271>
 38. Surowiec A., Shrivastava P., Astrahan M., Petrovick Z. Utilization of a multilayer polyacrylamide phantom for evaluation of hyperthermia applicators. *Int. J. Hyperthermia*, 1992, vol. 8, iss. 6, pp. 795–807. <https://doi.org/10.3109/02656739209005027>
 39. Royston D., Poston R., Prah S. Optical properties of scattering and absorbing materials used in the development of optical phantoms at 1064 nm. *J. Biomed. Opt.*, 1996, vol. 1, iss. 1, pp. 110–116. <https://doi.org/10.1117/12.227698>
 40. Iizuka M., Sherar M., Vitkin I. Optical phantom materials for near infrared laser photocoagulation studies. *Lasers Surg. Med.*, 1999, vol. 25, iss. 2, pp. 159–169. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9101\(1999\)25:2<159::aid-lsm10>3.0.co;2-v](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9101(1999)25:2<159::aid-lsm10>3.0.co;2-v)
 41. Kharine A., Manohar S., Seeton R., Kolkman R., Bolt R., Steenbergen W., de Mul F. Poly(vinyl alcohol) gels for use as tissue phantoms in photoacoustic mammography. *Phys. Med. Biol.*, 2003, vol. 48, iss. 3, pp. 357–370. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/3/306>
 42. De Korte C. L., Céspedes E. I., van der Steen A. F., Norder B., te Nijenhuis K. Elastic and acoustic properties of vessel mimicking material for elasticity imaging. *Ultrason. Imaging*, 1997, vol. 19, iss. 2, pp. 112–126. <https://doi.org/10.1177/016173469701900202>
 43. Tomlins P., Woolliams P., Tedaldi M., Beaumont A., Hart C. Measurement of the 3D point-spread function in an OCT imaging system. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6847, art. 68472Q. <https://doi.org/10.1117/12.766576>
 44. Zeppieri M., Marsili S., Enaholo E. S., Shuaibu A. O., Uwagboe N., Salati C., Spadea L., Musa M. Optical coherence tomography (OCT): A brief look at the uses and technological evolution of Ophthalmology. *Medicina (Kaunas)*, 2023, vol. 3, iss. 12, art. 2114. <https://doi.org/10.3390/medicina59122114>
 45. Varghese M., Varghese S., Preethi S. Revolutionizing medical imaging: A comprehensive review of optical coherence tomography (OCT). *Journal of Optics.*, 2025, vol. 54, iss. 3, pp. 1178–1195. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01765-6>
 46. Bouma B. E., de Boer J. F., Huang D., Jang I. K., Yonetsu T., Leggett C. L., Leitgeb R., Sampson D. D., Suter M., Vakoc B., Villiger M., Wojtkowski M. Optical coherence tomography. *Nat. Rev. Methods Primers*, 2022, vol. 2, art. 79. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00162-2>
 47. Zlobina I. V., Bekrenev N. V. On the mechanism of increasing the mechanical characteristics of cured polymer composite materials under the action of a microwave electromagnetic field. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 158–169 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-158-169>
 48. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Churikov D. O. The effectiveness of the effect of microwave radiation and convection heating on the relaxation of internal stresses in cured polymer composite materials. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 230–241 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241>
 49. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Ignatiev M. A. Analysis of peculiarities of polymer matrix microstructure in PCMs formed under the influence of electrophysical effects. *Plasticheskie massy*, 2024, no. 2, pp. 12–16 (in Russian). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-02-12-16>
 50. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Egorov A. S. The effect of electrophysical influences on the microstructure of the end surface of the cured monolayer. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Composite material structures]*, 2024. vol. 173, iss. 1, pp. 29–35 (in Russian). <https://doi.org/10.52190/2073-2562-2024-1-29>

Поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 07.11.2025; принята к публикации 21.11.2025; опубликована 31.03.2026

The article was submitted 06.10.2025; approved after reviewing 07.11.2025; accepted for publication 21.11.2025; published 31.03.2026