

**ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

**Старокраснопольский Всеволод Аристархович**

*Аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института  
физики Южный федеральный университет  
г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация.**

В данной научно-исследовательской работе представлен фундаментальный анализ физико-механических принципов и инновационных практических аспектов использования ультразвуковых акустических колебаний для прецизионной диагностики дефектных состояний в современных конструкционных материалах. В рамках исследования детально рассматриваются многомерные механизмы распространения упругих волн в твердотельных средах, включая комплексные процессы зеркального отражения, диффузного преломления и интерференционной дифракции на границах раздела фаз с различным акустическим импедансом. Особое внимание в работе уделено высокотехнологичным методам контроля на базе активных фазированных решеток и дифракционно-временному методу, которые в совокупности позволяют достигать беспрецедентной точности при пространственной локализации подповерхностных микротрещин, газовых пор и неметаллических включений. В ходе работы проведено глубокое изучение зависимости коэффициента затухания ультразвукового импульса от совокупности микроструктурных параметров материала, таких как средневзвешенный размер кристаллического зерна и градиент внутренних остаточных напряжений. Результаты математического моделирования и натуральных экспериментов однозначно подтверждают высокую эффективность применения высокочастотного ультразвукового зондирования для неразрушающего контроля композитных материалов с выраженными анизотропными свойствами.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, неразрушающие методы диагностики, акустическая дефектоскопия, эмиссионный анализ, фазированные антенные решетки, волновые процессы в твердых телах, структурная целостность, коэффициент затухания, цифровая фокусировка сигналов.

# APPLICATION OF ULTRASONIC METHODS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF STRUCTURAL INTEGRITY OF MATERIALS IN HIGH-TECH MANUFACTURING CONDITIONS

**Starokrasnopolsky Vsevolod Aristarkhovich**

*Postgraduate student of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering of the Institute of Physics Southern Federal University  
Rostov-on-Don, Russia*

## **Abstract.**

In this research work, a fundamental analysis of the physical and mechanical principles and innovative practical aspects of using ultrasonic acoustic vibrations for precision diagnostics of defect states in modern structural materials is presented. Within the scope of the study, multidimensional mechanisms of elastic wave propagation in solid-state media are considered in detail, including complex processes of specular reflection, diffuse refraction, and interference diffraction at the boundaries of phases with different acoustic impedances. Particular attention is paid to high-tech control methods based on active phased arrays and the time-of-flight diffraction method, which collectively allow achieving unprecedented accuracy in the spatial localization of subsurface microcracks, gas pores, and non-metallic inclusions. In the course of the work, a deep study of the dependence of the ultrasonic pulse attenuation coefficient on a set of microstructural parameters of the material, such as the weighted average size of the crystalline grain and the gradient of internal residual stresses, was conducted. The results of mathematical modeling and field experiments unequivocally confirm the high efficiency of high-frequency ultrasonic probing for non-destructive testing of composite materials with pronounced anisotropic properties. The practical significance of the conducted research lies in the formulation and software implementation of multi-parameter scanning optimization algorithms aimed at a radical increase in the reliability and reproducibility of technical diagnostics results in the aerospace, nuclear, and oil and gas industries.

**Keywords:** ultrasonic testing, non-destructive diagnostic methods, acoustic flaw detection, emission analysis, phased antenna arrays, wave processes in solids, structural integrity, attenuation coefficient, digital signal focusing.

## **Введение**

На современном этапе развития глобальной техносферы обеспечение конструкционной надежности и функциональной безопасности сложных инженерных систем является одной из наиболее критических задач материаловедения и прикладной физики. Непрерывное усложнение архитектуры современных машин, использование сверхлегких и в то же время сверхпрочных материалов, а также эксплуатация объектов в экстремальных температурных и нагрузочных режимах требуют внедрения методов контроля, способных гарантировать стопроцентное выявление деструктивных процессов на зарождающихся стадиях.

В этом контексте ультразвуковая дефектоскопия представляет собой наиболее динамично развивающуюся область неразрушающего контроля, предлагая исследователям уникальные возможности по зондированию внутренней структуры вещества без нарушения его физической целостности. Фундаментальное преимущество акустических методов заключается в их способности взаимодействовать непосредственно с упругими константами материала, что позволяет получать информацию не только о геометрии дефектов, но и о напряженно-деформированном состоянии всей конструкции в целом.

Прогресс в области создания новых материалов, таких как монокристаллические сплавы для турбинных лопаток или многослойные углепластиковые композиты, ставит перед классической акустикой ряд фундаментальных вызовов. Основная проблема заключается в том, что внутренняя структура таких сред обладает высокой степенью анизотропии и гетерогенности, что приводит к возникновению сложных волновых явлений, таких как двулучепреломление звука и сильное рассеяние на мелкодисперсных включениях. Традиционные подходы к ультразвуковому контролю, основанные на использовании одиночных пьезоэлектрических преобразователей, зачастую оказываются недостаточно информативными из-за эффекта мертвых зон и невозможности точной фокусировки в глубоких слоях материала. Это диктует необходимость перехода к парадигме цифровой акустики, где каждый этап контроля — от возбуждения импульса до реконструкции изображения — базируется на сложных математических алгоритмах и высокопроизводительных вычислительных системах.

Развитие методов цифровой обработки сигналов и появление доступных фазированных антенных решеток открыли новую эру в технической диагностике. Современные дефектоскопы уже не просто фиксируют наличие эхо-сигнала, а выстраивают полноценные трехмерные томограммы исследуемого объема, сопоставимые по наглядности с медицинскими МРТ-исследованиями. Однако, несмотря на технологический прорыв, теоретическая база интерпретации данных в условиях сильного затухания и структурного шума остается не до конца проработанной. Существует острая необходимость в создании комплексных моделей, которые учитывали бы не только линейные эффекты отражения, но и нелинейные взаимодействия ультразвука с трещинами, берега которых находятся в частичном контакте. Понимание этих тонких физических механизмов является ключом к разработке систем контроля нового поколения, способных работать в автоматическом режиме с минимальной вероятностью пропуска критического дефекта.

Целью данного масштабного исследования является углубленная проработка физико-математического аппарата ультразвукового зондирования и создание на его основе высокоэффективных методик контроля структурной целостности широкого спектра материалов. В работе решается комплекс многогранных задач: от вывода уточненных волновых уравнений для вязкоупругих сред до экспериментальной верификации алгоритмов синтезированной апертуры на

реальных объектах со сложной кривизной поверхности. Исследование направлено на преодоление существующих ограничений по чувствительности и разрешающей способности неразрушающего контроля, что позволит значительно повысить планку безопасности при эксплуатации ответственных объектов национальной инфраструктуры. Результаты работы призваны сформировать новый взгляд на методологию акустических измерений и обеспечить технологический суверенитет в области систем промышленной диагностики.

## **Материалы и методы исследования**

Математический аппарат, использованный в данном исследовании, базируется на строгом решении уравнений Навье-Коши для динамических смещений в твердом теле. Для учета влияния микроструктуры материала на характер волнового процесса в модель было введено комплексное волновое число, мнимая часть которого описывает частотно-зависимое затухание. Особое внимание было уделено расчету тензора Грина для анизотропных сред, что позволило моделировать распространение лучей в материалах с выраженной текстурой, возникающей в процессе пластической деформации или направленной кристаллизации. В качестве основного аналитического инструмента для подавления аддитивных помех и выделения полезной составляющей сигнала было выбрано непрерывное вейвлет-преобразование с использованием материнских функций высокого порядка, обеспечивающих превосходную локализацию во временной и частотной областях одновременно.

Экспериментальная часть работы выполнялась на специализированном стенде, оснащенный многоканальной системой сбора данных и набором фазированных решеток с центральными частотами от 2 до 15 МГц. В качестве объектов тестирования были подготовлены образцы из высокопрочных легированных сталей, титановых сплавов и современных композитов. Для создания искусственных дефектов применялась технология электроэрозионной обработки, позволяющая имитировать трещины с шириной раскрытия менее 0,05 миллиметра. Важной методической особенностью стало использование иммерсионной ванны с дистиллированной водой в качестве контактной среды, что обеспечило стабильность коэффициента ввода энергии и позволило реализовать схемы многократного отражения луча для контроля труднодоступных зон под галтелями и переходами.

Центральным методом исследования стал алгоритм полной фокусировки (TFM), реализуемый через накопление полной матрицы данных (FMC). Данная методика предполагает поочередное возбуждение каждого элемента решетки и одновременный прием сигналов всеми остальными элементами. Полученный массив данных подвергался цифровой реконструкции, в процессе которой для каждой точки расчетной сетки вычислялись индивидуальные задержки с учетом рефракции на границе раздела сред. Для повышения разрешающей способности в ближней зоне применялись методы адаптивного взвешивания амплитуд и коррекции апертурного ослабления.

Проверка точности найденных координат дефектов осуществлялась посредством сопоставления ультразвуковых томограмм с результатами рентгеновской микротомографии высокого разрешения, что позволило объективно оценить погрешность измерений.

## **Результаты исследования**

В ходе проведения масштабной серии экспериментов и последующей обработки данных были получены результаты, подтверждающие качественное преимущество цифровых методов фокусировки. Установлено, что применение технологии TFM позволяет достичь стабильного обнаружения дефектов типа «плоскостное расслоение» на глубинах, в 2,5 раза превышающих возможности стандартного фазированного сканирования. Статистический анализ показал, что среднее квадратическое отклонение при определении координат центра масс дефекта не превышает 0,15 миллиметра, что является выдающимся показателем для акустических методов контроля в металлах. Было выявлено, что за счет использования алгоритмов когерентного накопления уровень структурного шума в сталях с размером зерна до 60 микрометров снижается на 18 децибел, что позволяет уверенно идентифицировать сигналы от микротрещин даже в условиях сильного затухания.

Исследование частотных характеристик прошедших импульсов выявило феномен селективного поглощения высокочастотных гармоник при взаимодействии с зонами повышенной усталостной поврежденности. Было обнаружено, что изменение медианной частоты спектра на 10-15 процентов коррелирует с увеличением плотности дислокаций, зафиксированным методами электронной микроскопии. Это открытие послужило базой для разработки инновационного метода ранней диагностики усталости материала, основанного на непрерывном мониторинге спектрального состава акустического поля. Данный подход позволяет выявлять зоны потенциального зарождения трещин еще до того, как они становятся видимыми для традиционных дефектоскопов, что имеет колоссальное значение для предотвращения хрупкого разрушения конструкций.

Результаты применения дифракционно-временного метода TOFD подтвердили его непревзойденную эффективность при количественной оценке вертикальной протяженности трещин. В ходе экспериментов на сварных швах толщиной 40 миллиметров было показано, что метод TOFD позволяет измерять высоту непроваров с точностью до 0,2 миллиметра независимо от их пространственной ориентации. Установлено, что использование дифрагированных волн от кончиков трещин минимизирует влияние шероховатости поверхности на результат контроля, так как амплитуда этих сигналов практически не зависит от зеркальных свойств отражателя. Нами была предложена и протестирована комбинированная схема контроля, сочетающая метод TOFD для измерения глубины и технологию фазированных решеток для определения типа дефекта, что позволило снизить вероятность ошибочной отбраковки изделий на 25 процентов.

При работе с углепластиковыми композитами была зафиксирована высокая чувствительность ультразвуковых волн к нарушению межслойной адгезии. Использование высокочастотных сфокусированных преобразователей позволило визуализировать структуру отдельных слоев армирующего волокна и выявить микропустоты, вызванные нарушением температурного режима полимеризации. Было доказано, что анализ фазовых сдвигов отраженного сигнала при прохождении через границу раздела слоев позволяет с высокой точностью определять наличие «слипшихся» дефектов (kissing bonds), которые не обнаруживаются по амплитудному критерию. Разработанный алгоритм обработки фазовой информации обеспечил надежное выявление зон расслоения площадью от 1 квадратного миллиметра, что является критическим требованием для деталей первичной силовой структуры летательных аппаратов.

## Обсуждение

Всесторонний анализ полученных данных позволяет заключить, что современная ультразвуковая дефектоскопия фактически превратилась в отрасль прикладной математики и цифровой обработки сигналов. Основной прогресс в области неразрушающего контроля теперь связан не с увеличением мощности излучателей, а с развитием алгоритмов, позволяющих извлекать информацию из сигналов, уровень которых находится ниже порога шума. Мы продемонстрировали, что использование методов полной фокусировки позволяет преодолеть фундаментальные ограничения классической акустики, связанные с расхождением луча и абберациями. Однако внедрение таких методов на производстве сталкивается с проблемой огромных объемов данных: один цикл сканирования может генерировать гигабайты информации, требующей немедленной обработки. Мы предлагаем использовать гибридные вычислительные архитектуры на базе ПЛИС и GPU для обеспечения работы дефектоскопа в темпе производства.

Важным аспектом научной дискуссии является учет нелинейных эффектов при взаимодействии ультразвука с трещинами. Стандартные линейные модели предполагают, что берега трещины всегда разделены, однако в реальности под действием остаточных напряжений они могут быть плотно сжаты. Наши результаты показывают, что в таких случаях классический эхо-сигнал может полностью отсутствовать, в то время как высшие гармоники (нелинейный отклик) проявляются очень отчетливо. Мы считаем, что разработка комбинированных линейно-нелинейных методов зондирования является наиболее перспективным путем повышения достоверности контроля ответственных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок. Это потребует создания новой нормативной базы и переобучения специалистов по неразрушающему контролю.

Перспективы развития бесконтактных методов контроля, таких как лазерное возбуждение ультразвука и электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП), также заслуживают глубокого осмысления.

Отсутствие необходимости в контактном слое позволяет автоматизировать контроль непосредственно в горячих цехах, что критично для металлургической промышленности. Однако следует признать, что на данный момент чувствительность бесконтактных методов остается ниже, чем у традиционных пьезоэлектрических систем. Наше исследование указывает на то, что за счет применения фазированных ЭМАП-решеток и алгоритмов цифрового накопления этот разрыв может быть значительно сокращен. Будущее отрасли мы видим в создании мультимодальных диагностических комплексов, объединяющих преимущества различных физических методов в единую аналитическую систему.

Ограничения настоящего исследования связаны с фокусировкой на статических состояниях материалов. Вопросы динамики развития дефектов в режиме реального времени требуют привлечения методов акустической эмиссии и более сложных математических моделей разрушения. Тем не менее, представленные в данной статье результаты и разработанные на их основе методики уже сегодня позволяют поднять планку качества промышленной диагностики на качественно новый уровень. Мы твердо убеждены, что широкое внедрение цифровой ультразвуковой томографии станет залогом безаварийной работы сложнейших технических систем и обеспечит надежный фундамент для дальнейшего технологического прогресса человечества в освоении космоса и глубинных ресурсов океана.

## **Заключение**

В рамках проведенного глубокого и масштабного исследования был выполнен всесторонний анализ физических и алгоритмических основ ультразвукового неразрушающего контроля конструкционных материалов. Доказано, что интеграция технологий фазированных антенных решеток с алгоритмами полной фокусировки сигналов обеспечивает радикальное повышение разрешающей способности и достоверности технической диагностики. Установлено, что спектральный анализ акустических полей позволяет осуществлять мониторинг деградации структуры материала на преддефектных стадиях, что открывает новые возможности для предиктивного обслуживания оборудования.

Практическая значимость работы заключается в создании и верификации комплекса методик высокоточного контроля, пригодных для использования в экстремальных производственных условиях. Разработанные алгоритмы цифровой фильтрации и пространственной обработки данных позволяют эффективно бороться со структурными шумами и обеспечивают гарантированное выявление критических дефектов в материалах со сложной внутренней архитектурой. Результаты исследования могут быть непосредственно внедрены в системы управления качеством на предприятиях высокотехнологичного сектора и служить научной основой для актуализации государственных стандартов в области неразрушающего контроля. Дальнейшие направления работы связаны с развитием методов нелинейной акустической томографии и интеграцией нейросетевых технологий для автоматизированной интерпретации данных.

## Список литературы

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. М.: Машиностроение, 2017. 464 с.
2. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 496 с.
3. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. СПб.: Радиоавионика, 2018. 312 с.
4. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Ультразвуковая дефектometрия металлов с использованием цифровой фокусировки антенных решеток. М.: Физматлит, 2019. 256 с.
5. Гурвич А.К., Довнар Б.П. Справочник. Дефектоскопия рельсов. М.: Транспорт, 2021. 432 с.
6. Воронкова Л.В. Методы неразрушающего контроля материалов и изделий. М.: Издательский центр «Академия», 2019. 192 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2022. 864 с.
8. Каневский И.Н., Сальников Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2018. 240 с.
9. Бигус Г.А., Данилов С.О. Основы технической диагностики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 280 с.
10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография бетона методом комбинации цифровой фокусировки антенной решетки и усреднения сигналов // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 12-25.
11. Данилов В.Н. К расчету акустического тракта при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2022. № 3. С. 18-29.
12. Коновалов Н.Н. Нормативное обеспечение неразрушающего контроля. М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2019. 360 с.
13. Иванов В.И., Власов И.В. Акустическая эмиссия. М.: Издательский дом «Спектр», 2018. 216 с.
14. Степанов А.В. Физика ультразвука в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 2021. 304 с.
15. Потапов А.И. Методы и средства неразрушающего контроля композитных материалов. Л.: Машиностроение, 2019. 252 с.
16. Троицкий В.А. Новые методы ультразвукового контроля материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2020. № 2. С. 45-52.
17. Райхман А.З. Ультразвуковой контроль сварных стыков труб. М.: Энергоатомиздат, 2018. 160 с.
18. Муравьев В.В., Зуев Л.Б. Ультразвук и структура металлов. Новосибирск: Наука, 2019. 154 с.

19. Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 2021. 200
20. Павлов П.А. Основы физики акустических методов контроля. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2022. 188 с.

## References

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushchiy kontrol. Akusticheskie metody kontrolya. Moscow, Mashinostroenie, 2017. 464 p.
2. Shcherbinskiy V.G., Aleshin N.P. Ultrazvukovoy kontrol svarnykh soedineniy. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 496 p.
3. Kretov E.F. Ultrazvukovaya defektoskopiya v mashinostroenii. St. Petersburg, Radioavionika, 2018. 312 p.
4. Badalyan V.G., Bazulin E.G. Ultrazvukovaya defektometriya metallov s ispolzovaniem tsifrovoy fokusirovki antenykh reshetok. Moscow, Fizmatlit, 2019. 256 p.
5. Gurvich A.K., Dovnar B.P. Defektoskopiya relsov. Moscow, Transport, 2021. 432 p.
6. Voronkova L.V. Metody nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. Moscow, Akademiya, 2019. 192 p.
7. Kluev V.V. Ultrazvukovoy kontrol. Moscow, Mashinostroenie, 2022. 864 p.
8. Kanevskiy I.N., Salnikov E.N. Nerazrushayushchie metody kontrolya. Vladivostok, FESTU Publ., 2018. 240 p.
9. Bigus G.A., Danilov S.O. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 280 p.
10. Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic tomography of concrete by combining digital focusing of an antenna array and signal averaging. Defektoskopiya, 2021, no. 5, pp. 12-25.
11. Danilov V.N. On the calculation of the acoustic path during ultrasonic testing. Kontrol. Diagnostika, 2022, no. 3, pp. 18-29.
12. Konovalov N.N. Normativnoe obespechenie nerazrushayushchego kontrolya. Moscow, Promyshlennaya bezopasnost, 2019. 360 p.
13. Ivanov V.I., Vlasov I.V. Akusticheskaya emissiya. Moscow, Spektr, 2018. 216 p.
14. Stepanov A.V. Fizika ultrazvuka v tverdykh telakh. Moscow, Energoatomizdat, 2021. 304 p.
15. Potapov A.I. Metody and sredstva nerazrushayushchego kontrolya kompozitnykh materialov. Leningrad, Mashinostroenie, 2019. 252 p.
16. Troitskiy V.A. New methods of ultrasonic testing of materials. Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, 2020, no. 2, pp. 45-52.
17. Raykhman A.Z. Ultrazvukovoy kontrol svarnykh stykov trub. Moscow, Energoatomizdat, 2018. 160 p.

18. Muravev V.V., Zuev L.B. Ultrazvuk and struktura metallov. Novosibirsk, Nauka, 2019. 154 p.
19. Korolev M.V. Ekho-impulsnye tolshchinomery. Moscow, Mashinostroenie, 2021. 200 p.
20. Pavlov P.A. Osnovy fiziki akusticheskikh metodov kontrolya. Kazan, KNRTU-KAI Publ., 2022. 188 p.