



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 4

2024



НАУКА
— 1727 —

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 4
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

М.С. Вечёра, С.И. Коновалов, Р.С. Коновалов, I.B. Ch., В.М. Цаплев. К вопросу о рациональном выборе формы демпфера ультразвукового пьезопреобразователя 3

К.В. Федин, О.К. Марилев. Выявление скрытых дефектов в композиционном материале методом стоячих волн 16

Электромагнитные методы

Ю.Л. Гобов. Идентификация трещин и математическая модель магнитостатического поля дефектов в пластине 28

Радиационные методы

Е.Е. Журавский, Д.С. Белкин, Б.И. Капранов, С.В. Чахлов. Определение положения и размеров несплошностей при альбедной дефектоскопии 38

Ю.Т. Платов, С.Л. Белецкий, Д.А. Метленкин, Р.А. Платова, А.Л. Верещагин, В.А. Марьин. Идентификация и классификация зерна гречихи методами микрофокусной рентгенографии и гиперспектрального изображения 45

Общие вопросы дефектоскопии

Кай Чжао, Чжедун Гэ, Лянлян Хуо, Ишэн Гао, Юйчэн Чжоу, Чжихао Яо. Развитие и перспективы прикладных разработок для технологии контроля дефектов в составных элементах деревянных конструкций 56

Информация 74

К ВОПРОСУ О РАЦИОНАЛЬНОМ ВЫБОРЕ ФОРМЫ ДЕМПФЕРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2024 г. М.С. Вечёра^{1,*}, С.И. Коновалов^{2,**}, Р.С. Коновалов^{2,3,***},
I. B. Ch.^{4,****}, В.М. Цаплев^{2,*****}

¹ООО «Константа УЗК», Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),

Россия 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Россия 190031 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 9

⁴School of Mechanical Engineering, Changwon National University

51140 Changwon, Changwon National University Road 20, Republic of Korea

E-mail: *vms@constanta.ru; **sikonov@etu.ru; ***rskonov@etu.ru;

****ee.boris@changwon.ac.kr; *****valery@convergences-fr.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024; после доработки 22.03.2024

Принята к публикации 05.04.2024

Представлены результаты исследования влияния геометрической формы демпфера на эффективность его работы и эффективность работы системы излучения—приема «в целом». Рассмотрена одна из возможных форм демпфера, когда он выполняется в виде усеченного конуса, образующая которого имеет угол наклона по отношению к плоскости пьезопластины. Предложен критерий оценки эффективности работы демпфера. В работе приведены результаты расчетно-теоретического (методом конечных элементов) и экспериментального исследований влияния угла наклона образующей демпфера на сигнал, отраженный от его тыльной части. Определен угол наклона образующей, при котором достигается минимум паразитных сигналов. Осуществлено исследование системы излучения—приема при нагрузке на водную среду. Отмечено удовлетворительное совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль, моделирование, пьезоэлектрический преобразователь, пьезопластина, демпфер.

ABOUT THE RATIONAL CHOICE OF THE DAMPER SHAPE FOR AN ULTRASONIC PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

© 2024 M.S. Vechera^{1,*}, S.I. Kononov^{2,**}, R.S. Kononov^{2,3,***},
I.B. Ch.^{4,****}, V.M. Tsaplev^{2,*****}

¹LLC «Constanta US», Russia 198097 Saint Petersburg, Ogorodny Lane 21

²Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,

Russia 197022 Saint Petersburg, Prof. Popova, 5

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Russia 190031 Saint Petersburg, Moskovsky pr., 9

⁴School of Mechanical Engineering, Changwon National University, 51140 Changwon, Changwon National
University Road 20, Republic of Korea

E-mail: *vms@constanta.ru; **sikonov@etu.ru; ***rskonov@etu.ru; ****ee.boris@changwon.ac.kr;

*****valery@convergences-fr.ru

The results of the study on the influence of the geometric shape of the damper on its effectiveness and the overall efficiency of the radiation-reception system are presented. One of the possible forms of the damper is considered, where it is shaped like a truncated cone, and its generatrix has an inclination angle relative to the plane of the piezoplate. A criterion for evaluating the efficiency of the damper's operation is proposed. The study includes the results of computational-theoretical (using the finite element method) and experimental research on the influence of the incline angle of the damper's generatrix on the signal reflected from its rear part. The inclination angle of the generatrix, at which the minimum of parasitic signals is achieved, is determined. The radiation-reception system is investigated under water loading, and a satisfactory agreement between the theoretical and experimental results is noted.

Key words: acoustic non-destructive testing, modeling, piezoelectric transducer, piezoplate, damper.

DOI: 10.31857/S0130308224040017

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время акустический неразрушающий контроль используется практически во всех отраслях промышленности. Это объясняется целым рядом достоинств, присущих данному методу контроля (возможность применения по отношению к широкому классу материалов, безопасность для персонала, возможность осуществления контроля при одностороннем доступе к изделию, относительные простота и дешевизна и т.д.). При всем разнообразии методов и средств акустического контроля материалов, изделий и полуфабрикатов, их объединяет наличие конструктивных элементов, предназначенных для излучения и приема звуковых волн. Эти элементы (преобразователи) могут строиться на различных физических принципах. В данное время наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Они представляют собой сложную многослойную конструкцию, в состав которой, помимо пьезоактивного элемента (например, пьезокерамической или пьезокварцевой пластины), входят защитный слой (протектор), клеевые и контактные слои и т.п. При этом необходимо отметить, что с тыльной стороны пьезокерамический элемент обычно имеет демпфер. Он является одним из важнейших конструктивных элементов ПЭП и предназначается для расширения полосы пропускания пьезопреобразователя и снижения длительности переходных процессов в нем. Механическое демпфирование позволяет подавлять инерционные свойства ПЭП [1—13]. Необходимо отметить, что демпфер эффективно работает лишь в том случае, когда вносимые им в колебательную систему потери имеют чисто активный характер. Это достигается, когда исключается влияние сигналов, отражающихся от его тыльной стороны. Вследствие этого материал демпфера должен иметь большой коэффициент затухания ультразвуковых волн. Кроме того, он должен еще иметь и высокий удельный акустический импеданс. Довольно часто на тыльной стороне демпфера делаются бороздки, углубления, выпуклости и т.д., благодаря чему волны, попадающие на них, рассеиваются и проходят значительное расстояние в толще демпфера. Это приводит к значительному их затуханию.

Авторами настоящей работы проведен анализ литературных данных, касающихся исследований, направленных на совершенствование демпферов ПЭП. Следует отметить, что большинство публикаций связано с предложениями по созданию новых технологий их изготовления. Так, можно отметить, что в наши дни наиболее часто применяются ПЭП с демпферами, изготовленными на основе использования порошковых наполнителей, когда в связующую массу вводятся порошки тяжелых металлов, например, вольфрама [9, 10]. Параметры материалов, применяемые в этих разработках, представлены в указанных публикациях. Применение составных наполнителей (например, введение помимо порошкового наполнителя еще и резиновой крошки) влечет за собой повышение эффективности работы демпфера [10]. Довольно часто [9, 10] тыльная сторона демпфера может выполняться сферической формы (при этом центр сферы смещен относительно оси демпфера). Это способствует устранению влияния отраженных волн. В [10] представлены также данные, касающиеся демпферов профилированного типа, имеющих различную форму торцевой поверхности, а также демпферы сложной формы. Примером демпфера указанного типа является конструкция, сочетающая рупорную часть и шар с выборкой в верхней его части. Недостатком демпферов такого типа является их способность эффективно работать лишь с пластинами конкретных геометрических размеров. Их изменение влечет за собой необходимость осуществления нового подбора формы конуса и размеров других элементов демпфера.

Стоит упомянуть также работы [14, 15], направленные на описание технологии изготовления демпферов ПЭП. Так, в [14] предложено делать это путем помещения пьезопластины в литьевую форму с последующей заливкой ее расплавом демпфирующего материала с наполнителем, дальнейшим охлаждением и отверждением всей массы. При этом достаточно трудно достичь удельного акустического импеданса, который был бы близок к его значению у пьезокерамики. Данный факт находит объяснение в том, что увеличение удельного акустического импеданса демпфера требует увеличения процентного содержания наполнителя. При этом увеличивается вязкость и неоднородность всей массы. Такое изменение свойств материала может вести к снижению повторяемости характеристик ПЭП. Способ изготовления ПЭП, близкий к описанному, предложен в [15]. Здесь на тыльную сторону пластины насыпается слой наполнителя и заливается связующим составом с дальнейшим охлаждением.

Упомянутые недостатки отсутствуют при изготовлении демпфера способом, изложенным в [16]. Здесь демпфер представляет собой двуслойную композицию. Нижний слой являет собой тонкий слой эпоксидной смолы с порошком вольфрама, а верхний — композицию полиуретана с тем же порошком. При изготовлении верхнего слоя применяется центрифугирование, что позволяет добиться плавного изменения удельного акустического импеданса по высоте демпфера. При

этом его максимальное значение наблюдается в области, близкой к пьезокерамике. К недостаткам данной конструкции, вероятно, стоит отнести наличие верхнего слоя, поскольку это ведет к увеличению габаритов демпфера.

Способ изготовления демпфера на основе применения легкоплавких металлов (сплавы Вуда или Розе) описан в [17]. Эти материалы имеют удельный акустический импеданс, близкий к его значению у пьезокерамики. Эти сплавы наносят на тыльную сторону пластины и осуществляют нагрев до температуры их плавления. На поверхности пластины формируется сплошной слой материала. Далее нагрев прекращается и на расплав осуществляется воздействие давлением. В результате формируется демпфер с неоднородной структурой, обладающий высоким затуханием. Недостаток описанной конструкции связан с трудностями получения ПЭП с идентичными характеристиками.

Для изготовления демпферов ПЭП с высокой повторяемостью параметров может использоваться не только центрифугирование [16], но и вибровоздействие [18]. С этой целью корпус ПЭП с демпфирующим материалом помещается на вибростенд, что способствует уплотнению массы. Результатом этого является сосредоточение тяжелых частиц вольфрама вблизи пьезопластины.

Анализ научно-технической литературы за значительный временной период позволяет авторам данной статьи сделать вывод о том, что основные усилия авторов существующих публикаций были направлены на совершенствование технологии изготовления демпферов. При этом исследованиям влияния формы демпфера на улучшение его свойств внимания уделено существенно меньше. Задача данной статьи состоит в стремлении ее авторов в какой-то мере восполнить этот пробел. С этой целью в работе рассмотрен демпфер, имеющий форму усеченного конуса. Совершенно очевидно, что угол наклона образующей конуса будет влиять на свойства демпфера и, в конечном счете, на свойства ПЭП. Описанию результатов теоретических и экспериментальных исследований, направленных на определение геометрических параметров такого демпфера, позволяющих ему работать с максимальной эффективностью, посвящена настоящая работа.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МАТЕРИАЛЕ ДЕМПФЕРА

Постановку задачи исследования распространения ультразвуковых волн в толще демпфера можно сформулировать следующим образом. На рис. 1 представлена пьезоэлектрическая пластина, тыльная сторона которой контактирует с демпфером. Здесь d — толщина пьезопластины, равная 0,8 и 1,6 мм для частот 2,5 и 1,25 МГц соответственно. Образующая конуса имеет угол наклона α по отношению к плоскости пластины. Форма демпфера в виде усеченного конуса выбирается, исходя из априорного предположения о том, что это способствует увеличению пути прохождения волны в материале демпфера вследствие многочисленных отражений ее в материале демпфера. Совершенно очевидно, что эффективность работы демпфера будет зависеть от величины угла α . Задача состоит в определении оптимального значения α . Под оптимальным углом будем понимать угол, при котором волны, поступающие на пластину l в результате отражений от стенок демпфера, будут минимальными.

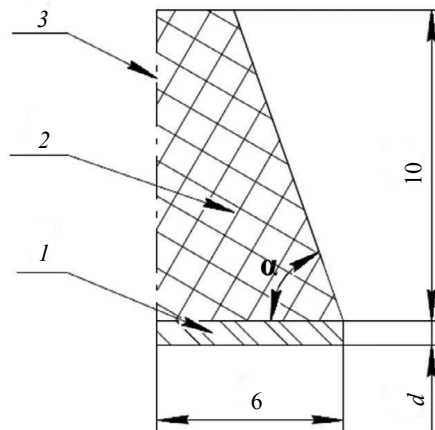


Рис. 1. Схема, поясняющая постановку задачи, где 1 — круглая пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — ось симметрии.

Решение поставленной задачи осуществлялось в два этапа — теоретически, путем проведения численного эксперимента в программе COMSOL, и натурным моделированием с последующим сравнением результатов, полученных на каждом из этапов.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований в качестве материала пьезопластины была выбрана керамика ЦТС-19. Ее параметры приведены в [19]. Материал демпфера представляет собой смесь модифицированной эпоксидной смолы КДА с отвердителем ЭТАЛ-45М и наполнителем. В качестве наполнителя использован мелкодисперсный порошок вольфрама ПВ-1 со средним размером частиц 0,8—1,7 мкм, изготовленный по ТУ 14-22-143-2000 (1:1 по массе, причем массовая доля смолы указана с учетом отвердителя).

Таблица 1

Параметры демпфера

Скорость продольной волны c_p , м/с	Скорость поперечной волны c_p , м/с	Плотность ρ , кг/м ³	Затухание продольных волн δ_p , дБ/мм	Затухание поперечных волн δ_p , дБ/мм
2083±36	950±25	2218±45	На частоте 1,25 МГц 0,7±0,05	На частоте 1,25 МГц 1,0±0,06
			На частоте 2,5 МГц 0,75±0,03	На частоте 2,5 МГц 2,5±0,08

Параметры демпфера, знание которых необходимо для проведения расчета, определялись экспериментально. Для этого применен прецизионный измеритель скорости распространения и затухания продольных и поперечных волн производства МГНИВП «Акустика», использующий пьезопреобразователи на основе активного элемента из ниобата лития, с резонансными частотами 1,25 и 2,5 МГц. Система излучения—приема осесимметрична, а сама установка включает генератор импульсов и осциллограф. Измерение затухания проведено на основе определения соотношения амплитуд максимумов импульсных сигналов с двух сторон от плоскопараллельных образцов демпфера, а скорость продольных и поперечных волн — путем измерения времени прохождения импульсного сигнала через образцы.

Результатом этого эксперимента стало получение параметров демпфера, приведенных в табл. 1.

В процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований пластина возбуждалась сигналом в виде однопериодного меандра с амплитудой $U_{\text{вх}} = 200$ В с длительностью, равной $\tau = 1/f_0$, где f_0 — резонансная частота пьезопластины.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На рис. 1 показана исходная геометрическая схема, принятая для теоретического решения поставленной задачи методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 6.1. Конкретные геометрические размеры пластины и высота демпфера приведены на рисунке. Необходимо отметить, что геометрия рассматриваемой задачи осесимметрична. Вследствие этого показана лишь половина модели. Усеченный конус с углом $\alpha = 90^\circ$ вырождается в цилиндр.

Для моделирования работы пьезопреобразователя использовались модули Solid Mechanics, Electrostatic и мультифизический модуль Piezoelectric effect для описания распространения упругих волн в пьезопластине. Для описания электрической цепи, подключенной к пьезоэлементу, использован модуль Electrical circuit. Размер сетки выбирался из критерия Куранта—Фридрихса—Леви [20], который устанавливает зависимость между пространственным Δx и временным шагами Δt и скоростями распространения продольных c_l или поперечных c_t волн:

$$KFL = \frac{\Delta t}{\Delta x} c_{l,t}. \quad (1)$$

В данной модели пространственный шаг равен одной двенадцатой длины волны на центральной частоте, коэффициент $KFL = 0,1$, а в качестве скорости волны выбрана скорость поперечной волны, так как на одной и той же частоте длина поперечной волны меньше, чем у продольной. Сетка состоит из 7800 элементов (меняется в зависимости от угла) и 74396 степеней свободы, а временной шаг из выражения (1) составляет 7 мкс. Угол α при расчете варьировался от 60 до 90° с шагом 2°.

Для оценки эффективности работы демпфера можно предложить критерий, заключающийся в следующем: если возбудить пластину электрическим сигналом заданной амплитуды и длительности, то в толщу демпфера будут излучены ультразвуковые волны. Отражение данных волн может быть зарегистрировано этой же пластиной, что приведет к возникновению электрического сигнала на электродах пьезоэлемента. Соотношение амплитуд двух указанных сигналов для различных значений угла α позволит определить интересующую нас зависимость.

В результате численного моделирования получена зависимость, представленная на рис. 2. Она показывает отношение амплитуд электрических напряжений $(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_\alpha$ на пьезоэлементе для отраженного от тыльной стороны демпфера сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ к поданному на пьезоэлемент $U_{\text{ВХ}}$, в зависимости от угла наклона боковой стенки демпфера α (образующей усеченного конуса), и нормирована к единице путем деления на $(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_{\alpha=90^\circ}$ при $\alpha = 90^\circ$. По оси абсцисс отложены значения угла наклона образующей (в градусах), по оси ординат — коэффициент

$$A = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_\alpha}{(U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})_{\alpha=90^\circ}}.$$

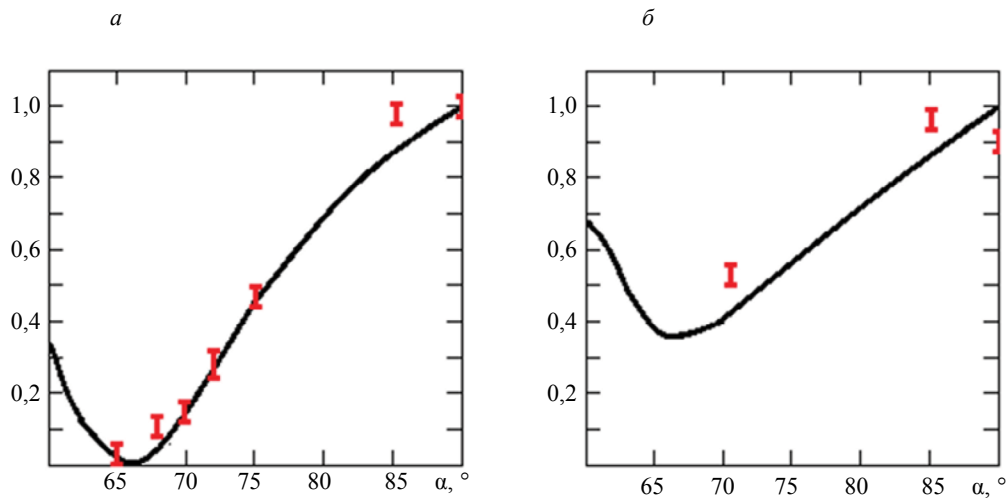


Рис. 2. Изменение коэффициента A в зависимости от угла наклона α для частоты возбуждения 2,5 МГц (а) и для частоты возбуждения 1,25 МГц (б).

Данные, представленные на рисунке, свидетельствуют о том, что наилучшего результата можно добиться при $\alpha = 64-66^\circ$ на частоте 2,5 МГц. Действительно, при этом значении угла α коэффициент A достигает величины 0,0001. Для сравнения можно привести данные из этого же рис. 2а: при $\alpha = 60^\circ$ и $\alpha = 70^\circ$ значения A составляют 0,33 и 0,14 соответственно. В случае возбуждения пьезоэлемента на частоте 1,25 МГц (рис. 2б) оптимальным значением является $\alpha = 66^\circ$, при котором $A = 0,36$.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, позволяет утверждать, что при $\alpha = 64-66^\circ$ можно получить наилучший результат с точки зрения достижения минимума амплитуд отраженных волн.

Для более детального изучения процессов, происходящих в демпфере, представляет интерес рассмотреть выходное электрическое напряжение на электродах пьезоэлемента в зависимости от времени. Для этого в программе COMSOL Multiphysics 6.1 применен интерфейс Electrical Circuit для моделирования электрических токов и напряжений. С электрода пьезоэлемента, используя функцию Terminal, фиксируется выходное электрическое напряжение. На рис. 3 представлены временные зависимости формы электрического напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ на выходе пьезопластины при нескольких значениях угла наклона образующей α .

Если рассматривать динамику изменения амплитуд сигналов, снимаемых с электродов пьезопластины, в зависимости от угла α на частоте 2,5 МГц (рис. 3е—ж), то можно сделать вывод о существовании некоторого значения угла α , при котором демпфер работает наиболее эффективно. Изменение α от 60 до 66° приводит к тому, что сигналы 1 и 2 при достижении $\alpha = 64-66^\circ$ практически исчезают. Уровень переотраженных волн также снижается до величины, близкой к нулю. Дальнейший рост α в диапазоне от 66 до 90° влечет за собой повышение амплитуд сигналов, воз-

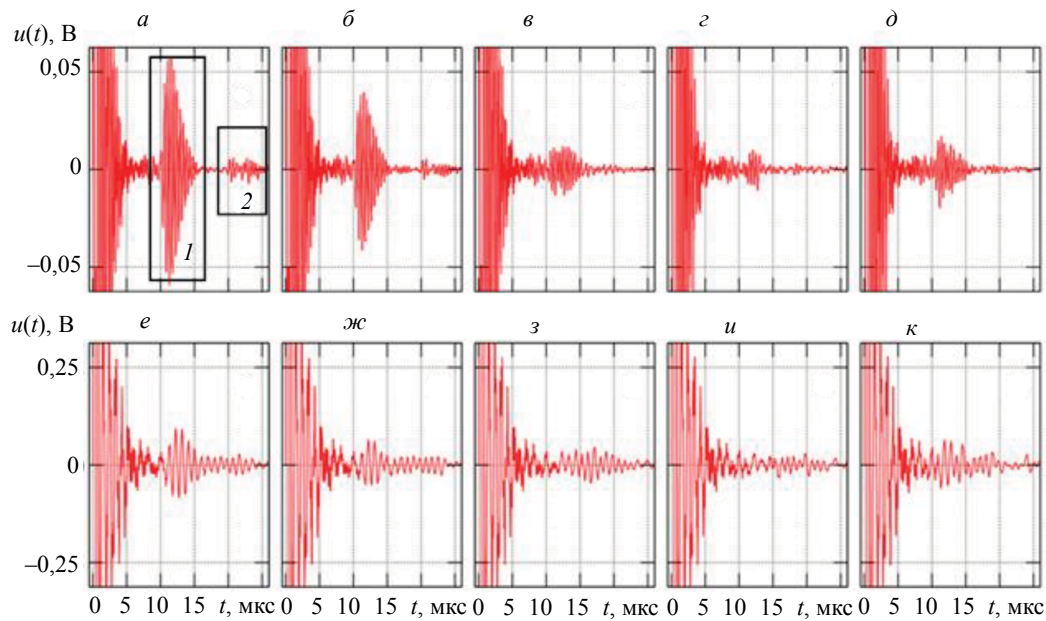


Рис. 3. Выходное напряжение на пьезоэлементе на частоте возбуждения 1,25 МГц при углах наклона α , равных: a — 60° ; b — 62° ; b — 64° ; z — 66° ; d — 68° и на частоте 2,5 МГц при углах наклона α , равных: e — 60° ; $ж$ — 62° ; $з$ — 64° ; $и$ — 66° ; $к$ — 68° . 1 — сигнал, отраженный от тыльной части демпфера; 2 — сигнал, вызванный переотражением внутри демпфера.

никающих вследствие многократных переотражений внутри демпфера. На частоте 1,25 МГц (рис. 3а—д) наблюдаются сходные процессы. При этом амплитуды сигналов выше, чем в случае возбуждения на частоте 2,5 МГц, хотя и уровень помех выше, что может свидетельствовать о более слабом затухании переотраженных и трансформированных в демпфере волн.

Увеличение амплитуды сигнала, вызванного переотражением внутри демпфера, при углах $\alpha < 64$ — 66° можно объяснить тем, что ультразвуковые волны испытывают отражения в сторону активного элемента не только от тыльной части демпфера, но и от его боковых стенок. Действительно, анализ фронтов сигналов в демпфере показал, что при углах $\alpha < 64$ — 66° сигнал не испытывает многократных переотражений от образующей демпфера.

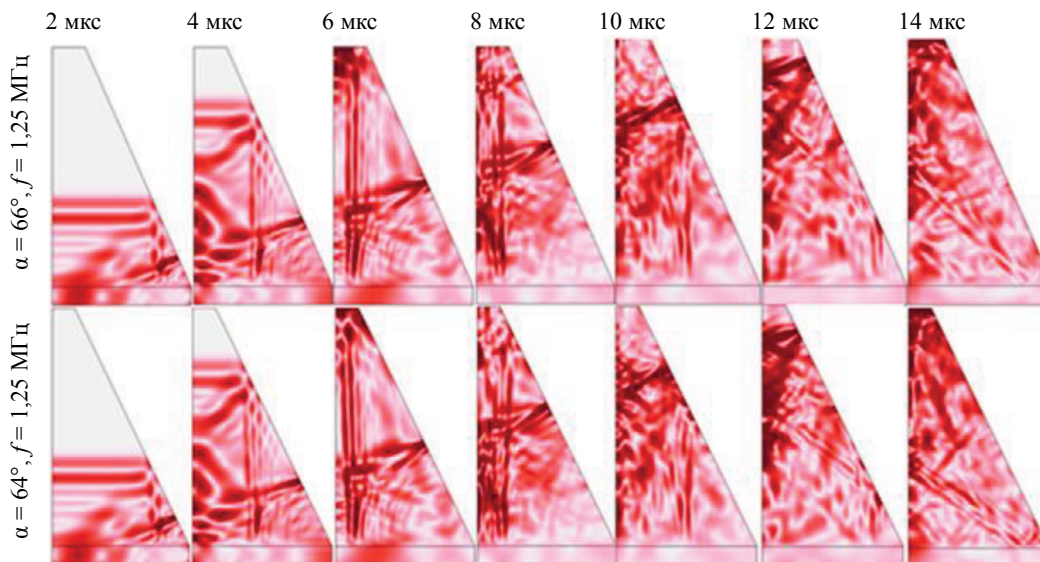


Рис. 4. Изменение фронта сигнала в зависимости от времени для частоты 1,25 МГц при углах $\alpha = 64^\circ$ и $\alpha = 66^\circ$.

В качестве примера на рис. 4 показано изменение фронта сигнала в зависимости от времени для частоты 1,25 МГц при углах $\alpha = 64^\circ$ и $\alpha = 66^\circ$. Более темным цветом показаны зоны большего звукового давления. С интервалом в 2 мкс показана динамика изменения звукового давления в демпфере. Можно видеть, что в момент времени, соответствующий 2 мкс от момента начала излучения сигнала пьезопластиной, фронт достигает приблизительно середины высоты демпфера, а при 6 мкс — его тыльной стороны. Далее начинаются многократные переотражения в толще демпфера (см. изображения, соответствующие времени 6—14 мкс). Видно, что область максимального звукового давления сосредоточена не вблизи поверхности пьезопластины, а вблизи тыльной поверхности демпфера, в отличие от случаев, при которых $\alpha < 64\text{—}66^\circ$ или $\alpha > 64\text{—}66^\circ$. Данный факт является иллюстрацией того, что максимальная эффективность конусного демпфера достигается при наклоне образующей конуса $\alpha = 64\text{—}66^\circ$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментальной проверки расчетных результатов были использованы пьезоэлементы из материала ЦТС-19 с номинальными частотами 2,5 и 1,25 МГц диаметром 12 мм. С целью минимизации погрешностей, связанных с отличием параметров каждого отдельного пьезоэлемента в партии, все пьезоэлементы, используемые для изготовления опытных образцов, были отобраны в группы по значениям резонансной частоты и емкости. Девияция резонансных частот в эксперименте была не более ± 10 кГц от средней в группе, а емкости — не более 30 % от средней.

Изготовление опытных образцов производилось с использованием оснастки по технологии 3D-печати из водорастворимого пластика PVA. Оснастка представляла собой литьевую форму в виде усеченного конуса с отверстием сверху для заливки демпфирующей массы. Основанием формы являлась окружность с радиусом, равным радиусу используемых пьезопластин. К преимуществам подобной технологии изготовления можно отнести дешевизну, скорость изготовления форм, отсутствие технологических затрат на изготовление форм, возможность печати в автоматическом режиме и отсутствие необходимости в осуществлении постоянного контроля производственного процесса. Кроме того, при помощи 3D-принтера можно изготовить форму любого размера и конфигурации.

Демпфирующий состав после дегазации разливался в формы. По истечении 48 ч формы с полимеризованным демпфером помещались в воду для растворения оснастки.

По описанной технологии было изготовлено 30 образцов с применением пьезопластин с частотой 2,5 МГц и 9 образцов — с частотой 1,25 МГц.

На основе использования пластин с рабочей частотой 2,5 МГц были изготовлены образцы с наклоном образующей конуса $90, 85, 75, 72, 70, 68, 66^\circ$. Образец с каждым отдельным углом наклона стенки изготавливался в трех экземплярах. Это делалось для предотвращения случайных ошибок при изготовлении.

На основе использования пьезопластин с рабочей частотой 1,25 МГц были изготовлены образцы с наклоном образующей конуса $90, 85, 70^\circ$. Образцы также были изготовлены в трех экземплярах.

Изготовленные пьезопреобразователи, аналогично тому как это делалось при проведении теоретических исследований, возбуждались сигналом в виде однопериодного меандра на частоте резонанса пьезопластин с амплитудой 200 В с применением дефектоскопа общего назначения UCD-50. С цифрового выхода дефектоскопа фиксировались осциллограммы сигналов от задней свободной стенки демпфера при помощи программного обеспечения (ПО) UdOscill. Изменение отношения максимальной амплитуды сигнала, отраженного от тыльной стенки демпфера, к амплитуде зондирующего сигнала, в зависимости от угла наклона образующей конуса, приведено на рис. 2 (см. красные метки). Из данных, представленных на рисунке, можно видеть, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается для случая, когда резонансная частота составляет 2,5 МГц. Видно (см. рис. 2а), что точки, соответствующие экспериментальным данным, расходятся с расчетными не более, чем на 8 %. Для случая использования пьезопластин с резонансной частотой 1,25 МГц подобное расхождение составляет до 15 %.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ДЕМПФЕРЕ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ—ПРИЕМА

Практический интерес настоящего исследования заключается в оценке влияния формы конусного демпфера на излучаемый преобразователем сигнал. Исследование таких параметров, как длительность зондирующего импульса и отношение сигнал/помеха, даст четкое представление об

эффективности демпфирования и позволит определить оптимальный угол наклона боковых стенок демпфера с точки зрения получения наилучших результатов в системе излучения—приема ультразвуковых сигналов.

Перед началом исследования необходимо сформулировать требования к среде распространения ультразвуковых волн, а также к габаритам установки. Оптимальной для исследований является жидкая среда, поскольку нагрузка на твердое тело приведет к искажениям ввиду необходимости использования переходных слоев (например, протектора). Жидкость, в которой будут распространяться ультразвуковые волны, должна обладать минимальным значением электропроводности для снижения вероятности короткого замыкания электродов пьезопластины. Кроме того, среда должна обладать низким значением коэффициента затухания ультразвуковых волн. Также желательно, чтобы жидкость имела низкую летучесть и активно не испарялась во время длительных экспериментов. Оптимальным вариантом является дистиллированная вода, которая и была выбрана для дальнейших исследований, поскольку она удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям.

Принято считать, что монотонность излучения достигается при дистанции до отражателя не менее двух-трех ближних зон [21—23]. Это связано с тем, что помимо ближней и дальней зон выделяют еще переходную зону, в которой характер излучения отличается от монотонного. Указанные соображения определяют высоту установки. Помимо этого, боковые стенки не должны оказывать влияния на результаты измерений. Также целесообразно на дне емкости расположить отражатель, который имел бы сильно отличающийся от воды удельный акустический импеданс, чтобы достигалась максимальная амплитуда отраженного сигнала. С этой целью использована стальная пластина с удельным акустическим импедансом в 30 раз большим, чем у воды.

По результатам расчетов было определено, что высота установки должна быть не менее 180 мм. Ширина емкости была принята приблизительно равной ее высоте. Размеры пластины, расположенной на дне резервуара, составили 55×55 мм.

Для создания резервуара для дистиллированной воды на тонкий лист органического стекла был приклеен отрезок полипропиленовой трубы с внутренним диаметром 195 мм и высотой 210 мм. На дно получившейся емкости была помещена пластина толщиной 9,5 мм из стали марки 20.

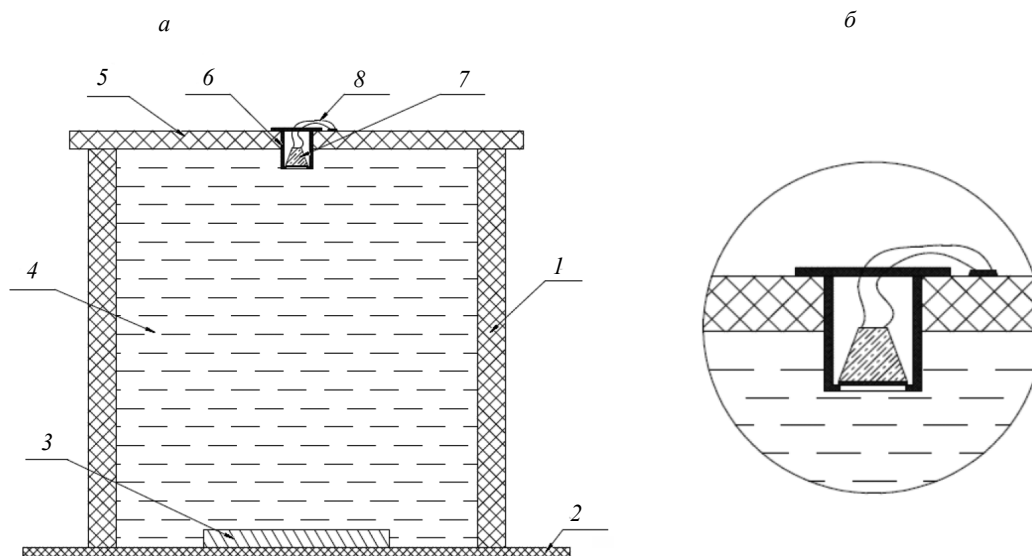


Рис. 5. Эскиз установки: *a* — общий вид, где 1 — отрезок полиэтиленовой трубы, 2 — основание из органического стекла, 3 — металлическая пластина, 4 — дистиллированная вода, 5 — пластина для крепления оснастки, 6 — оснастка для удержания образцов демпферов, 7 — образец демпфера, 8 — проводники; *б* — увеличенный вид оснастки.

Для установки образцов демпферов было изготовлено специальное приспособление. В центре длинной пластины было изготовлено отверстие. В получившееся отверстие помещена напечатанная на 3D-принтере оснастка для удержания и позиционирования образцов. Пластина с оснасткой устанавливалась на верхний край резервуара так, чтобы нижняя часть оснастки была погружена в воду. На верхней части пластины была закреплена контактная площадка, к которой припаивались выводы от образцов и разъем для подключения кабеля. Эскиз установки приведен на рис. 5.

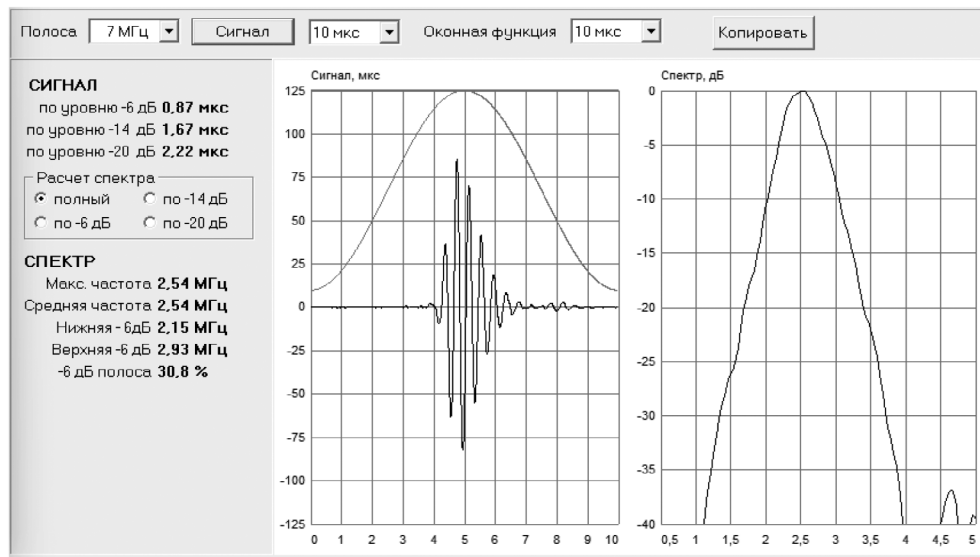
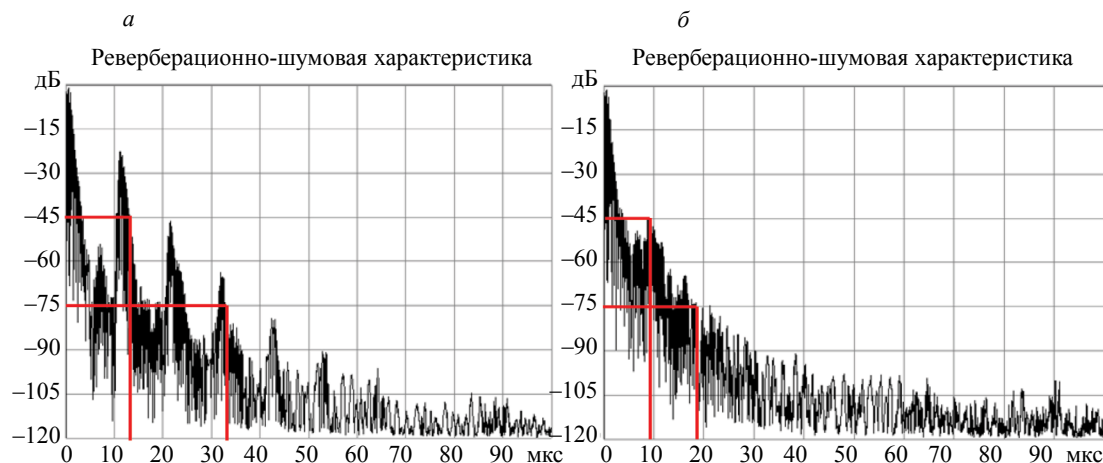


Рис.6. Типичный вид окна программы UdProbe.

Для исследований использовались два ультразвуковых дефектоскопа общего назначения UCD-50. Для удобства один из дефектоскопов был настроен для исследования отраженного от металлической пластины эхосигнала, а другой — для исследования сигналов от тыльной стороны демпфера и реверберационно-шумовой характеристики (РШХ).

Осциллограммы сигналов фиксировались при помощи специального ПО UdOscill, спектральные характеристики сигналов и РШХ измерялись при помощи программы UdProbe. Вид программы UdProbe с полученными спектральными характеристиками представлен на рис. 6.

Измерение длительности зондирующего импульса осуществлялось по РШХ. Длительность определялась по последнему сигналу, пересекающему заданный уровень. В качестве опорных уровней были выбраны значения ослабления сигналов до -45 и -75 дБ. Для сравнения на рис. 7 приведены РШХ для образцов демпферов с частотой 2,5 МГц с углом наклона стенок 90 и 65°. По ним видно, что длительности на уровнях -45 и -75 дБ для образца с наклоном стенок 90° равны $T_{-45}^{90^\circ} = 13$ мкс и $T_{-75}^{90^\circ} = 33$ мкс соответственно. Аналогично для образца с наклоном стенок 65° длительности составляют $T_{-45}^{65^\circ} = 8$ мкс и $T_{-75}^{65^\circ} = 16$ мкс. Таким образом, при изменении угла наклона образующей конуса демпфера на 25° длительность зондирующего импульса на двух

Рис. 7. РШХ образцов демпферов: частота 2,5 МГц, $\alpha = 90^\circ$ (а); частота 2,5 МГц, $\alpha = 65^\circ$ (б).

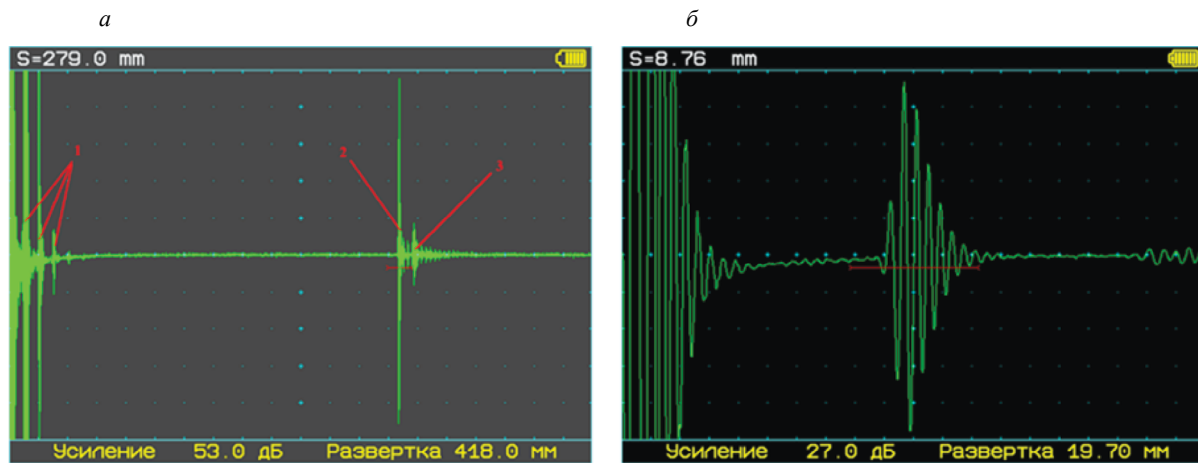


Рис. 8. Типовые осциллограммы исследуемых сигналов для образцов $\alpha = 90^\circ$: а — общая осциллограмма, где 1 — многократные переотражения в демпфере, 2 — эхосигнал от верхней части стальной пластины, 3 — донный сигнал в стальной пластине; б — осциллограмма сигнала от тыльной части демпфера.

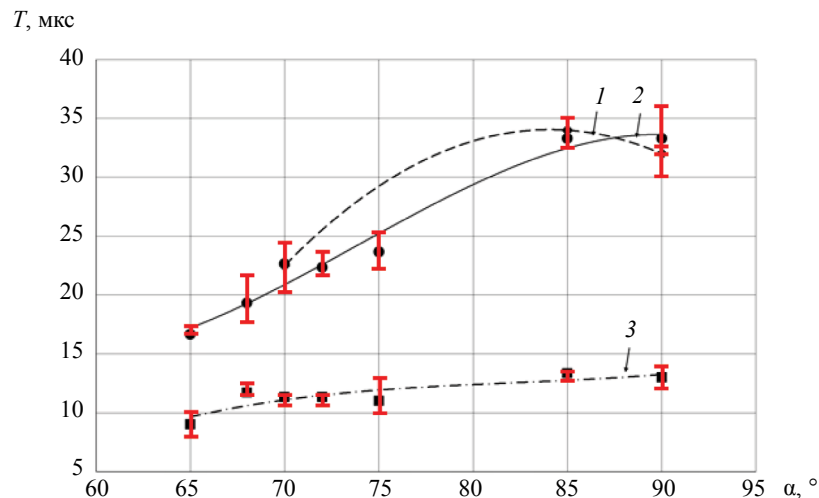


Рис. 9. Зависимость длительности зондирующего импульса от α : 1 — кривая для случая излучения на частоте 1,25 МГц и измерения по уровню -45 дБ; 2 — 2,5 МГц и -75 дБ; 3 — 2,5 МГц и -45 дБ.

уровнях уменьшилась практически в 2 раза. Зависимость длительности зондирующего сигнала от угла α приведена на рис. 9.

Важным параметром при эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей является отношение сигнал/помеха. Под сигналом в настоящей работе подразумевается сигнал, отраженный от верхней части металлической пластины и вернувшийся на пьезоэлемент. Под помехой подразумевается сигнал максимальной амплитуды, отраженный от тыльной части демпфера.

На рис. 8 показаны типичные осциллограммы сигналов от стальной пластины и от тыльной части демпфера.

Графики зависимостей длительности зондирующего импульса T и отношения сигнал/помеха от угла α представлены на рис. 9, 10. Линии, соединяющие экспериментальные точки на графике, получены аппроксимацией полиномом третьей степени.

Анализ данных, представленных на графиках, показал, что уменьшение угла α оказывает заметное влияние на излучаемые сигналы. Длительность зондирующего импульса, которая на практике определяет величину мертвой зоны, снизилась практически в два раза на уровнях -45 и -75 дБ при использовании пьезопластин с резонансной частотой 2,5 МГц. При использовании

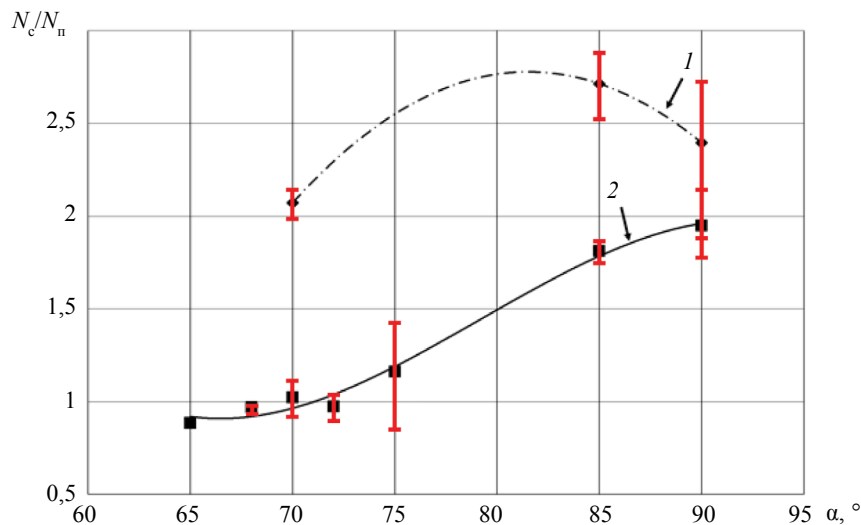


Рис. 10. Зависимость отношения сигнал/помеха от α : 1 — 1,25 МГц; 2 — 2,5 МГц.

пьезопластин с резонансной частотой 1,25 МГц длительность на уровне -45 дБ уменьшилась приблизительно в 1,5 раза. Отношение сигнал/помеха для образцов с резонансной частотой 2,5 МГц изменилось с 1,9 до 0,8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье проведены расчетное и экспериментальное исследования влияния геометрической формы демпфера на эффективность его работы. При проведении ряда исследований были достигнуты следующие результаты:

1. Предложен критерий оценки эффективности работы демпфера в виде отношения амплитуд сигналов, отраженных от свободного торца демпфера и зондирующего импульса.
2. Разработана и экспериментально подтверждена расчетная модель ПЭП с конусным демпфером. Полученная модель позволяет определять геометрические параметры демпфера в зависимости от его материала, от частоты и размера пьезоэлемента, а также в зависимости от электрических параметров системы.
3. Разработана и опробована технология изготовления демпфера с применением водорастворимой оснастки.
4. Исследовано влияние наклона образующей конусного демпфера на сигнал, отражающийся от его тыльной части.
5. Исследовано влияние формы демпфера на излучаемый в среду сигнал. Максимальная эффективность конусного демпфера достигается при наклоне образующей конуса $\alpha = 64\text{—}66^\circ$.

Стоит отметить, что эффективность конусного демпфера с наполнителем в виде вольфрамового порошка, смешанного со смолой КДА в соотношении 1:1 оказалась выше по сравнению с демпфером цилиндрической формы. В частности, снижается длительность зондирующего импульса и амплитуда паразитных сигналов из демпфера, что приводит к уменьшению мертвой зоны и увеличению отношения сигнал/помеха соответственно. Этот факт имеет первостепенное значение при применении демпферов подобной формы при серийном производстве ПЭП, поскольку данные параметры могут оказывать прямое влияние на результаты неразрушающего контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sachse Wolfgang, Hsu Nelson N.* Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization // *Physical Acoustics* / Ed. by Warren P. Mason and R. N. Thurston. 1979. V. 14. P. 277—406.
2. *Milan D. Radmanovich, Dragan D. Mancic.* Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis: Faculty of Electronics, 2004. 198 p.
3. *Sherman C. H., Butler J. L.* Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2—4. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p.

4. *Papadakis Emmanuel P., Oakley Clyde G., Selfridge Alan R., Maxfield Bruce.* Fabrication and characterization of transducers / In *Physical Acoustics*. R. N. Thurston, Allan D. Pierce, Emmanuel P. Papadakis, Eds. N.-Y., USA: Academic Press, 1999. V. 24. P. 43—134.
5. *Prokic M.* Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI, 2004. 266 p.
6. *Yoshimitsu Kikuchi* Ultrasonic transducers. Tokyo: Corona Pub. Co., 1969. 407 p.
7. *Uchino K.* Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology, 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
8. *Nakamura K.* Ultrasonic Transducers. Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
9. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
10. *Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.
11. *Гитис М.Б.* Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65—84.
12. *Королев М. В., Карпельсон А. Е.* Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 157 с.
13. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
14. *Trzaskos Casmir R.* Ultrasonic transducer and process to obtain high acoustic attenuation in the backing / US4382201A. 27.04.1981.
15. *Марьин Н.С.* Способ изготовления демпфера для ультразвукового преобразователя / Патент на изобретение № 94025902. Опубликовано 10.05.1996.
16. *Каширин В.А., Коновалов С.И., Степанов Б.Г.* Ультразвуковой преобразователь / Патент РФ на изобретение № 2150109. Опубл. 27.05.2000.
17. *Кургачева И.Г., Кулемин М., Шкарлет О.М., Куклев А.В., Сухоруков Д.В.* Способ изготовления демпфера ультразвукового преобразователя / Авторское свидетельство СССР №888029. Опубл. 07.03.1987.
18. *Алферов Ю.Е., Дронов А.Н., Сагателян Г.Р.* Пьезоэлектрический преобразователь ультразвукового диагностического зонда / Патент РФ № 2253191. Опубл. 27.05.2005.
19. Пьезокерамические преобразователи / Справ. В.В. Ганопольский, Б.А. Касаткин, Ф.Ф. Легуша и др. Под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
20. *Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // *Mathematische Annalen*. 1928. V. 100. P. 32—74.
21. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
22. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Изд. 4-е, перераб. Е.Ф. Кретов. СПб.: СВЕН, 2014. 312 с.
23. *Гурвич А.К., Кузьмина Л.И.* Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. Киев: Техніка, 1980. 103 с.

REFERENCES

1. *Sachse Wolfgang, Hsu Nelson N.* Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization // *Physical Acoustics*. 1979. V. 14. P. 277—406. Available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124779143500098
2. *Radmanovich Milan D., Mancic Dragan D.* Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis: Faculty of Electronics, Serbia, 2004. 198 p.
3. *Sherman C.H., Butler J.L.* Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2—4. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p.
4. *Papadakis Emmanuel P., Oakley Clyde G., Selfridge Alan R., Maxfield Bruce.* Fabrication and characterization of transducers // *Physical Acoustics*. 1999. V. 24. P. 43—134. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893388X99800244>
5. *Prokic M.* Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI. 2004. 266 p.
6. *Yoshimitsu Kikuchi.* Ultrasonic transducers. Tokyo: Corona Pub. Co. 1969. 407 p.
7. *Uchino K.* Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology, 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
8. *Nakamura K.* Ultrasonic Transducers. Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
9. *Ermolov I.N.* (Ed.). Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Nondestructive Testing. Moscow: Mashinostroenie. Russia, 1986. 280 p. (In Russ.)
10. *Domarkas V.I., Kazhis R.-I.Y.* Verification and Measurement Piezoelectric Transducers. Vilnius: Mintis. Lithuania, 1974. 256 p. (In Russ.)

11. *Gitis M.B.* Transducers for pulsed ultrasonic flaw detection—Fundamental theoretical aspects // Defektoskopia. 1981. № 2. P. 65—84 (in Russ.). Available at: https://www.researchgate.net/publication/253702177_Transducers_for_pulsed_ultrasonic_flaw_detection_-_Fundamental_theoretical_aspects_Review
12. *Korolev M.V., Karpel'son A.E.* Wideband Ultrasonic Piezoelectric Transducers. Moscow: Mashinostroenie. Russia, 1982. 157 p. (In Russ.)
13. *Konovalov S.I., Kuz'menko A.G.* Peculiarities of Pulsed Operating Modes of Electroacoustic Piezoelectric Transducers. St. Petersburg: Politekhnik. Russia? 2014. 294 p. (in Russ.).
14. *Trzaskos Casmir R.* Ultrasonic transducer and process to obtain high acoustic attenuation in the backing / US4382201A. 27.04.1981
15. *Maryin N.S.* The Method of Manufacturing a Damper for an Ultrasound Transducer / RU94025902. 10.05.1996. (In Russ.)
16. *Kashirin V.A., Konovalov S.I., Stepanov B.G.* Ultrasonic Transducer / RU2150109, 27.05.2000. (In Russ.)
17. *Kurgacheva I.G., Kulemin E.A., Shkarlet O.M., Kuklev A.V., Sukhorukov D.V.* The Method of Manufacturing the Damper of the Ultrasound Transducer / USSR 888029. 07.03.1987. (in Russ.).
18. *Alferov YE., Dronov A.N., Sagetelan G.R.* Piezoelectric Transducer of an Ultrasound Diagnostic Probe / RU2253191. 27.05.2005. (In Russ.)
19. *Pugachev S.I.* (Ed.). Piezoceramic Transducers: Handbook of Methods of Measuring and Calculating the Parameters. Leningrad: Sudostroenie, Russia. 1984. 256 p. (In Russ.)
20. *Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen // Physik. Math. An. 1928. V. 100. P. 32—74. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01448839>
21. *Ermolov I.N.* Theory and practice of ultrasound control. Moscow: Mashinostroenie. Russia, 1981. 240 p. (In Russ.)
22. *Kretov E.F.* Ultrasonic flaw detection in power engineering. Ed. 4th, revised. SVEN: St. Petersburg, Russia, 2014. 312 p. (In Russ.)
23. *Gurvich A.K., Kuz'mina L.I.* Reference radiation patterns of ultrasonic flaw detector transducers. Kiev: Technika, 1980. 103 p. (In Russ.)

ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН

© 2024 г. К.В. Федин^{1,*}, О.К. Марилов^{2,**}

¹ФГБУН ИНГТ им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия 630090 Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3
²ФГБОУ ВО «НГТУ», Россия 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20
E-mail: *FedinKV@ipgg.sbras.ru; **oleqmarilov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.11.2023; после доработки 07.04.2024
Принята к публикации 12.04.2024

В результате проведенных измерений методом стоячих волн были обнаружены скрытые дефекты внутри деталей стоп протезов для ног, изготовленных из композиционного материала. В ходе сравнения полученных амплитудно-частотных спектров целых образцов и образцов с дефектами по первым пикам, соответствующим первым изгибным модам волн, было выявлено, что значения резонансных частот дефектных образцов ниже относительно значений частот спектров целых образцов, что может говорить о том, что материал дефектных изделий может обладать пониженными значениями прочностных характеристик. Также при исследовании некоторых образцов было отмечено наличие дополнительных пиков, что говорит о появлении новых границ отражений, соответствующих появлению дефектов в исследуемых образцах. Получены карты амплитудных распределений в исследуемых образцах. Проведено предварительное сравнение с результатами исследования образцов прибором OmniScan X3 производства компании OLYMPUS, свидетельствующие о наличии повышенного количества границ отражений, а также повышенного содержания вспученностей, возникающих, вероятно, в процессе склейки изделий в дефектном образце в сравнении с более крепким образцом. Проведенный анализ подтверждает наличие возможности успешного применения метода стоячих волн как способа обнаружения скрытых дефектов в композиционном материале.

Ключевые слова: стоячие волны, скрытые дефекты, композиционный материал, протезы, система диагностики.

DETECTION OF HIDDEN DEFECTS IN COMPOSITE MATERIAL USING THE STANDING WAVES METHOD

© 2024 K.V. Fedin^{1,*}, O.K. Marilov^{2,**}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Russia 630090 Novosibirsk, Akademika Koptyuga Pr. 3
²Novosibirsk State Technical University, Russia 630073 Novosibirsk, Kirova str. 48
E-mail: *FedinKV@ipgg.sbras.ru; **oleqmarilov@gmail.com

As a result of the measurements carried out using the standing waves method, the hidden defects were detected inside the prosthetic feet details made of composite material. When comparing the obtained amplitude-frequency spectra of intact samples and samples with defects based on the first peaks corresponding to the first bending wave modes, it was revealed that the values of the resonant frequencies of defective samples were lower relative to the frequency values of the spectra of intact samples. That observation indicated that the material of defective products might have reduced strength characteristics. Also, when studying some samples, the presence of additional peaks was noted, which indicated the appearance of new reflection boundaries corresponding to the appearance of defects in the research samples. Maps of amplitude distributions in the studied samples were obtained. A preliminary comparison was made with the results of examining samples using the OmniScan X3 device manufactured by OLYMPUS. The results obtained indicate the presence of an increased number of reflection boundaries, as well as an increased content of bulges, which probably arise during the process of gluing products in a defective sample in comparison with a stronger one. The analysis confirms the possibility of successfully using the standing waves method as a method for detecting hidden defects in composite material.

Keywords: standing waves, hidden defects, composite material, prostheses, diagnostic system.

DOI: 10.31857/S0130308224040028

ВВЕДЕНИЕ

На этапе тестирования прочностных характеристик изделий при циклически повторяемой нагрузке на стопы протезов для ног, изготавливаемые из композиционного материала, существует проблема неоднородности получаемых результатов: ряд изделий ломается, выдерживая нагрузку в количестве ~ 1 000 000 повторений, ряд — на порядок меньше. Так как каждая конкретная деталь стоп изготавливается небольшими партиями из пластов, вмещающих в себя порядка 50 изделий, столь существенные различия в показателях выдерживаемой нагрузки на этапе тестирования на

прочность могут говорить о проблемах, существующих в технологической цепочке и приводящих к подобным неоднородностям в результатах.

Данная проблема может быть озвучена как проблема диагностики изделий на всех этапах их изготовления с целью выявления и локализации возможных дефектов и асимметрии в исследуемых характеристиках, визуально неразличимых невооруженным глазом, для обеспечения требований к качеству и безопасности их эксплуатации.

Дефекты, определяемые в композиционных материалах, могут включать в себя: трещины, расслоения, инородные включения, полости и т.д. Для обнаружения дефектов в композиционных материалах возможно использование различных методов неразрушающего контроля: акустические, оптические, тепловые, радиационные, магнитные и др. [1].

Например, теневой ультразвуковой метод неразрушающего контроля заключается в следующем: излучающий преобразователь подает волны на исследуемый объект контроля, проходя который, низкочастотные волны попадают на принимающий преобразователь, расположенный соосно с излучающим. Различают амплитудный и временной теневые методы прохождения. Амплитудный теневой метод основан на измерении амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через объект. Если на пути волны встречается дефект, амплитуда волны либо увеличивается, либо уменьшается, а также сопровождается появлением дополнительных значений резонансных частот, которым соответствуют характерные пики. Временной теневой метод основан на измерении времени, которое требуется ультразвуковой волне для прохождения через объект: если на пути волны есть дефект, то время прохождения увеличивается.

К преимуществам теневого ультразвукового метода можно отнести: высокую точность и чувствительность к дефектам, возможность проведения испытаний объектов без их разрушения или остановки производства, возможность проверки объектов в труднодоступных местах, однако могут возникнуть проблемы, связанные с невозможностью точно определить глубину залегания дефекта, необходимостью наличия специализированного оборудования и навыков использования [2, 3].

Оптикоакустический метод неразрушающего контроля основан на принципе преобразования акустической энергии в оптическую и обратно. Он включает в себя три основных этапа: генерация источником звука акустических волн, проникающие в исследуемый объект, преобразование акустической энергии в тепловую, что приводит к локальному изменению температуры, которое, в свою очередь, вызывает изменение показателя преломления материала, детектирование изменений показателя преломления оптической системой, вызванные акустическими волнами, и преобразование их в электрический сигнал. Либо, в свою очередь, используются лазерные импульсы для генерации акустических волн. В этих системах короткий лазерный импульс фокусируется на поверхности материала, и часть энергии импульса преобразуется в тепловую энергию, которая создает акустическую волну. Эта акустическая волна затем распространяется внутри материала и может быть обнаружена с помощью оптической системы, которая измеряет изменения показателя преломления, вызванные волной.

Оптикоакустический метод имеет ряд преимуществ: оптическая система позволяет точно определить местоположение дефекта, так как она может регистрировать изменения показателя преломления с высокой точностью, оптическая система может работать в широком диапазоне температур и влажности, что делает ее весьма универсальной, сюда также можно отнести отсутствие необходимости в прямом контакте с объектом, простоту использования и возможность интеграции с автоматизированными системами.

Но у этой системы есть и недостатки. Один из них — высокая стоимость оборудования. Кроме того, оптикоакустическая система требует определенных навыков и опыта для правильной настройки и использования [4, 5].

Термографический метод неразрушающего контроля основан на анализе инфракрасного излучения, испускаемого объектом контроля. Так как термография основана на принципе, что все объекты с температурой выше 0 К испускают тепловое излучение, существует и возможность регистрировать это излучение с помощью специального оборудования — инфракрасных камер, которые преобразуют инфракрасное излучение в видимое изображение.

С помощью термографического метода можно обнаруживать следующие дефекты: обрывы и неправильная укладка армирующих волокон, неоднородности в материале, вызванные некачественной пропиткой или образованием пузырьков воздуха, неравномерное распределение смолы или наполнителя, определение границ слоев, а также различные механические повреждения — все это влияет, в частности, на скорости распространения тепловых волн в дефектных и бездефектных областях исследуемого объекта.

Преимуществами термографического метода неразрушающего контроля являются его простота, быстрота и возможность проводить контроль в режиме реального времени. Однако этот метод может быть менее чувствительным по сравнению с другими методами, такими как ультразвуковая дефектоскопия, и требует определенных навыков и опыта при интерпретации полученных данных, а также необходимость обеспечения оптического доступа к поверхности исследуемого объекта [6, 7].

Радиационные методы неразрушающего контроля основаны на использовании ионизирующего излучения для получения информации о внутренней структуре и свойствах объектов контроля. К примеру, рентгеновская дефектоскопия основана на использовании рентгеновских лучей для просвечивания объектов и обнаружения внутренних дефектов, таких как трещины, поры и расслоения.

Принцип работы рентгеновской дефектоскопии заключается в том, что рентгеновские лучи проходят через материал и взаимодействуют с его атомами. Когда рентгеновская трубка генерирует пучок рентгеновских лучей, который проходит через исследуемый объект, то при наличии дефектов внутри объекта (трещины, поры, расслоения и т.д.) рентгеновские лучи будут по-разному поглощаться в разных местах объекта, что может быть зафиксировано с помощью детектора излучения, который преобразует их в электрический сигнал.

В композиционных материалах рентгеновская дефектоскопия обычно используется для проверки качества соединения между различными слоями материала, например, для обнаружения дефектов в соединениях между углеродными волокнами и полимерной матрицей, а также для обнаружения трещин и других дефектов. Если внутри объекта есть дефект, то лучи будут больше поглощаться в этом месте, чем в местах без дефекта из-за разницы плотностей или составов в сравнении с целой частью объекта.

Радиационные методы обладают высокой чувствительностью и позволяют обнаруживать дефекты размером до нескольких микрон. Однако они также имеют ряд недостатков, включая необходимость использования источников ионизирующего излучения, что требует специальных мер безопасности. Кроме того, радиационные методы могут быть неприменимы для контроля объектов, чувствительных к ионизирующему излучению, таких как электронные компоненты или оптические элементы [8, 9].

Метод вихревого неразрушающего контроля основан на регистрации вихревых токов, возникающих в объекте контроля под воздействием электромагнитного поля. Эти токи создают собственное магнитное поле, которое может быть измерено с помощью специального датчика.

Если в композиционном материале присутствует дефект, например трещина или расслоение, то интенсивность магнитного поля в этой области будет выше по сравнению с неповрежденной частью материала. Датчик может обнаружить это изменение и определить наличие дефекта. Для определения дефекта необходимо провести измерения магнитного поля на нескольких участках изделия. Если изменение поля на одном участке значительно превышает изменение на других участках, то это может указывать на наличие дефекта. Также можно провести сравнение с эталонным образцом, имеющим известные характеристики.

К преимуществам метода относятся: высокая скорость проведения контроля, возможность контроля изделий сложной формы, высокая чувствительность, но имеется ряд недостатков, из которых самым существенным является его поверхностность, также к ним относятся: ограничения по материалу, ограничения по размерам дефекта и сложность интерпретации результатов [10, 11].

В процессе развития метода, используемого, в частности в данной работе, выяснилось, что шумовые колебания могут нести полезную информацию. Ограниченные тела, как известно, характеризуются некоторым набором собственных частот. Если в среде присутствуют вынужденные гармонические колебания, то при совпадении их частоты с одной из собственных частот исследуемого объекта наблюдаются резонансные явления, которые могут быть использованы, например, для решения задач контроля и диагностики изделий из композиционного материала, где под воздействием шумов, если в них присутствуют спектральные составляющие, совпадающие с какими-либо собственными частотами объекта, в последнем может формироваться поле стоячих волн, частота каждой из которых совпадает с одной из собственных частот. Несмотря на относительно небольшую амплитуду этих волн, разработана методика, позволяющая выделять их из шумового поля [12—15].

Для исследования собственных колебаний деталей применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из акустических шумов. Суть метода заключается в накоплении амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных спектрах появляются регулярные последовательности пиков, соответствующие стоячим волнам. Далее будут представлены резуль-

таты физического моделирования стоячих волн, формирующихся в изделиях из композиционного материала с дефектами и без под действием шумового поля.

Целью применения метода, основанного на стоячих волнах, является определение возможности диагностирования присутствия скрытых дефектов внутри композиционного материала. Целью также является показать, что с помощью предлагаемого метода можно в кратчайшие сроки обнаружить дефекты, сэкономив затрачиваемые на это ресурсы и время, а при их обнаружении целесообразно задействовать альтернативные методы контроля, изучая их более предметно.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

В качестве объектов исследования была задействована партия деталей стоп протезов для ног, изготовленная из композиционного материала. В качестве композиционного материала исследуемых деталей выступал армированный углеволокном препрег с эпоксидной смолой, в состав которой определенным образом была замешана суспензия с нанотрубками с целью увеличения прочностных характеристик изделия.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника акустических шумов использовалась акустическая колонка, генерирующая «белый шум». Амплитудно-частотная характеристика колонок по паспорту работает до 20 кГц. На рис. 2 можно увидеть степень неравномерности характеристики источника белого шума. Затем передвижной приемник, в основе которого задействуется диск из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 2 мм и толщиной 1 мм, регистрировал шумовое поле (рис. 3). Приемник перемещался по исследуемому объекту следующей «сеткой» измерений: 2 продольные дорожки с десятью точками проходились вдоль с шагом 2 см и 2 поперечные дорожки с тремя точками — с шагом 1 см (рис. 4). Время, затраченное на получение данных в каждой точке, не превышает 10 с. Сигналы с датчика подавались на один канал двухканального цифрового осциллографа В-421 затем в цифровом виде записывались на жесткий диск персонального компьютера для последующей обработки. Далее данные заносились в разработанный командой программное обеспечение, позволяющее получить картину амплитудного распределения по полученным спектрам. Также результаты сравнивались с картинами амплитудного распределения, полученными прибором OmniScan X3 производства компании OLYMPUS.

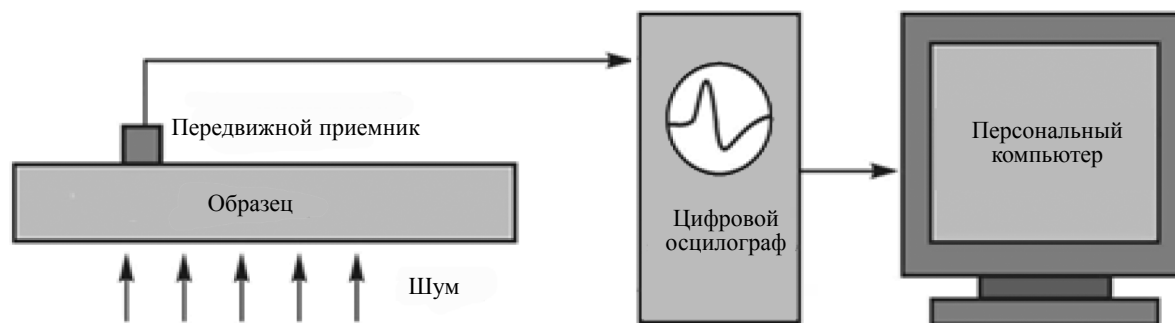


Рис. 1. Схема эксперимента.

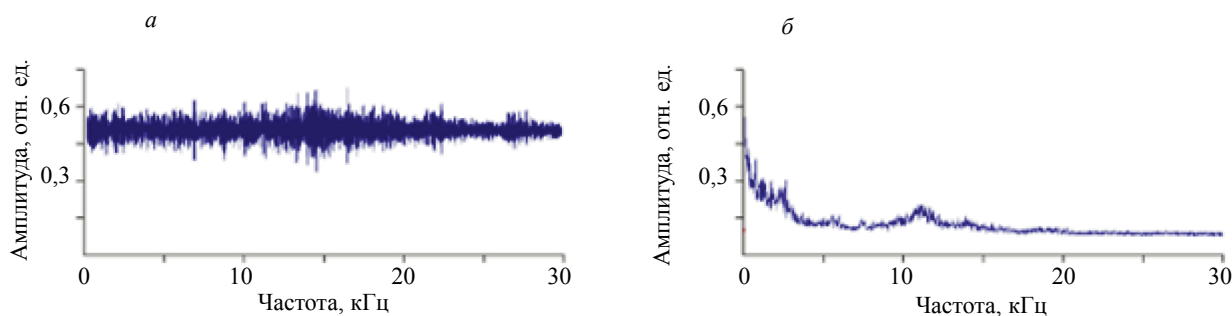


Рис. 2. Примеры амплитудных спектров электрических шумовых сигналов, подаваемых на образец (а), и шумовых акустических сигналов, зарегистрированных на поверхности образца (б).

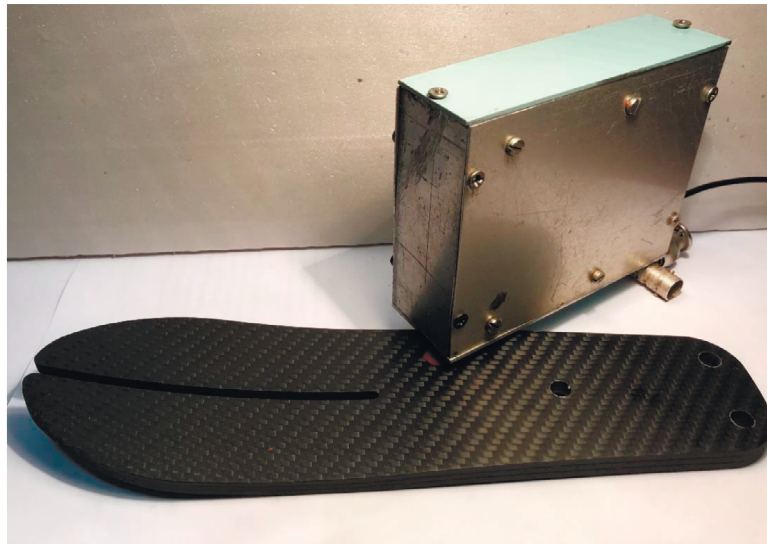


Рис. 3. Исследуемый объект (деталь стопы протеза) с пьезокерамическим датчиком.

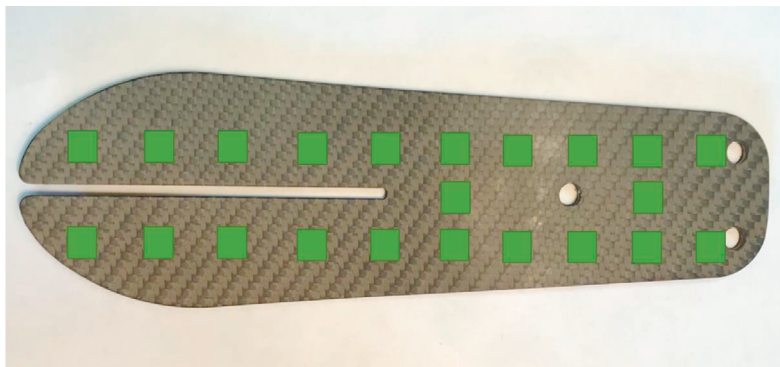


Рис. 4. «Сетка» измерений исследуемого объекта.

Метод диагностики стоячими волнами заключался в следующем:

1. Измерение целых образцов из партии:
 - а) регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием перемещаемого по «сетке» измерений пьезокерамического датчика;
 - б) разбиение шумовых записей на блоки по 65536 отсчетов (максимальное количество отсчетов в осциллографе В-421);
 - в) преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудно-частотных спектров путем их суммирования.
2. Построение и сравнение суммарных спектров между собой с целью выявления смещения амплитудно-частотных спектров в качестве оценки однородности значений частот для целых образцов.
3. Создание трещины путем сдавливания одного целого образца тисками и изломом с помощью пассатижей до характерного хруста изделия, визуально трещина не наблюдалась.
4. Построение и сравнение суммарных спектров образца с трещиной и целого образца с целью выявления смещения амплитудно-частотного спектра и образования новых резонансных пиков в качестве оценки наличия дефектов.
5. Также повторение вышеупомянутой процедуры для образца в единичном экземпляре в качестве наглядного примера образования дополнительных значений резонансных частот при наличии дефекта в изделии. Здесь отметим, что «сетка» прохождения датчика была несколько иной ввиду различия геометрических размеров данного экземпляра с образцами из другой партии: две про-

дольные дорожки с девятью точками проходились вдоль с шагом 1 см и одна поперечная дорожка с тремя точками — с шагом 1 см.

6. Получение изображения амплитудного распределения в образце, представленном в единичном экземпляре, с оценкой размеров обнаруженных дефектов.

7. Получение изображения амплитудного распределения двух целых образцов прибором OmniScan X3 компании OLYMPUS и анализ полученной картины с целью оценки наличия возможности применимости метода стоячих волн в качестве системы обнаружения и диагностики скрытых дефектов и в качестве доказательства наличия дефектов типа нарушения сплошности в исследуемом композиционном материале.

8. Предоставление изображений дефектов непосредственно на образце, представленном в единичном экземпляре.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Далее в качестве информативных параметров, предлагаемых для контроля исследуемых объектов, будут рассмотрены амплитудно-частотные спектры и карты амплитудных распределений.

Отметим, что при постоянстве геометрических размеров, материала образцов, а также шумовых характеристик от партии к партии область возникновения пучностей стоячих волн будет проявляться на одних и тех же участках исследуемых образцов. Для локализации данных областей, в частности, и необходима вышеупомянутая «сеть» измерений. Следовательно, обозначив область пучностей для разных мод и установив в данную область считывающий пьезокерамический датчик, становится возможным получить данные с одной единственной точки, расположенной, к примеру, в центре исследуемого образца, на участке пучности стоячей волны, соответствующей первой изгибной моде, что значительно ускорит процедуру получения данных с целью локализации скрытых дефектов в крупных партиях образцов. Однако при наличии скрытых дефектов область пучностей может смещаться от образца к образцу в отдельно взятой партии. Поэтому для первого образца в отдельно взятой партии необходимо пройти «сетью» измерений, локализуя данные области для, к примеру, первой и второй мод, а затем для последующих образцов в рамках отдельно взятой партии выделить три точки, соответствующие пучностям этих мод. Данная процедура позволяет существенно сократить процедуру получения данных до ~ 30 мин на партию из 50 деталей.

На рис. 5 приведены результаты получения амплитудно-частотных спектров для двух целых образцов. Наименования «целый_2» и «целый_3» соответствуют второму и третьему образцам, принадлежавших одной партии.

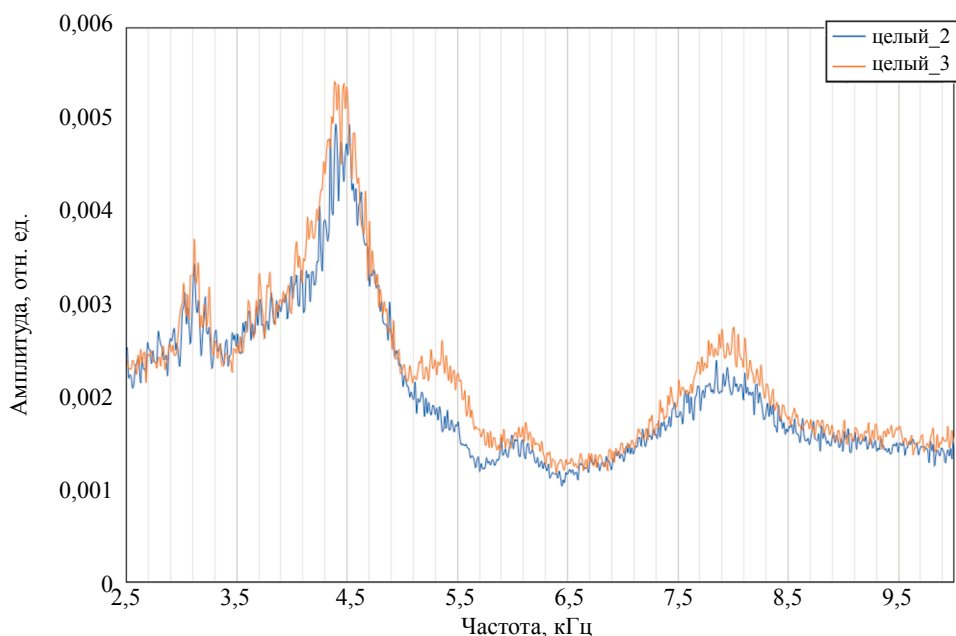


Рис. 5. Сравнение амплитудно-частотных спектров для двух целых образцов.

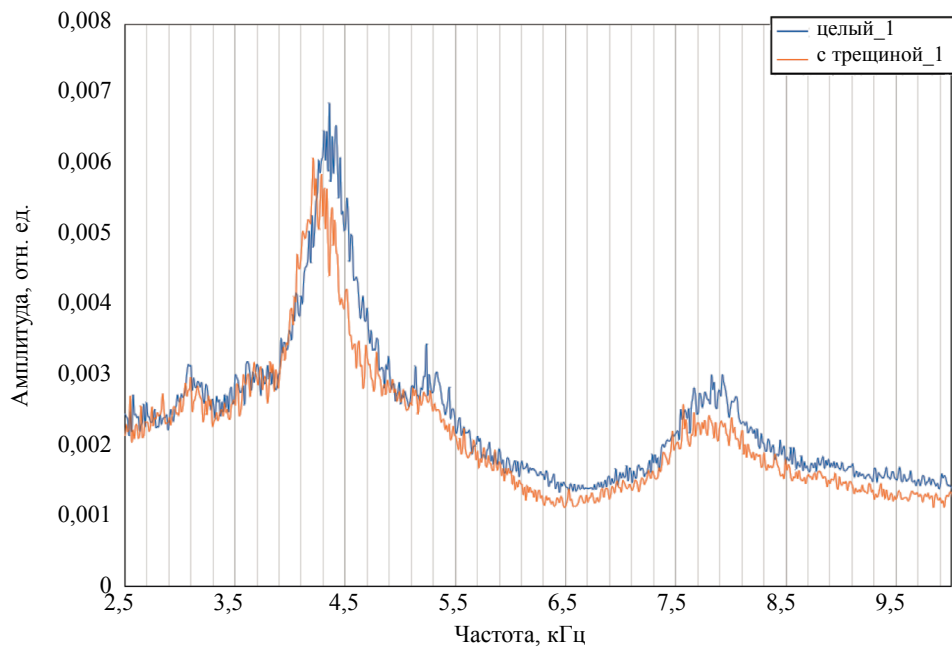


Рис. 6. Сравнение амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной.

На рис. 6 приведены результаты получения амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной. Наименования «целый_1» и «с трещиной_1» соответствуют первому образцу в целом состоянии и ему же, но с созданной трещиной, образец из той же партии, что и образцы, спектры которых показаны на рис. 5.

На рис. 7 приведены результаты получения амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной (единичный экземпляр).

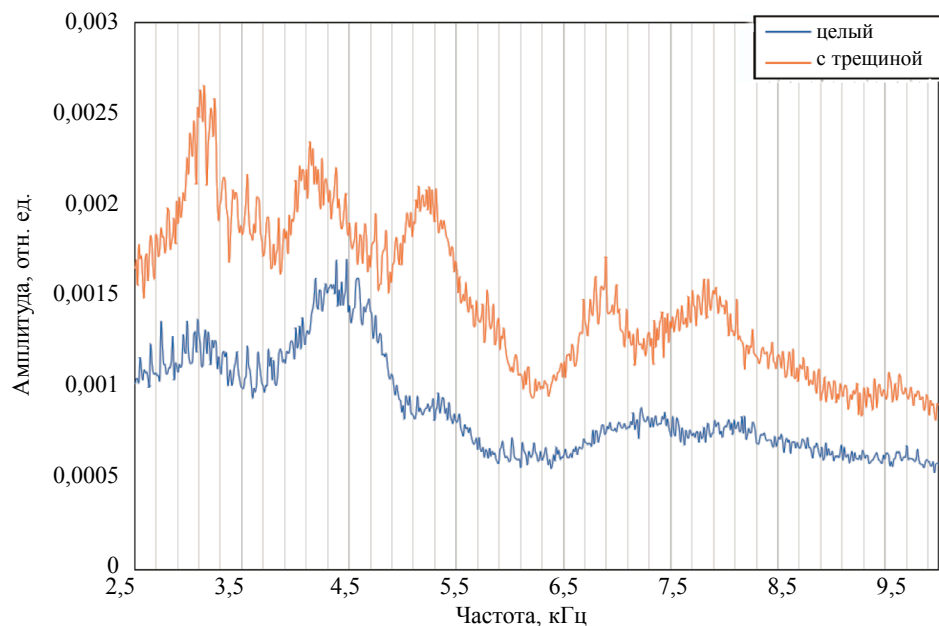


Рис. 7. Сравнение амплитудно-частотных спектров для целого образца и образца с трещиной (единичный экземпляр).

Далее была проведена следующая процедура: образец был разрезан вдоль правой продольной оси, согласно известной системе отсчета с целью наглядной демонстрации присутствия дефектов

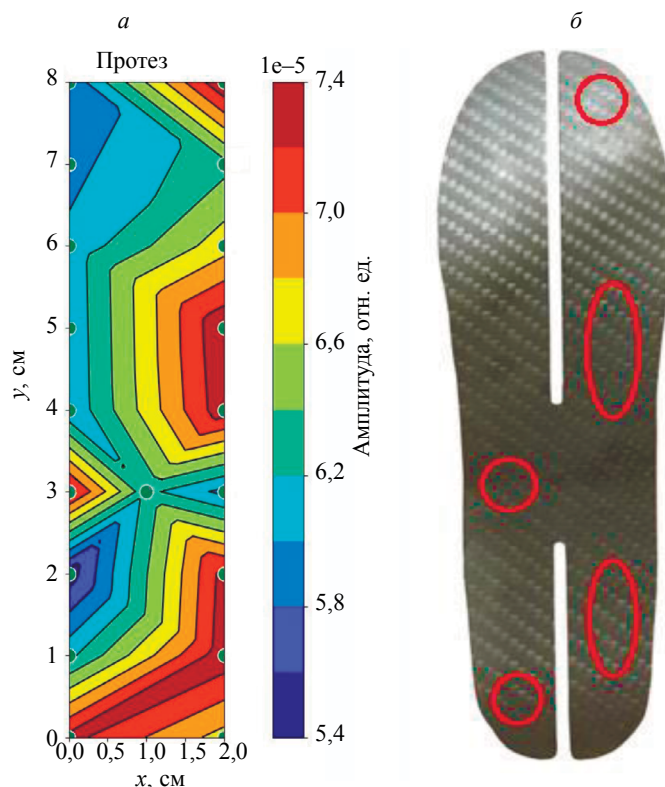


Рис. 8. Амплитудное распределение образца, представленного в единичном экземпляре: *а* — отображение областей с повышенными значениями амплитуд, соответствующих областям с дефектами в образце после излома; *б* — примерное отображение данных областей непосредственно на образце.

в исследуемом образце, т.к. до разрезания образца наличие данных дефектов не было доказано, поскольку после излома визуально они не наблюдались. Подчеркнем, что разрез был сделан вдоль правой стороны, поскольку, ссылаясь на карту амплитудного распределения на рис. 8, наибольшее содержание повышенных значений амплитудных напряжений можно было наблюдать именно с этой стороны. На рис. 10*а—г* представлены изображения образца после излома с визуально неразличимыми дефектами, а также с визуально различимыми дефектами вследствие процедуры разрезания.

На рис. 5 на примере сравнения суммарных спектров двух целых образцов можно увидеть разницу в высоте и ширине пиков, что может говорить о пониженной добротности и прочностных характеристиках одного образца в сравнении с другим. Однако можно предположить о таковых пониженных характеристиках у третьего образца по отношению ко второму, на что может указывать образование дополнительного пика, соответствующего проявлению дополнительной резонансной частоты вследствие возможного возникновения дополнительной границы отражения в третьем образце и отсутствующей во втором (между двумя явно видимыми пиками).

На рис. 6 на примере сравнения суммарных спектров целого образца и образца с трещиной можно сделать вывод, что смещение значений резонансных частот в меньшую сторону у одного из них может быть связано с тем, что данный образец обладает более низкой добротностью в сравнении с другим, что может указывать на то, что в объекте могут присутствовать дефекты, которые могут вызывать потери энергии, т.к. они могут приводить к увеличению потерь на трение, вибрации и т.п. и, как следствие, к пониженной прочности изделия.

На рис. 7, в свою очередь, на примере сравнения суммарных спектров целого образца и образца с трещиной в единичном экземпляре можно наблюдать возникновение дополнительных пиков, соответствующих резонансным частотам дефектного изделия, что говорит о появлении дополнительных границ отражения вследствие возникновения разрывов в его структуре.

По амплитудному распределению, изображенному на рис. 8, можно увидеть области повышенных значений амплитуд, которые могут указывать на проблемные области, в которых присутствуют скрытые дефекты. Размеры областей с наибольшими значениями амплитудных напряжений,

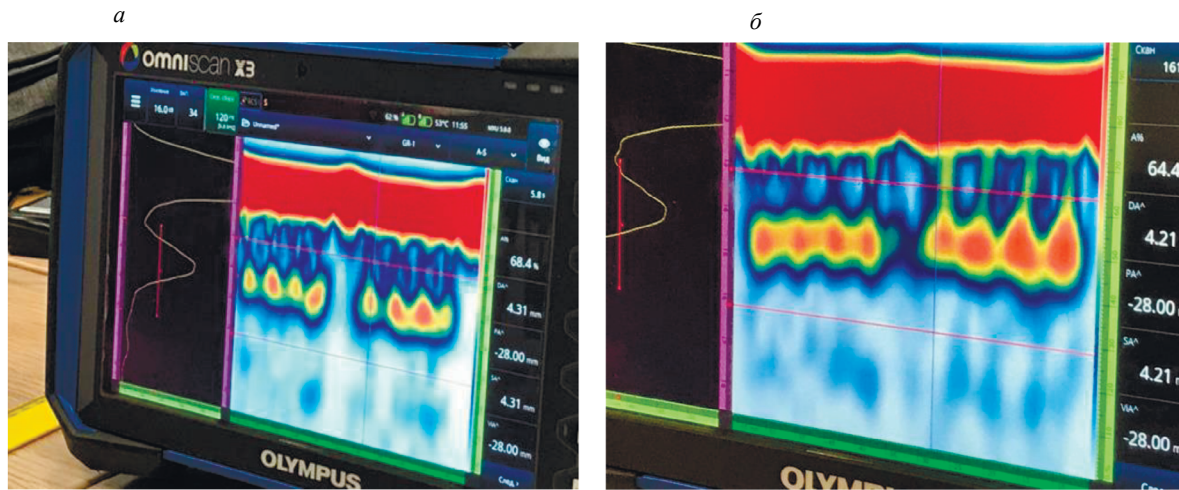


Рис. 9. Амплитудное распределение двух целых образцов, полученное прибором OmniScan X3 компании OLYMPUS: *а* — второй образец (более прочный); *б* — третий образец (менее прочный).

отмеченных красным цветом, могут говорить о размерах дефектов в исследуемом образце (порядка 1—2 см).

По амплитудному распределению, изображаемому на рис. 9, можно увидеть сравнение картин амплитудных распределений, где просматривалась пара из целых деталей стоп с одной партии: одна, как мы заведомо знали по анализу спектров, была наиболее крепкая из всех, одна — с трещиной:

- не обращая внимания на «мертвую зону» вверху картины можно сказать, что наиболее яркие области говорят о присутствии некоторых границ отражения в изделиях, причем интенсивность их выражения указывает на их больший размер и количество в менее крепком образце в сравнении с более крепким образцом;

- более обширная область синих зон внизу картины в менее крепком образце в сравнении с более крепким указывает на повышенное количество пузырей в первом, что скорее всего связано с образованием областей вспучивания в процессе склейки изделий.

На рис. 10*а—б* демонстрируется два изображения дефектного образца, полученного в результате процедуры излома (вид сверху и вид сбоку). Изображения приведены с целью указать на визуальную неразличимость дефектов.

На рис. 10*в—г* демонстрируется два изображения дефектного образца, полученного в результате процедуры излома и последующего разреза отрезным диском толщиной 1,2 мм (вид сверху и вид сбоку). На образце (вид сбоку) можно наблюдать дефекты, приблизительно локализованные в зонах согласно полученной карте амплитудных распределений на рис. 8.

ВЫВОДЫ

В ходе исследований были проведены эксперименты по изучению композиционного материала с использованием метода стоячих волн. Целью работы было изучение возможности обнаружения дефектов в деталях стоп протезов для ног, изготовленных из композиционного материала, с помощью данного метода. В результате экспериментов было установлено, что амплитудно-частотные спектры композиционного материала имеют разное смещение в зависимости от наличия дефектов: значения резонансных частот дефектных образцов оказались ниже значений частот спектров целых образцов, что может говорить о том, что дефектный материал обладает пониженными показателями прочности. Также при исследовании некоторых образцов было отмечено наличие дополнительных резонансных пиков, что говорит о появлении новых границ отражений, соответствующих проявлению дефектов в исследуемых образцах.

Полученные карты амплитудных распределений указывают на возможность локализации дефектов в исследуемых образцах. Получение картин амплитудных распределений прибором OmniScan X3 производства компании OLYMPUS подтверждает присутствие в исследуемых

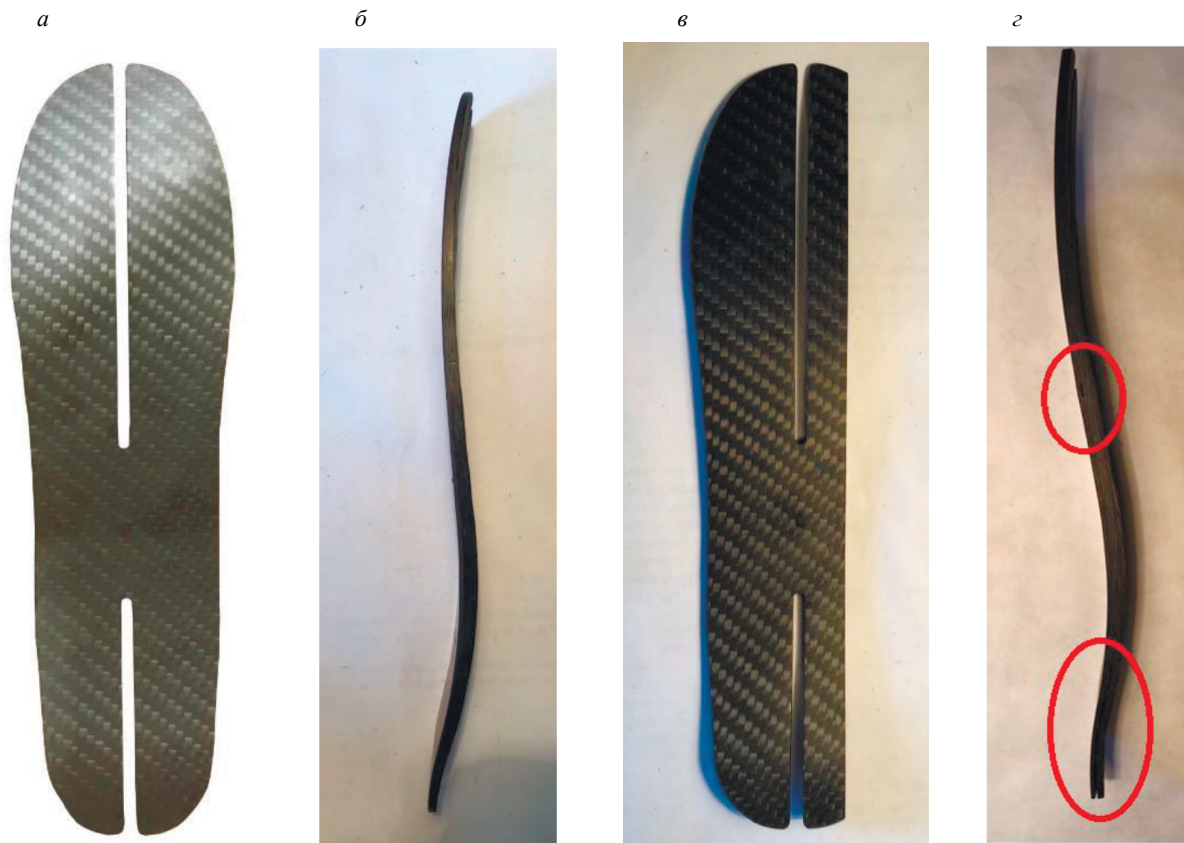


Рис. 10. Изображение образца: после излома с визуально неразличимыми дефектами (вид сверху) (а); после излома с визуально неразличимыми дефектами (вид сбоку) (б); после излома с визуально различимыми дефектами (вид сверху) (в); после излома с визуально различимыми дефектами (вид сбоку) (з).

образцах скрытых дефектов. Данные выводы могут говорить о возможности успешного применения метода стоячих волн в качестве альтернативного способа неразрушающего контроля изделий из композиционного материала, с помощью которого становится возможным в кратчайшие сроки обнаружить и локализовать скрытые дефекты, сэкономив затрачиваемые на это ресурсы и время, а при их обнаружении целесообразно задействовать иные методы контроля, изучая их более предметно, в частности с целью выяснения характеристик искомых дефектов.

Полученные изображения после процедуры разреза дефектного образца наглядно демонстрируют присутствие в нем дефектов с приблизительной локализацией в зонах согласно карте амплитудных распределений.

Итак, для определения годности объекта целесообразно применить следующий подход: задействовать ультразвуковой прибор, который позволяет просмотреть произвольный набор деталей, к примеру, из 5-10 образцов из партии и убедиться, что образцы могут считаться в достаточной мере целыми. Затем определить точки на образце, как правило, пучности, в которых резонансная характеристика будет иметь максимальную амплитуду. Сравнить полученный спектр, где в качестве информативных параметров могут выступать значения частот и амплитуд, со спектром следующего образца, и если они совпадают (в пределах до 2 % по частоте и амплитуде по усмотрению производителя деталей), то данные образцы возможно считать идентичными.

Данный подход позволит быстро и точно определить, какой объект является годным, а какой подлежит замене или дополнительной проверке.

Работа была выполнена в рамках базового проекта FWZZ-2022-0017.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с настоящей работой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарова Ю.А. Обзор методов неразрушающего контроля изделий авиационной техники из полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 1—1.
2. Самуйлов А.О., Черепанов И.С. Исследование полимерных композиционных материалов теневым методом неразрушающего контроля // Жизненный цикл конструкционных материалов. 2021. С. 239.
3. Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Далин М.А., Генералов А.С. Опыт автоматизированного ультразвукового контроля монолитных и сотовых конструкций из ПКМ // Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и перспективы внедрения. 2021. С. 157—180.
4. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов // Труды МАИ. 2011. № 49.
5. Соколовская Ю.Г., Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Лазерный оптико-акустический метод количественной оценки пористости углепластиков на основе измерения их акустического импеданса // Акустический журн. 2020. Т. 66. № 1. С. 86—94.
6. Моход З.У., Вавилов В.П., Ариффин А.К. Ультразвуковая инфракрасная термография в неразрушающем контроле (обзор) // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 31—40.
7. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34—57.
8. Рассыхаева М.Д., Чабаненко А.В. Новые технологии интеллектуальной дефектоскопии для аддитивного производства // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. 2022. С. 112—113.
9. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99).
10. Булыгин Н.Н. Современные неразрушающие методы контроля ответственных изделий // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК. 2020. С. 211—214.
11. Гусева Д.В., Морозов В.В. Сравнительный анализ методов дефектоскопии композиционных материалов // XXV Туполевские Чтения (Школа молодых ученых). 2021. С. 355—358.
12. Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф. О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 1. С. 3—11.
13. Федин К.В., Каргаполов А.А., Колесников Ю.И. Влияние щелевидных дефектов на поле стоячих волн, формирующихся в закрепленной балке под действием акустических шумов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1. № 2. С. 88—92.
14. Колесников Ю.И., Федин К.В., Каргаполов А.А., Еманов А.Ф. О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 4. С. 59—67.
15. Федин К.В., Климонтов В.В. Способ определения плотности костной ткани на основе выделения стоячих волн из микросейсм периферического скелета / Патент РФ № 2750976. 2021.

REFERENCES

1. Zharova Yu.A. Review of methods for non-destructive testing of aircraft products made of polymer composite materials (in Russian) // Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk (Current problems in the humanities and natural sciences). 2014. No. 1—1. P. 34—38.
2. Samuilov A.O., Cherepanov I.S. Research of polymer composite materials using the shadow method of non-destructive testing (in Russian) // Zhiznennyy tsikl konstruktivnykh materialov (Life cycle of structural materials). 2021. P. 239.
3. Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Dalin M.A., Generalov A.S. Experience in automated ultrasonic control of monolithic and cellular structures from PCM (in Russian) // Tsifrovyye tekhnologii, modelirovaniye i avtomatizatsiya protsessov nerazrushayushchego kontrolya v aerokosmicheskoy otrasli. Problemy i perspektivy vnedreniya (In Digital technologies, modeling and automation of non-destructive testing processes in the aerospace industry. Problems and prospect for implementation). 2021. P. 157—180.
4. Boytsov B.V., Vasiliev S.L., Gromashev A.G., Yurgenson S.A. Non-destructive testing methods used for structures made of advanced composite materials (in Russian) // Trudy MAI (Proceedings of MAI). 2011. No. 49. P. 70.

5. *Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A.* Laser optical-acoustic method for quantitative assessment of the porosity of carbon fiber reinforced plastics based on measuring their acoustic impedance (in Russian) // *Akusticheskij zhurnal (Journal of Acoustics)*. 2020. V. 66. No. 1. P. 86—94.
6. *Mohd Z.U., Vavilov V.P., Ariffin A.K.* Ultrasonic infrared thermography in non-destructive testing (review) (in Russian) // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. No. 4. P. 31—40.
7. *Vavilov V.P.* Thermal non-destructive testing of materials and products (review) (in Russian) // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. No. 10. P. 34—57.
8. *Rassykhaeva M.D., Chabanenko A.V.* New intelligent flaw detection technologies for additive manufacturing (in Russian) // *Metrologicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy (In Metrological support of innovative technologies)*. 2022. P. 112—113.
9. *Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhailova N.A., Kosarina E.I.* Study of samples made of polymer composite materials using X-ray computed tomography and processing of tomograms depicting the volume fraction of porosity (in Russian) // *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*. 2021. No. 5 (99). P. 105—113.
10. *Bulygin N.N.* Modern non-destructive methods for control of critical products (in Russian) // *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy dlya effektivnogo razvitiya APK (Current areas of scientific research for the effective development of the agricultural industry)*. 2020. P. 211—214.
11. *Guseva D.V., Morozov V.V.* Comparative analysis of methods for defectoscopy of composite materials (in Russian) // *XXV Tupolevskiy chteniye (Shkola molodykh uchenykh) (XXV Tupolev Readings (School of Young Scientists))*. 2021. P. 355—358.
12. *Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Kargaplov A.A., Yemanov A.F.* On diagnostics of the state of structural elements of structures based on the noise field (according to physical modeling data) (in Russian) // *Journal of Mining Science*. 2012. No. 1. P. 3—11.
13. *Fedin K.V., Kargaplov A.A., Kolesnikov Yu.I.* The influence of slot-like defects on the field of standing waves formed in a fixed beam under the influence of acoustic noise (in Russian) // *Interexpo Geo-Siberia*. 2012. V. 1. No. 2. P. 88—92.
14. *Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Kargaplov A.A., Yemanov A.F.* On diagnosing loss of stability of pipeline supports based on acoustic noise (in Russian) // *Journal of Mining Science*. 2012. No. 4. P. 59—67.
15. *Fedin K.V., Klimontov V.V.* A method for determining bone tissue density based on the isolation of standing waves from microseisms of the peripheral skeleton (in Russian) / RU Patent No. 2750976. 2021.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕЩИН И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛАСТИНЕ

© 2024 г. Ю.Л. Гобов^{1,*}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108
Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *go@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 23.02.2024; после доработки 03.04.2024
Принята к публикации 05.04.2024

Представлена модель дефектов внутренней поверхности ферромагнитной пластины, разработанная с точки зрения идентификации стресскоррозионных трещин на фоне дефектов коррозии с широким раскрытием.

Ключевые слова: дефекты ферромагнетика, трещина, коррозия, дефекты потери сплошности металла, поверхностные дефекты, магнитное поле рассеяния дефекта, тангенциальное намагничивание, MFL-метод.

IDENTIFICATION OF CRACKS AND MATHEMATICAL MODEL OF THE MAGNETOSTATIC FIELD OF DEFECTS IN A PLATE

© 2024 Yu.L. Gobov^{1,*}

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
S. Kovalevskaya str., 18, Yekaterinburg, 620108 Russia
E-mail: *go@imp.uran.ru

A mathematical model of defects in the inner surface of a ferromagnetic plate is presented. The model compares crack-type defects with wide-opening corrosion defects.

Keywords: ferromagnetic defects, crack, corrosion, metal loss of continuity defects, surface defects, defect scattering magnetic field, tangential magnetization, MFL-method.

DOI: 10.31857/S0130308224040039

ВВЕДЕНИЕ

Для выявления и определения размеров дефектов потери металла получил широкое распространение метод магнитного поля рассеяния (MFL). Этот метод в настоящее время находит все более широкое применение при контроле изогнутых и прямых стальных листов. Характерным примером является реализация метода в виде внутритрубных дефектоскопов для контроля магистральных газопроводов [1, 2].

Основная проблема магнитного метода неразрушающего контроля изделий заключается в определении размеров, формы, ориентации и других геометрических параметров дефекта по пространственному распределению магнитного поля рассеяния, т.е. необходимо решить обратную геометрическую задачу магнитостатики. Такая задача может быть решена, если имеется точное аналитическое решение о магнитном поле, создаваемом дефектом в намагниченном ферромагнетике. Однако такое решение существует только для самых простых форм, например, шар в безграничном пространстве с заданной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$. Поэтому приходится искать приближенные методы решения этой задачи с привлечением различных идеализированных моделей, позволяющих в аналитическом виде записать решение прямой задачи и использовать этот результат для решения обратной геометрической задачи магнитостатики. В настоящее время существует большое количество идеализированных математических моделей, описывающих дефекты потери сплошности в пластине, такие как внутренние дефекты, дефекты «открытой» поверхности и дефекты «внутренней» поверхности [3—7]. Построение таких моделей в первую очередь служит для решения обратных задач идентификации, т.е. для определения параметров дефекта. Аналитические модели для решения прямой задачи справедливы только для конкретной формы дефекта. Переход к другой форме дефекта связан с получением нового решения.

Прогресс вычислительной техники и развитие программных средств обеспечили возможность решать прямую задачу практически для любой формы дефекта и для нелинейной зависимости магнитной проницаемости от магнитного поля. В настоящее время существует значительное количество прикладных программ для решения краевых задач магнитостатики методом конечных элементов (ELCUT, ANSYS, FEMM и др.). Однако эти программы могут использоваться в основном для решения прямой задачи, но при попытке их использования для решения обратной задачи требуется дополнительная априорная информация. В таком случае приближенные аналитические модели могут быть более эффективными. Кроме того, такие идеализированные модели могут служить также и для проектирования технических устройств магнитной дефектоскопии.

Тем не менее некоторые особенности полей рассеяния от трещин, возникающих на магистральных трубопроводах, существующие аналитические модели не объясняют. Из математических моделей, описанных в работах [3—7], следует, что поле от трещин увеличивается при увеличении приложенного поля H_0 независимо от ширины трещины. Но практика внутритрубной диагностики показывает, что мелкие трещины лучше выявляются в слабых полях [11]. В работе [8] с помощью численного моделирования в программе ELCUT 4.2 и с учетом нелинейности кривой намагничивания материала показано, что для трещин с раскрытием 0,1 мм поле от трещины не только не растет, но может и уменьшаться при увеличении приложенного поля. Для объяснения такого эффекта необходимо разработать аналитическую модель для вычисления поля от трещины различной ширины с учетом нелинейной зависимости материального уравнения ферромагнетика $B(H)$.

ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРЕЩИН ПРИ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Особенностью внутритрубного контроля магистральных газопроводов является то, что дефекты в основном сосредоточены на наружной стороне трубопроводов, а контроль проводится с внутренней стороны.

В настоящее время во внутритрубной магнитной дефектоскопии достигнут существенный прогресс с точки зрения технической реализации и выявления магнитных аномалий. Однако обратная геометрическая задача по идентификации и определения размеров дефектов решается только для достаточно крупных дефектов — широких и глубоких дефектов. Для неглубоких дефектов отличить трещину с малым раскрытием (стресскоррозионные дефекты) от других типов дефектов не удается.

Анализ статистики аварий на магистральных газопроводах показывает, что после проведения внутритрубной магнитной диагностики число аварий значительно снижается. Тем не менее не все дефекты, выявляемые по полям рассеяния, удастся идентифицировать и ранжировать по степени опасности. В настоящее время больше половины аварий вызвано стресскоррозионными дефектами. Этот вид разрушения стенок трубопроводов также называют коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН).

Дефекты КРН существенно отличаются от дефектов, связанных с потерей металла, таких как коррозионные язвы и питтинговая коррозия. Дефекты потери металла характеризуются сравнительно гладкими краями. В то время как дефект КРН представляет собой колонию нераскрывшихся трещин глубиной 5—20 % от толщины стенки трубы [9].

Метод MFL не выявляет достоверно неглубокие (до 15 % толщины стенки трубопровода) стресскоррозионные трещины из-за того, что чувствительные к изменению магнитного поля датчики при внутритрубной диагностике находятся по определению внутри трубы, а стресскоррозионные трещины всегда образуются на внешней поверхности трубопровода.

При этих условиях изменения магнитного поля, регистрируемые датчиками внутритрубного дефектоскопа, носят очень размытый характер. А так как амплитуда магнитного сигнала падает пропорционально квадрату расстояния между датчиком и дном трещины, то магнитный сигнал от внешней трещины глубиной 10—15 % сопоставим по амплитуде с уровнем шума, который регистрируется этими датчиками из-за шероховатости внутренней поверхности трубопровода. При этом величина неровностей на внутренней поверхности новых трубопроводов составляет порядка 0,1 мм и увеличивается до 0,3 мм и более в трубопроводах эксплуатировавшихся несколько лет.

Из-за этого фундаментального недостатка MFL-метод не оправдывает тех надежд, которые еще недавно возлагались на него с точки зрения мониторинга стресскоррозионных повреждений магистральных газопроводов. MFL-метод подходит только для регистрации глубоких трещин (более 20 % толщины стенки трубы) и дефектов уноса металла.

Необходимо отметить, что в настоящее время в технические отчеты по внутритрубной дефектоскопии вносятся лишь дефекты КРН глубиной более 15 % от толщины стенки трубы. Вместе с тем по магнитограммам реальных дефектов КРН, обнаруженных на магистральных газопроводах внутритрубными дефектоскопами MFL, установлено, что они способны обнаруживать трещины КРН с глубиной, значительно меньшей 15 % (5—10 %).

Другой вопрос, что уверенное (с вероятностью не ниже 80 %) выявление и идентификация магнитными методами стресскоррозии глубиной менее 15 % от толщины стенки в настоящее время считается невозможным.

Еще более сложная задача — распознавание трещин и дефектов потери металла в сварных швах и вблизи швов. При глубине трещин менее 15 % (5—10 %) очень важно с высокой вероятностью (с вероятностью не ниже 80 %) идентифицировать трещину, т.е. определить, что это не дефект типа коррозии с плавными краями, а именно трещина.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для мониторинга КРН необходимо с высокой достоверностью не только обнаруживать, но и идентифицировать все трещины (одиночные и в колониях) с глубиной 10 % и даже меньше. Для проектирования подобного внутритрубного магнитного дефектоскопа необходима упрощенная аналитическая модель, объясняющая изменения полей от трещины с изменением приложенного магнитного поля H_0 . Такая модель должна учитывать нелинейность магнитных свойств стенки трубы при изменении намагничивающего поля.

В настоящей работе предложена новая математическая модель на основе упрощенной расчетной схемы магнитной цепи, описывающей обтекание магнитным потоком поверхностного дефекта в пластине. Такая модель позволяет рассмотреть с общих позиций дефекты типа трещин и широкие дефекты (типа коррозионные язвы и питтинговая коррозия, у которых ширина больше или равна глубине). Предложенная модель позволяет рассмотреть различные типы дефектов и определить, в каких случаях поля рассеяния от трещин будут существенно отличаться от других типов дефектов.

Для сравнения с расчетами по предлагаемой упрощенной модели приводятся результаты численного моделирования поля прямоугольной щели и канавки с широким раскрытием, выполненные в программе ELCUT 4.2.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА

На рис. 1 приведен пример обтекания магнитным потоком поверхностных дефектов в ферромагнитной пластине толщиной D . Пластина бесконечная как в ширину, так и в глубину рисунка (рассматриваем только двумерный случай). Магнитное поле величиной H_0 приложено слева направо вдоль пластины. Выделим два типа дефектов: дефекты типа трещины шириной b и глубиной h , причем ($b \ll h$), и дефекты типа общей коррозии, у которых ширина дефекта больше, чем глубина. На рисунке приведены результаты расчетов, выполненные в программе ELCUT 4.2 для случая нелинейных свойств ферромагнетика. Магнитные потоки, обтекающие эти дефекты, качественно отличаются друг от друга. Для дефектов типа коррозии ($b > h$) магнитным потоком, протекающим через область потери сплошности ферромагнетика, можно пренебречь, и практически весь поток будет протекать над дефектом по неповрежденной части ферромагнетика. Для трещин ($b \ll h$) необходимо учитывать, что часть магнитного потока будет протекать сквозь трещину (см. рис. 1). В таком случае можно ожидать, что с увеличением приложенного поля H_0 измеряемое поле рассеяния от дефектов коррозии будет увеличиваться, а от трещин поле рассеяния будет убывать.

Для проверки высказанного предположения рассмотрим модель растекания магнитного потока, вызванного дефектами разного типа (рис. 2).

На этой схеме магнитный поток F_0 , текущий в бездефектной части пластины, разделяется на четыре потока: F_x , F_d и потоки по воздуху F_v . При этом потоками в воздухе F_v можно пренебречь ввиду их малости по сравнению с F_x и F_d .

$F_0 = B_0 \cdot D$ — суммарный магнитный поток при отсутствии дефекта;

$F_x = B_x \cdot (D-h)$ — магнитный поток обтекает дефект по неповрежденной части пластины;

F_d — магнитный поток проходящий по дефекту (по области потери сплошности ферромагнитной пластины);

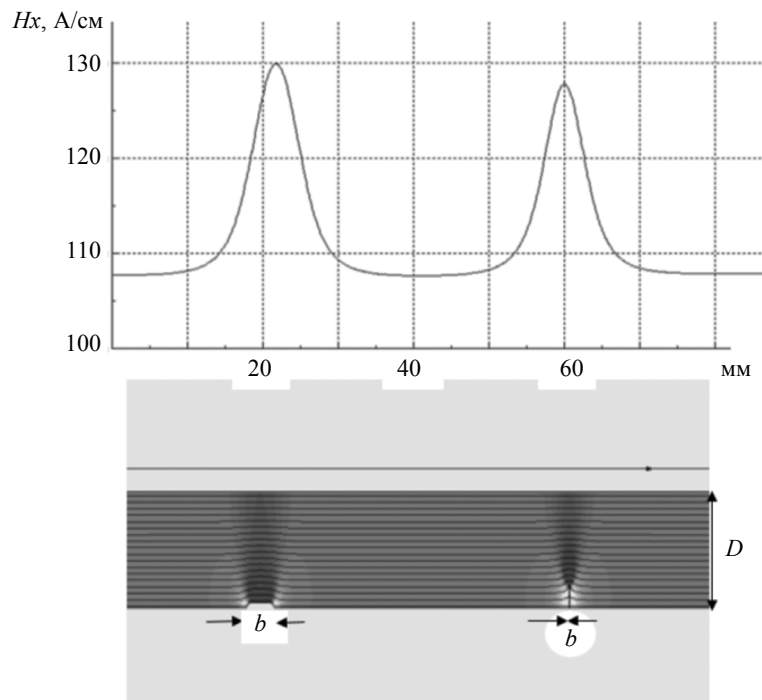


Рис. 1. Обтекание магнитного потока различных типов дефектов, расположенных на «внутренней» поверхности ферромагнитной пластины, и поле, измеренное над противоположной поверхностью. Результаты расчетов, выполненные в программе ELCUT 4.2.

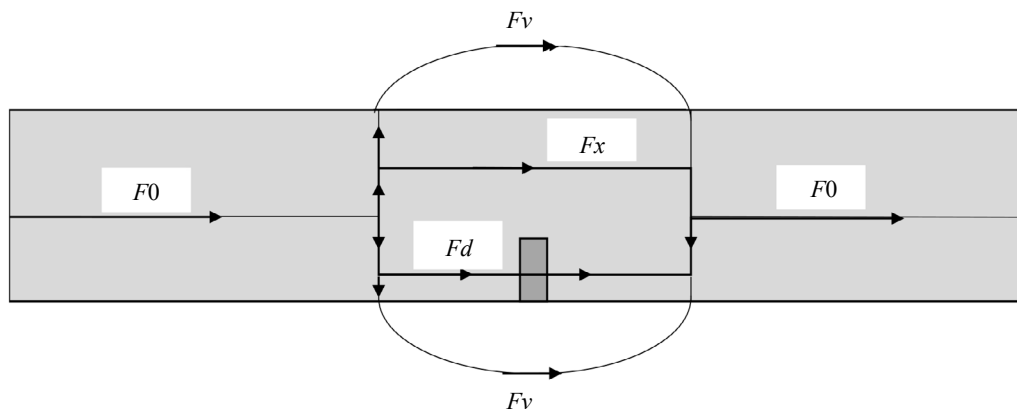


Рис. 2. Растекание магнитного потока вблизи дефекта.

B_0 — индукция в бездефектной области пластины;

B_x — индукция в неповрежденной области пластины над дефектом;

B_d — индукция в металле, в области потери сплошности ферромагнетика.

Вычислим магнитные сопротивления для потоков F_x и F_d и их суммарное сопротивление для потока F_0 . Будем считать, что растекание магнитного потока происходит только на расстоянии, равном толщине пластины в обе стороны от дефекта шириной b , т.е. в области $(b+2D)$ вблизи дефекта. Упрощенная расчетная схема магнитной цепи показана на рис. 3. Используя схему магнитной цепи, можно вычислить величину B_x и если известно материальное уравнение $B(H)$, то определить усредненное поле на поверхности над трещиной. Учитывая, что тангенциальная составляющая на поверхности ферромагнетика непрерывна, тем самым определим поле в воздухе над трещиной.

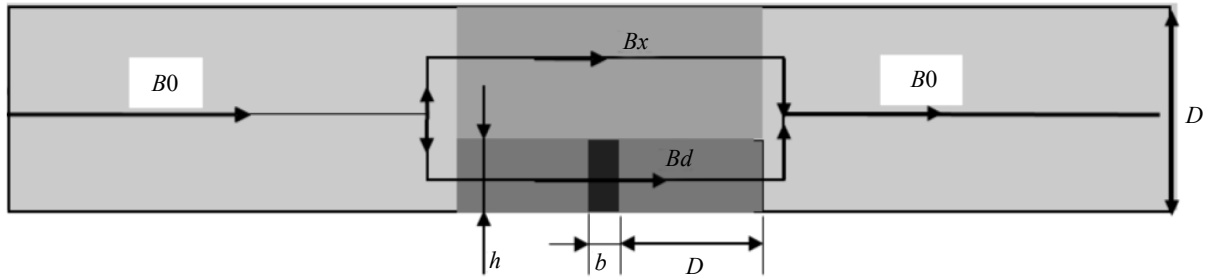


Рис. 3. Расчетная схема магнитной цепи растекания магнитного потока вблизи дефекта.

$$R_x(H) = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu(H)} \cdot \frac{b + D \cdot 2}{D - h}; \quad (1)$$

$$R_d(H) = \frac{b}{\mu_0 \cdot h} + \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu(H)} \cdot \frac{b + D \cdot 2}{h}; \quad (2)$$

$$R_{dx}(H) = \frac{R_x(H) \cdot R_d(H)}{R_x(H) + R_d(H)}, \quad (3)$$

где R_x — магнитное сопротивление в области протекания магнитного потока с индукцией B_x ; R_d — магнитное сопротивление в области протекания магнитного потока через трещину; R_{dx} — суммарное сопротивление при параллельном соединении сопротивлений R_x и R_d .

В выражения (1) и (2) входит зависимость магнитной проницаемости от приложенного поля. Для данной модели растекания магнитного потока будем считать, что магнитная проницаемость ферромагнетика вблизи дефекта равна магнитной проницаемости в области вдали от дефекта. Для определения этой зависимости необходимо знать кривую намагничивания ферромагнитного материала стенки трубы, в которой обнаружен дефект.

Для описания кривой намагничивания ферромагнетика $B_0(H)$ и магнитной проницаемости $\mu(H)$, входящей в выражения (1) и (2), используем формулу Фрелиха [10] (такая формула хорошо описывает кривую намагничивания вблизи технического насыщения):

$$B_0(H) = \mu_0 \cdot J_s \cdot \frac{H}{as + H} + H. \quad (4)$$

Для кривой намагничивания низкоуглеродистой стали используем следующие значения для величин, входящих в (4): $\mu_0 J_s = 2,1$ Тл; $as = 1200$ А/м; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Используя формулу Фрелиха (4) (сплошная кривая на рис. 4), найдем дифференциальную магнитную проницаемость:

$$\mu(H) = \frac{d}{dH} \frac{B_0(H)}{\mu_0} = \frac{J_s}{(H + as)} - \frac{H \cdot J_s}{(H + as)^2} + 1. \quad (5)$$

Теперь, используя расчетную схему магнитной цепи (см. рис. 3), можно определить магнитный поток $F_x = B_x \cdot (D - h)$ и магнитную индукцию B_x соответственно:

$$B_x(H) = B_0(H) \cdot \frac{D}{D - h} \cdot \frac{R_d(H)}{R_d(H) + R_x(H)}. \quad (6)$$

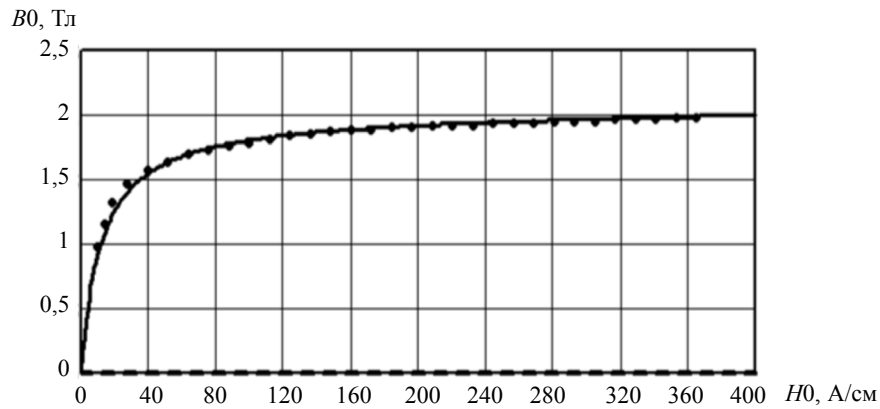


Рис. 4. Кривая намагничивания стали Ст20 и ее аппроксимация по выражению (4).

Магнитное поле, создаваемое дефектом, можно вычислить двумя способами. Первый способ: зная индукцию в области Bx , и при условии, что тангенциальная составляющая поля на поверхности ферромагнетика непрерывна, находим:

$$\Delta H1 = Hx - H0 = \frac{Bx(H) - B0(H)}{\mu_0 \mu(H)}. \quad (7)$$

Второй способ: зная общее магнитное сопротивление, создаваемое дефектом Rdx , и суммарный магнитный поток $F0 = B0 \cdot D$, который протекает по этому сопротивлению, можно определить падение магнитного потенциала на дефектной области ферромагнитной пластины и затем вычислить магнитное поле, создаваемое дефектом:

$$\Delta H2 = B0(H) \left(\frac{D}{b+D} \cdot \frac{Rx(H) \cdot Rd(H)}{Rx(H) + Rd(H)} \right) - \frac{B0(H)}{\mu_0 \cdot \mu(H)}. \quad (8)$$

Выражение (7) определяет среднее поле, создаваемое дефектом на расстоянии $(b + 2D)$ на неповрежденной поверхности пластины. Выражение (8) также определяет поле на этой поверхности, но из него следует, что это среднее поле в области $(b + 2D)$ будет средним полем и с другой стороны пластины.

Поле $\Delta H1$ — это усредненное поле в области $(b + 2D)$. Максимальное поле, создаваемое дефектом ΔHm , будет больше в зависимости от ширины дефекта, а для широких дефектов коэффициент увеличения будет стремиться к единице.

Таким образом, максимальное поле, создаваемое дефектом, можно определить так:

$$\Delta Hm = \frac{Bx(H) - B0(H)}{\mu_0 \cdot \mu(H)} \times \alpha(b). \quad (9)$$

Так как среднее поле в области $(b + 2D)$ меньше ΔHm , результат надо умножить на коэффициент $\alpha(b)$. Для трещин $\alpha(b) \approx 4$. С увеличением ширины дефекта коэффициент уменьшается до $\alpha(b) \approx 1$, как показано на рис. 5 (зависимость $\alpha(b)$ получена в результате численного моделирования намагничивания дефектов в пластине с различной величиной b).

Используя выражение (9) и коэффициент $\alpha(b)$ (см. рис. 5), можно вычислить поле $\Delta Hm(H0)$, создаваемое дефектами различной глубины h и раскрытия b .

На рис. 5 и 6 приведены результаты, использующие выражения (7)–(9). Оба способа полностью совпадают, как это и следует из расчетной схемы магнитной цепи растекания магнитного потока вблизи дефекта (см. рис. 3).

На рис. 6 показаны кривые изменения поля дефекта $\Delta Hm(H0)$ при изменении намагничивающего поля для дефектов с различным раскрытием при глубине дефекта $h = 1$ мм (толщина пластины $D = 10$ мм). Расчеты выполнены по выражению (7).

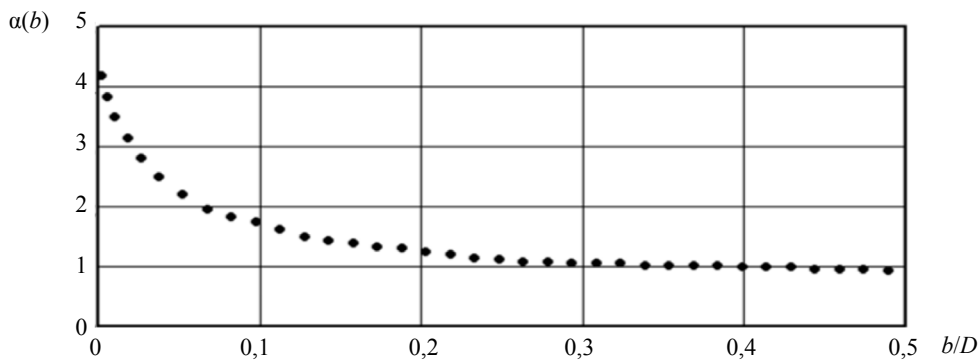


Рис. 5. Коэффициент пересчета с усредненного поля $\Delta H1(H0)$ в максимальное поле, создаваемое дефектом $\Delta Hm(H0)$.

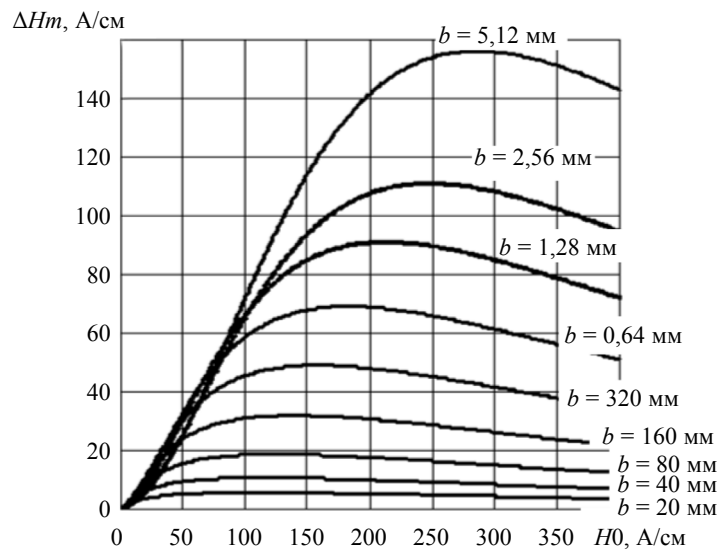


Рис. 6. Изменение поля, создаваемого дефектом $\Delta Hm(H0)$ с различным раскрытием b . Толщина ферромагнитной пластины $D = 10$ мм. Глубина дефекта $h = 1$ мм.

Из анализа приведенных результатов на рис. 6 можно сделать следующие выводы. Поля от трещин с раскрытием, много меньше глубины, уменьшаются с увеличением приложенного поля в области технического насыщения. Поля от дефектов с раскрытием, больше глубины дефекта, увеличиваются с увеличением приложенного поля и начинают уменьшаться только в больших полях $H0 \approx 250$ А/см и больше.

На рис. 7 показан результат расчета по выражению (9) для трещины глубиной 1 мм и раскрытием 40 мкм при изменении приложенного поля. На этом же рисунке приведен аналогичный график для дефекта глубиной 0,2 мм и раскрытием 1 мм (сплошные кривые).

Для сравнения на этих же графиках показаны результаты численного моделирования этих же дефектов для нелинейного случая с кривой намагничивания по формуле (4), выполненные в программе ELCUT 4.2.

При измерении в приложенном поле (например, в поле $H0 = 100$ А/см) невозможно определить, что это — опасная трещина или небольшая неопасная коррозионная канавка. Но при измерении в двух полях (например, в поле $H0 = 100$ А/см и $H0 = 200$ А/см) легко отличить трещину от коррозии даже на фоне значительных шумов. Действительно, с увеличением приложенного поля $H0$ поле рассеяния от трещины уменьшается, а поле рассеяния от коррозионной канавки увеличивается более чем в 2 раза.

На рис. 8 приведены результаты численного моделирования в полях $H0 = 100$ А/см и $H0 = 200$ А/см для трещины на фоне помех от широких дефектов, расположенных как с внутренней, так и с наружной стороны пластины.

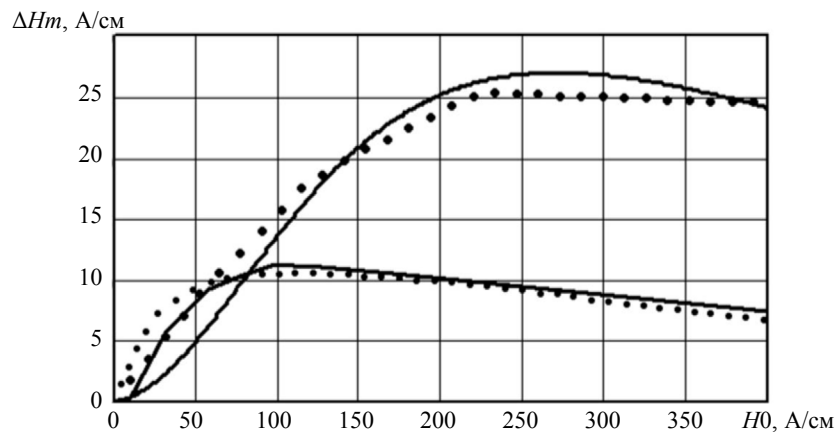


Рис. 7. Поле рассеяния $\Delta H_m(H_0)$ в пластине ($D = 10$ мм), создаваемое трещиной ($h = 1$ мм, $b = 40$ мкм) и канавкой ($h = 0,2$ мм, $b = 1$ мм). Сравнение результатов расчетов по выражению (9) (сплошные линии) и численное моделирование в программе ELCUT 4.2.

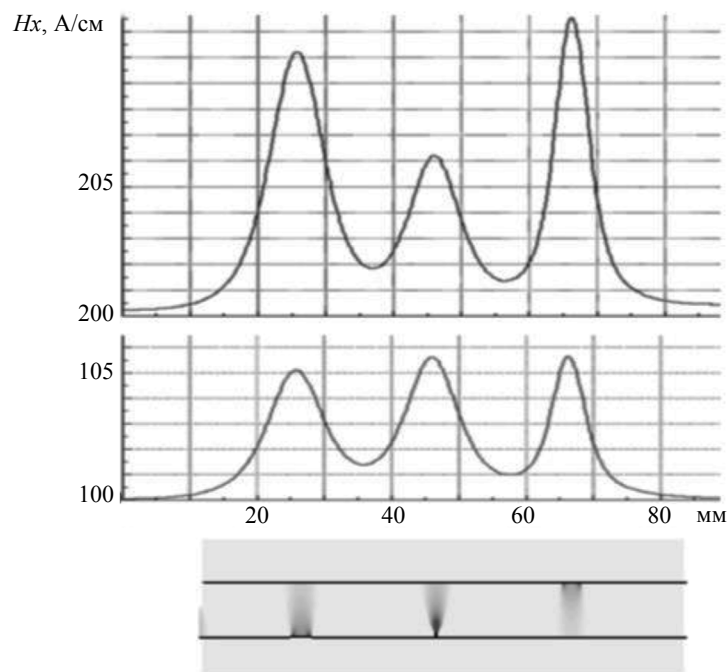


Рис. 8. Поле рассеяния $\Delta H_m(H_0)$ в пластине ($D = 10$ мм), создаваемое трещиной ($h = 1$ мм, $b = 50$ мкм) и канавками шириной 3 мм ($h = 0,25$ мм с «внутренней» поверхности и $h = 0,2$ мм с «открытой» поверхности). Результаты расчетов, выполненные в программе ELCUT 4.2.

Из рис. 8 видно, что поля рассеяния от широких дефектов (дефекты типа общей коррозии) увеличились примерно в два раза при увеличении поля H_0 от 100 до 200 А/см. А поле от трещины не изменилось. В таком случае трещину легко идентифицировать на фоне помех от мелких дефектов типа коррозии, даже если эти дефекты расположены с «открытой» поверхности, т.е. со стороны измерения магнитного поля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НА РЕАЛЬНОМ ДЕФЕКТЕ, ИМИТИРУЮЩЕМ ТРЕЩИНУ

Для проверки полученных результатов были проведены измерения на образцах, имитирующих

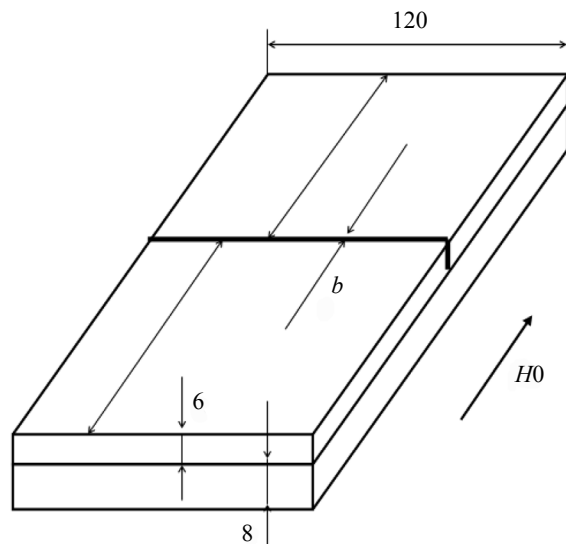


Рис. 9. Имитация трещины с варьируемым раскрытием (b) тремя стальными пластинами (измерение поля рассеяния производилось под нижней поверхностью образца).

трещину с различным раскрытием. Были изготовлены две пластины размером $120 \times 120 \times 6$ мм и одна пластина размером $240 \times 120 \times 8$ мм. С помощью этих пластин имитировалась трещина с различным раскрытием в зависимости от расстояния между малыми пластинами, как показано на рис. 9. Образец намагничивался в электромагните полем от $H_0 = 6000$ до 50000 А/м, а на расстоянии 4 мм от поверхности большой пластины измерялась топография тангенциальной составляющей полей рассеяния $H_x(L)$.

Для случая, когда трещина создавалась прокладкой толщиной $b = 100$ мкм, при поле $H_0 = 10\,000$ А/м — поле от трещины было $\Delta H_m = 5400$ А/м, при поле $H_0 = 22000$ А/м — поле от трещины было $\Delta H_m = 6000$ А/м и при поле $H_0 = 40800$ А/м — поле от трещины было $\Delta H_m = 5900$ А/м.

Такие результаты подтверждают, что поле от трещины с раскрытием от 100 мкм и менее в полях от $H_0 = 10000$ до $H_0 = 40000$ А/м практически остается постоянным или начинает уменьшаться.

ВЫВОДЫ

Предложена новая математическая модель для определения полей рассеяния от поверхностных дефектов «внутренней» поверхности на основе расчета эквивалентной схемы растекания магнитных потоков по дефекту потери сплошности и по неповрежденной части ферромагнетика. Математическая модель позволяет рассматривать и дефекты типа трещин, и дефекты коррозии типа язвы, каверны, канавки как в линейном случае, так и при изменении дифференциальной магнитной проницаемости при нелинейной зависимости $B(H)$.

На основе анализа рассмотренной модели предлагается метод идентификации трещин малой глубины (менее 15 %) по результатам измерения в двух приложенных полях. Такой метод позволит определять наличие трещин на фоне шумов, создаваемых мелкой коррозией, в том числе небольшими дефектами общей коррозии, даже если эти дефекты расположены на «открытой» поверхности трубопровода, а измерение производится с этой же стороны, а трещины расположены с противоположной «внутренней» поверхности пластины.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канайкин В.А. Внутритрубная магнитная дефектоскопия магистральных трубопроводов / Под ред. А.Ф. Матвиенко. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 307 с.
2. Внутритрубная диагностика с помощью магнитных дефектоскопов MFL/CDP и (или) TFI/AFD, в том числе HIGH RESOLUTION, НТЦ «НефтеГазДиагностика», 2013. https://ntengd.com/uslugi/article_post/vnutritrubnaya-diagnostika-spomoshchyu-magnitnykh-defektoskopov-vysokogo-razresheniya

3. *Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е.* К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—65.
4. *Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф.* Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине // Дефектоскопия. 2002. № 11. С. 17—25.
5. *Мужичкий В.Ф., Щербинин В.Е.* Магнитное поле короткого дефекта типа прямоугольной щели // Дефектоскопия. 2006. № 2. С. 58—63.
6. *Кушнер А.В., Новиков В.А.* Анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. № 1 (42).
7. *Мужичкий В.Ф.* К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины // Дефектоскопия. 1987. № 7. С. 8—13.
8. *Реутов Ю.Я., Лоскутов В.Е.* Топография поля щели при нелинейном намагничивании // Дефектоскопия. 2004. № 10. С. 70—78.
9. *Аскарлов Р.М., Усманов Р.Р., Чучкалов М.В., Аскарлов Г.Р.* Особенности коррозионного растрескивания под напряжением на современном этапе эксплуатации магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2017. № 10. С. 40—45.
10. *Матюк В.Ф., Осипов А.А.* Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 2. С. 3—35.
11. Особенности выявления дефектов КРН различными средствами диагностирования и методами неразрушающего контроля. ООО «Газпром ВНИИГАЗ». https://vniigaz.gazprom.ru/d/textpage/01/513/08_zotov-%28lazarev%29-osobennosti-vyyavleniya-krn-vtd-nk-versiya-2.pdf

REFERENCES

1. *Kanaykin V.A.* In-pipe magnetic flaw detection of main pipelines / Ed. A.F. Matvienko. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 307 p.
2. In-line diagnostics using magnetic flaw detectors MFL/CDP and (or) TFI/AFD, including HIGH RESOLUTION, STC «NefteGazDiagnostics», 2013. https://ntcngd.com/uslugi/article_post/vnutritrubnaya-dagnostika-spomoshchyu-magnitnykh-defektoskopov-vysokogo-razresheniya
3. *Zatsepin N.N., Shcherbinin V.E.* Towards the calculation of the magnetostatic field of surface defects // Defectoscopya. 1966. No. 5. P. 50—65.
4. *Zagidulin R.V., Muzhitsky V.F.* Three-dimensional model of a continuity defect of finite extent in a ferromagnetic plate // Defectoscopya. 2002. No. 11. P. 17—25.
5. *Muzhitsky V.F., Shcherbinin V.E.* Magnetic field of a short defect such as a rectangular slot // Defectoscopya. 2006. No. 2. P. 58—63.
6. *Kushner A.V., Novikov V.A.* Analysis of defect models in theoretical studies of magnetic stray fields arising during magnetization of ferromagnetic objects // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2014. No. 1 (42).
7. *Muzhitsky V.F.* Towards the calculation of magnetostatic stray fields from surface defects of finite depth // Defectoscopya. 1987. No. 7. P. 8—13.
8. *Reutov Yu.Ya., Loskutov V.E.* Topography of the slot field under nonlinear magnetization // Defectoscopya. 2004. No. 10. P. 70—78.
9. *Askarov R.M., Usmanov R.R., Chuchkalov M.V., Askarov G.R.* Features of stress corrosion cracking at the present stage of operation of main gas pipelines // Gas industry. 2017. No. 10. P. 40—45.
10. *Matyuk V.F., Osipov A.A.* Mathematical models of the magnetization curve and magnetic hysteresis loops. Part I. Analysis of models // Non-destructive testing and diagnostics. 2011. No. 2. P. 3—35.
11. Features of identifying SCC defects using various diagnostic tools and non-destructive testing methods. Gazprom VNIIGAZ LLC. https://vniigaz.gazprom.ru/d/textpage/01/513/08_zotov-%28lazarev%29-osobennosti-vyyavleniya-krn-vtd-nk-versiya-2.pdf

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРОВ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ПРИ АЛЬБЕДНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

© 2024 г. Е.Е. Журавский^{1,*}, Д.С. Белкин^{1,**}, Б.И. Капранов^{1,***}, С.В. Чахлов^{1,****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: *zhuravskiy@tpu.ru; **Belkin@tpu.ru; ***introbob@mail.ru; ****chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 10.07.2024; после доработки 28.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Рассмотрены способы определения положения и размера несплошностей при альбедной дефектоскопии. Показаны аналитические и численные решения задачи определения положения несплошностей на основании известных параметров коллимационной системы. Показана зависимость положения несплошности от параметров коллимационной системы. Предложено определять не истинный размер несплошности, а ее эквивалентную площадь, аналогично ультразвуковой дефектоскопии.

Ключевые слова: дефектоскопия, коллимационная система, неразрушающий контроль, радиационный контроль, приборостроение.

DETERMINATION OF POSITION AND SIZE OF NON-FLAWS AT ALBEDO FLAW DETECTION

© 2024 E.E. Zhuravskiy^{1,*}, D.S. Belkin^{1,**}, B.I. Kapranov^{1,***}, S.V. Chakhlov^{1,****}

¹Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., 30, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: *zhuravskiy@tpu.ru; **Belkin@tpu.ru; ***introbob@mail.ru; ****chakhlov@tpu.ru

In this article the methods of determining the position and size of non-flaws in albedo flaw detection are considered. Analytical and numerical solutions of the problem of determining the location of non-flaws on the basis of known parameters of the collimation system are shown. The dependence of the location of the flaw on the parameters of the collimation system is shown. It is proposed to determine not the true size of the flaw, but its equivalent area, similar to ultrasonic flaw detection.

Keywords: flaw detection, collimation system, non-destructive testing, radiation inspection, instrument engineering.

DOI: 10.31857/S0130308224040043

ВВЕДЕНИЕ

К опасным объектам относятся различные продуктопроводы: нефтепродуктопроводы, газопроводы, а также сосуды и резервуары, работающие под избыточным давлением или содержащие взрывопожароопасные и химически опасные вещества. Все перечисленные объекты подвержены различного рода разрушениям: механическим, коррозионным и эрозионным. Механические повреждения достаточно просто выявить визуально. Коррозионные или эрозионные разрушения выявляются при помощи неразрушающих методов контроля, таких как радиография и ультразвуковая толщинометрия [1—6]. На данный момент можно контролировать продуктопровод или резервуар на стадии эксплуатации, применяя радиографические трансмиссионные методы контроля, т.е. на просвет через две стенки. Существуют достоверные методики определения положения коррозионных и эрозионных разрушений, а также величины этих разрушений при помощи радиографии. Но использующиеся для этого средства предполагают большие дозовые нагрузки, которые вынуждают изолировать определенные радиационно опасные зоны на объекте, вследствие чего возникает ряд организационных трудностей. Использование ультразвуковых методов для выявления и измерения разрушений также связано с рядом организационных трудностей — снятием изоляционных покрытий, а в некоторых случаях применение ультразвука ограничено температурой поверхности объекта. Уменьшение дозовых нагрузок, а также уменьшение числа организационных мероприятий возможно при использовании радиационных методов контроля на основе обратно рассеянного рентгеновского или гамма-излучения [6—17]. Коррозионные и эрозионные разрушения в действующей нормативно-технической документации определяются неоднозначно, т.е. не существует нормативного значения площади разрушения, положения разрушения, его глубины,

которые давали бы однозначные оценки дальнейшей эксплуатации объекта. Вследствие этого нами предложен способ определения параметров несплошностей с помощью альбедной дефектоскопии, в котором основной целью является определение положения коррозионного или эрозионного разрушения и его эквивалентной площади, аналогично классической ультразвуковой дефектоскопии.

АЛЬБЕДНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Под альбедным способом дефектоскопии (АСД) в данной статье понимается совокупность средств контроля, методик сканирования объекта контроля (ОК) коллимированным (щелевым) рентгеновским или гамма-излучением (КИ), формирующим в ОК эмиссионный источник обратнорассеянного гамма-излучения (ОРИ), направленного на детектор, в целях определения положения и эквивалентной площади несплошности в ОК. АСД не относится к томографическим методам.

СПОСОБ СКАНИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ

Рассмотрим коллимационную систему (КС) и схему формирования обратнорассеянного излучения (рис. 1), состоящую из источника рентгеновского или гамма-излучения, первичного щелевого коллиматора (ПЩК), вторичного щелевого коллиматора (ВЩК) и детектора в виде сцинтиллятора. На рисунке показана плоская геометрия прямого и рассеянного пучков, т.е. показаны центральные пучки из первичного и рассеянного потоков излучения, формируемых первичным и вторичным щелевыми коллиматорами соответственно.

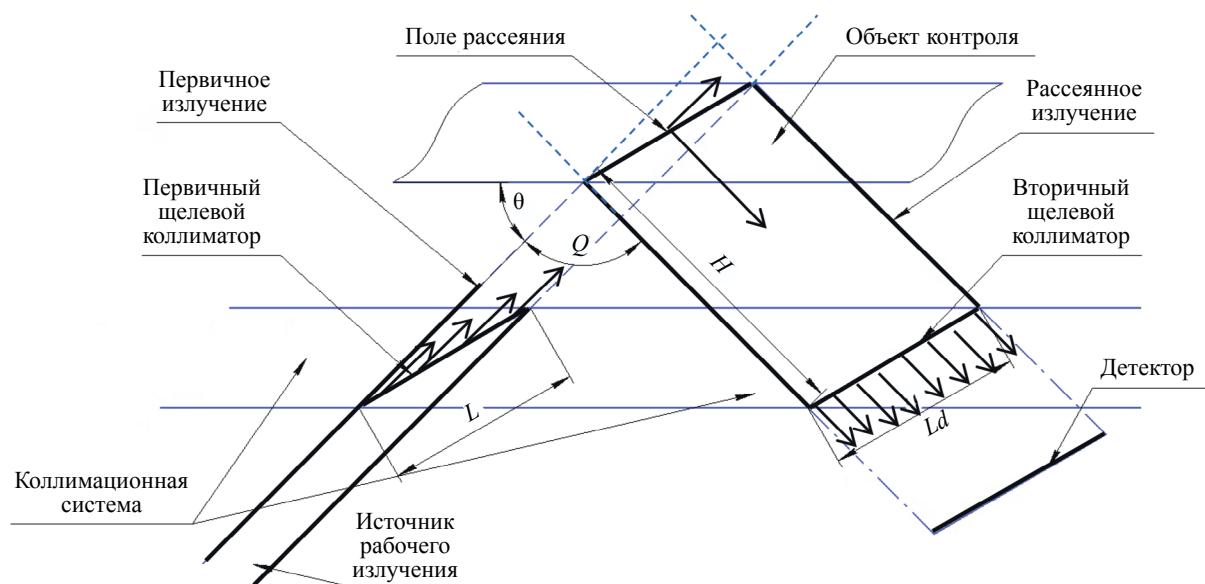


Рис. 1. Схема формирования обратнорассеянного излучения.

Рентгеновское или гамма-излучение (далее — излучение), проходя через ПЩК, формирует ленточный пучок длиной L . Падая на поверхность ОК под некоторым углом θ , этот пучок образует в ОК поле рассеяния. Данное поле представляет собой эмиссионный источник гамма-излучения. Со стороны источника первичного излучения расположен ВЩК, который формирует обратнорассеянное гамма-излучение (ОРИ) в виде ленточного пучка, направленного в сторону сцинтилляционного детектора.

Рассмотрим схему с двумя одинаковыми детекторами, между которыми находится тонкая, непрозрачная для видимого света перегородка. При взаимодействии КИ с ОК формируется поток обратнорассеянного излучения, коллимированного детектором ВЩК. Примем, что число рассеянных фотонов, вылетающих из ОК, пропорционально L . При наличии в ОК какой-либо несплошности примем сигнал от нее равным нулю.

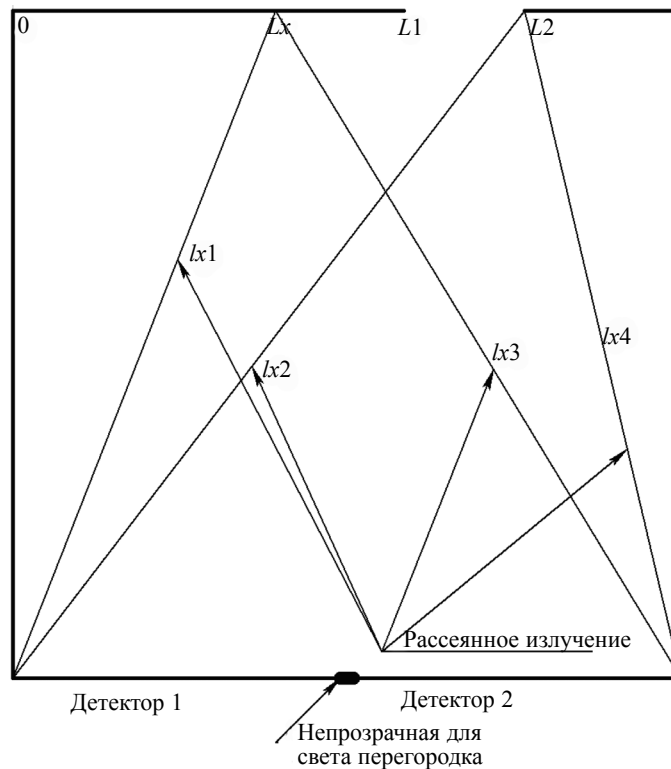


Рис. 2. Схема с двумя детекторами (lx приведена с индексами для примера визуализации).

Так как эмиссионный источник представляет собой линейный источник длиной L , то каждая точка источника, расположенная на расстоянии Lx от начала координат, излучает под некоторым, заранее заданным геометрией КС углом θ , равновероятно в направлении детектора. Обратнорассеянное излучение, рассеянное из точки источника, расположенной на расстоянии Lx , будет проходить разный путь до каждой точки одного из детекторов. Установим зависимость расстояния lx от Lx и x , где x — расстояние от нуля до отдельно выбранной точки на одном из детекторов:

$$lx(Lx, x) = \sqrt{x^2 - 2 \cdot Lx \cdot x + (H^2 + Lx^2)}, \quad (1)$$

где H — перпендикуляр от эмиссионного источника до линейки детекторов.

Далее получим зависимость интенсивности излучения $I\Delta x$ для каждого элемента детектора:

$$I\Delta x(x) = \int_0^L \frac{1}{lx(Lx, x)^2} dLx = \int_0^L \frac{1}{x^2 - 2 \cdot Lx \cdot x + (H^2 + Lx^2)} dLx. \quad (2)$$

Проинтегрировав правую часть уравнения (2), получим:

$$I\Delta x(x) = \frac{\arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a}, \quad (3)$$

где $a = \frac{H}{L}$.

Рассмотрим случай, когда в каком-либо месте эмиссионного источника отсутствует рассеиватель, т.е. существует некоторая несплошность. На рис. 3 границы такой несплошности обозначены символами $L1$ и $L2$ соответственно, длина несплошности будет равна L_n :

$$L_n = L2 - L1. \quad (4)$$

Итоговое уравнение интенсивности излучения $In\Delta x$ с несплошностью выглядит следующим образом:

$$In\Delta x(L1, L_n, x) = \frac{\arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{x-L1}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{x-(L1+L_n)}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a}. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение (6), которое представляет собой зависимость суммарного сигнала двух детекторов от положения и размера несплошности Is :

$$Is(L1, L_n, x) = \frac{1}{L \cdot a} \left[\int_0^L \arctan\left(\frac{x}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{x-L1}{L \cdot a}\right) + \arctan\left(\frac{x-(L1+L_n)}{L \cdot a}\right) dx \right]. \quad (6)$$

Проанализировав уравнение (6), можно установить, что значение суммарного сигнала с двух детекторов незначительно зависит от положения несплошности. Основной вклад в величину сигнала вносит размер несплошности. Вследствие этого уравнение (5) можно упростить, приняв $L1$, равной нулю:

$$Is(L_n, x) = \int_0^L \frac{\arctan\left(\frac{L-x}{L \cdot a}\right) - \arctan\left(\frac{L_n-x}{L \cdot a}\right)}{L \cdot a} dx. \quad (7)$$

Откуда следует, что, зная параметры КС, можно вычислить размер несплошности по уравнению (7).

Рассмотрим следующее уравнение (8), которое представляет собой разность сигналов с детекторов ΔS :

$$\Delta S = \int_0^{L/2} In\Delta x(x) dx - \int_{L/2}^L In\Delta x(x) dx. \quad (8)$$

Подставив значение L_n , определенное согласно уравнению (4), в уравнение (7), решив его численными методами, можно определить положение несплошности.

РЕШЕНИЕ ДЛЯ ДВУХ И БОЛЕЕ НЕСПЛОШНОСТЕЙ

Решение уравнения (7) для двух и более несплошностей — трудоемкий процесс, который может быть упрощен при следующем предположении. При измеренном значении сигнала от двух детекторов устанавливается величина вероятной несплошности. Вследствие того, что заранее неизвестны количество и размеры предполагаемых несплошностей, можно объединить все несплошности в одну. На следующем примере продемонстрирован изложенный подход.

Примем длину эмиссионного источника и детекторов L , а также высоту H , равными 100 мм. Определим две несплошности со следующими параметрами: $L1 = 5$ мм, $L1_n = 10$ мм, $L2 = 25$ мм, $L2_n = 10$ мм. На рис. 3 представлены положения несплошностей:

Далее воспользуемся приведенным выше алгоритмом и на основании уравнений (4) и (7) определим размер и положение неизвестной нам несплошности, считая, что положение указанных несплошностей нам неизвестно, а известны только суммарный сигнал с двух детекторов и разность их сигналов. Размер рассчитанной и реальной несплошностей сопоставляются друг с другом на рис. 3.

ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 4а изображена коллимационная система с рентгеновским аппаратом (РА) РАП-300-5.

Алюминиевая пластинка с искусственными несплошностями (рис. 4б) в виде отверстий и засверловок перемещалась над ПЩК продольно. Использовался сцинтилляционный детектор ВГО. При облучении РА алюминиевой пластинки измерялся суммарный сигнал с детекторов, а также разность сигналов детекторов. Время измерения на один кадр составило 0,3 с, шаг сканиро-

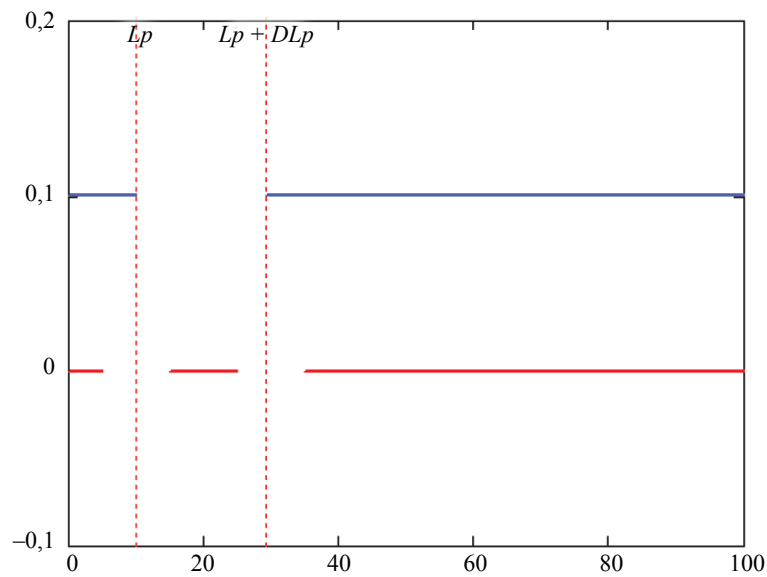


Рис. 3. Положения несплошностей. Синяя линия — рассчитанная несплошность, где $L_p = 10$ мм, $DL_p = 19,3$ мм, $L1_n + L2_n = 20$ мм, красная линия — заранее заданная.

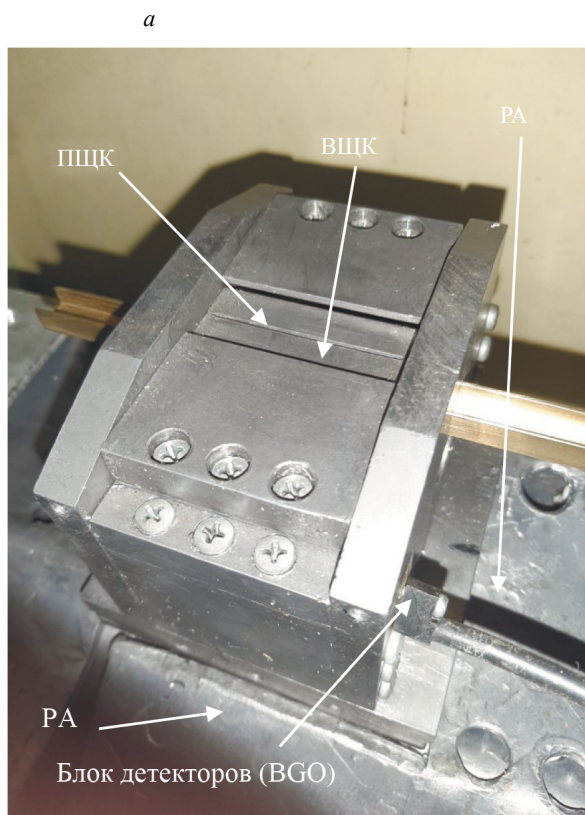


Рис. 4. Коллимационная система (а); алюминиевая пластина (б).

вания 0,1 мм. В ходе проведения сканирования и промежуточных программных преобразований получены результаты, представленные на рис. 5.

Как видно из результатов, положение и размер несплошностей соответствует положению реальных несплошностей на пластине. Размер несплошностей в случае отверстий соответствует реальным размерам, а размер засверловки — нет. Данный факт объясняется зависимостью уровня сиг-

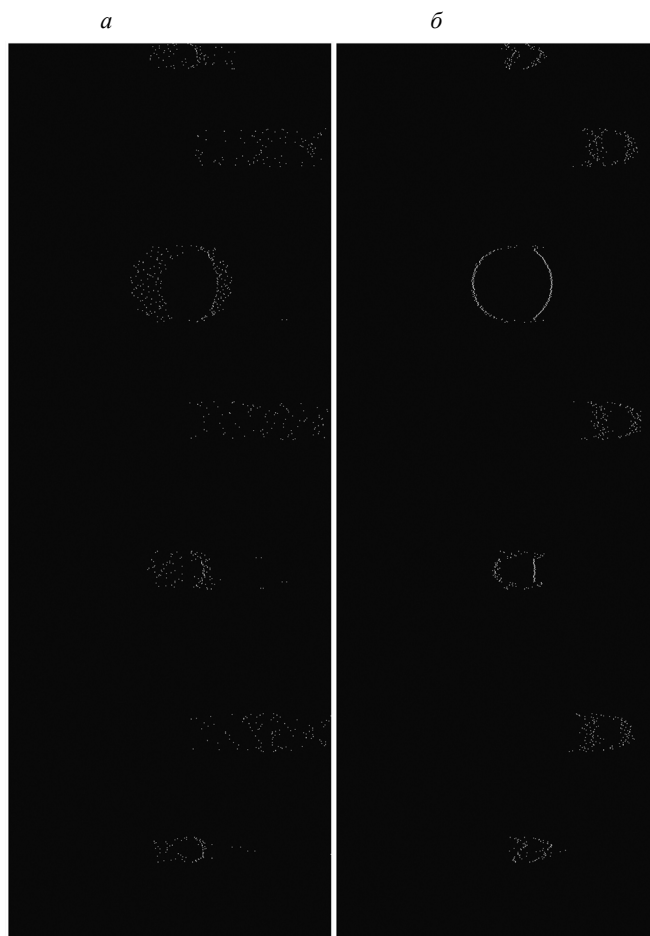


Рис. 5. Восстановленное изображение (*a* — 1 кадр; *б* — 100 кадров).

нала от размера несплошности, засверловка расположена на определенной глубине в образце, соответственно и поток обратнорассеянного излучения будет больше, откуда и меньший размер по сравнению с реальным размером несплошности. С увеличением числа кадров контур несплошностей определяется более четко вследствие уменьшения случайной погрешности измерения (за счет статистического накопления.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены формулы для определения размеров и положения несплошностей по суммарному сигналу с детекторов и по разности сигналов детекторов при продольном сканировании щелевым коллиматором.
2. Рассмотренная коллимационная система с щелевым коллиматором позволяет проводить сканирование производительнее (по сравнению с коллиматором в виде «пинхола»).
3. Размер несплошности зависит от глубины залегания несплошности и ее высоты. Положение несплошности определяется с большей точностью, так как зависит от разности сигналов детекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdul-Majid S., Balamesh A., Othmany D.A., Alassiaa A., Al-Huraibi H.* Corrosion Imaging and Thickness Determination Using Micro-Curie Radiation Sources Based on Gamma-Ray Backscattering: Experiments and MCNP Simulation // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2015. V. 26. No. 1. P. 43—59.
2. *Abdul-Majid S., Balamesh A.* Underwater Pipe Wall Thickness Measurements by Gamma Backscattering (Retrieved on Aug. 2016. V. 30) // *Applied Radiation and Isotopes*. 2010. V. 68. No. 12. P. 2181—2188.

3. *Margret M., Menaka M., Subramanian V., Baskaran R., Venkatraman B.* Non-destructive inspection of hidden corrosion through Compton backscattering technique // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. V. 152. P. 158—164.
4. *Balamesh A., Salloum M., Abdul-Majid S.* Feasibility of a New Moving Collimator for Industrial Backscatter Imaging // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2018. V. 29. No. 3. P. 143—155.
5. *Margret M., Subramanian V., Baskaran R., Venkatraman B.* Detection of scales and its thickness determination in industrial pipes using Compton backscattering system // *Review of Scientific Instruments*. 2018. V. 89. No. 11. P. 113—117.
6. *Sharma A., Sandhu B. S., Singh B.* Incoherent scattering of gamma photons for non-destructive tomographic inspection of pipeline // *Applied Radiation and Isotopes*. 2010. V. 68. No. 12. P. 2181—2188.
7. *Margret M., Menaka M., Venkatraman B., Chandrasekaran S.* Compton back scatter imaging for mild steel rebar detection and depth characterization embedded in concrete // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. V. 343. P. 77—82.
8. *Benitez D. S., Quek S., Gaydecki P., Torres V.* A preliminary magneto-inductive sensor system for real-time imaging of steel reinforcing bars embedded within concrete // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. V. 57. No. 11. P. 2437—2442.
9. *Baek S., Xue W., Feng M.Q., Kwon S.* Nondestructive corrosion detection in RC through integrated heat induction and IR thermography // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. V. 31. No. 2. P. 181—190.
10. *Yamazaki K., Ishikawa K., Haga A., Muramatsu K., Kobayashi K., Sasaki H.* Impedance measurement using a resonance circuit for detecting steel bars and cables inside pliable plastic conduit tubes buried in concrete walls and slabs // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. V. 46. No. 6. P. 1963—1966.
11. *Yamazaki K., Ishikawa K., Haga A., Muramatsu K., Kobayashi K., Sasaki H.* Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high-frequency guided ultrasonic waves // *Journal of Engineering Mechanics*. 2009. V. 135. No. 1. P. 9—19.
12. *Fan Y., Ji X., Cai P., Lu Q.* Non-destructive detection of rebar buried in a reinforced concrete Wall with wireless passive SAW sensor // *Measurement Science Review*. 2013. V. 13. No. 1. P. 25—28.
13. *Kolkoori S., Wrobel N., Zscherpel U., Ewert U.* A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials // *NDT&E International*. 2015. V. 70. P. 41—52.
14. *O'Flynn D., Crews C., Fox N., Allen B.P., Sammons M., Speller R.D.* X-ray backscatter sensing of defects in carbon fibre composite materials // *Advanced Photon Counting Techniques XI*. International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10212. P. 102120R.
15. *Kolkoori S., Wrobel N., Osterloh K., Zscherpel U., Ewert U.* Novel X-ray backscatter technique for detection of dangerous materials: application to aviation and port security // *Journal of Instrumentation*. 2013. V. 8. No. 9. P. P09017.
16. *Shinji Nomura, Kazunori Tejima, Ikuo Wakamoto.* Scattered X-ray type defect detector, and X-ray detector. JP. Patent No. 2001208705A. 03 August 2001.
17. *Ignatiev N.G., Orlov I.E., Ergashev D.E.* Experimental studies of scintillation detectors based on WLS fibers // *Instruments and Experimental Techniques*. 2016. V. 59. No. 6. P. 789—793.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕРНА ГРЕЧИХИ МЕТОДАМИ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2024 г. Ю.Т. Платов^{1,*}, С.Л. Белецкий^{2,**}, Д.А. Метленкин^{1,***},
Р.А. Платова^{1,****}, А.Л. Верещагин^{3,*****}, В.А. Марьин^{3,*****}

¹ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»,
Россия 115054 Москва, Стремянный пер., 36

²Всероссийский научно-исследовательский институт
кондитерской промышленности — филиал ФГБНУ

«Федеральный научный центр пищевых систем имени В.М. Горбатова» РАН,
Россия 107023 Москва, ул. Электрозаводская, 20/3

³Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова,
Россия 659305 Бийск, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27
E-mail: *Platov.YT@rea.ru; **grain-miller@yandex.ru; ***dametl@mail.ru;
****Platova.RA@rea.ru; *****val@bti.secna.ru; *****tehbiysk@mail.ru

Поступила в редакцию 20.02.2024; после доработки 01.04.2024

Принята к публикации 02.04.2024

Классификация зерна гречихи имеет большое значение, поскольку отсутствие дефектных зерен является гарантией урожайности и качества. Зерна гречихи были отобраны случайным образом из партии зерна, которые различались по качеству. Идентификация и классификация зерна гречихи по степени выполненности проведена сочетанием анализа микрофокусного рентгеновского и гиперспектрального изображений и методов многомерного анализа. С помощью микрофокусной рентгенографии зерна гречихи были разделены на группы по степени выполненности. Гиперспектральное изображение зерен гречихи в диапазоне 935—1720 нм получено с помощью камеры Specim FX17. С помощью функции отбора полигонов были получены усредненные спектры и сформирована матрица данных образцов зерна. Методом главных компонент выделены полосы спектра, вносящие наибольший вклад в градацию образцов зерна по степени выполненности. Классификационная модель градации зерна гречихи на группы по степени выполненности построена методом дискриминантного анализа при помощи проекции на латентные структуры. Результаты исследования показали, что гиперспектральное изображение является потенциальным инструментом для быстрой и точной идентификации зерен гречихи, который может быть использован при крупномасштабной классификации зерен и определении качества зерен.

Ключевые слова: зерно гречихи, дефекты зерна, микрофокусная рентгенография, гиперспектральное изображение, методы многомерного анализа.

IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF BUCKWHEAT GRAIN BY MICROFOCUS RADIOGRAPHY AND HYPERSPECTRAL IMAGING METHODS

© 2024 Yu.T. Platov^{1,*}, S.L. Beletskiy^{2,**}, D.A. Metlenkin^{1,***},
R.A. Platova^{1,****}, A.L. Vereshchagin^{3,*****}, V.A. Marin^{3,*****}

¹Plekhanov Russian University of Economics, Russia 115054 Moscow, Stremyanny Lane, 36

²Enterprise, Russia 107023 Moscow, Elektrozavodskaya St., 20/3

³Technological Institute is a Subsidiary of Polzunov Altai State Technical University,
Russia 659305 Biysk, Hero of the Soviet Union Trofimov Street, 27

E-mail: *Platov.YT@rea.ru; **grain-miller@yandex.ru; ***dametl@mail.ru;
****Platova.RA@rea.ru; *****val@bti.secna.ru; *****tehbiysk@mail.ru

Classification of buckwheat grains is important because the absence of defective grains is a guarantee of yield and quality. Buckwheat grains were randomly selected from a batch whose grains varied in quality. The identification and classification of buckwheat grains according to the degree of fulfillment was carried out by a combination of microfocus X-ray and hyperspectral image analysis and multivariate analysis techniques. Using microfocus radiography, buckwheat grains were categorized into groups according to the degree of fulfillment. Hyperspectral image of buckwheat grains in the range of 935-1720 nm was acquired using a Specim FX17 camera. Using the polygon selection function, the averaged spectra were obtained and a data matrix of grain samples was generated. The bands of the spectrum contributing most to the grading of the grain samples by degree of fulfillment were identified using the principal component analysis. The classification model of grading buckwheat grain into groups by degree of fulfillment was constructed by partial least squares discriminant analysis method. The results

showed that hyperspectral image is a potential tool for rapid and accurate identification of buckwheat grains, which can be used in large-scale grain classification and grain quality determination.

Keywords: buckwheat grain, grain defects, microfocus radiography, hyperspectral image, multivariate analysis methods.

DOI: 10.31857/S0130308224040057

ВВЕДЕНИЕ

Зерновые обеспечивают человека необходимыми питательными веществами, а контроль их качества уделяют большое внимание. Пшеница является основным продуктом питания и играет важную роль для здоровья человека. В то же время во многих отраслях гречневая крупа считается альтернативным пищевым продуктом с уникальным набором белков и аминокислотным составом [1]. Состав зерновых культур определяет область их использования в пищевой промышленности. Отклонение ниже рекомендуемых пороговых значений показателей свойств ограничивает область их применения. Другим аспектом, который определяет потенциал использования семян, являются внутренние или внешние дефекты, такие как щуплость, отслоение оболочки, трещиноватость и невыполненность (ГОСТ Р 59603—2021).

В последнее время усилия сосредоточены на использовании именно неразрушающих методов контроля качества пищевой продукции, включая зерна гречихи [2]. Разработка системы отслеживания является важным этапом в цепочке поставок зерновых культур. Управление цепочками поставок позволяет распределить продукт с надлежащей информацией об отслеживании и доставить продукт потребителю [3]. Но для реализации этой разработки требуются инструменты идентификации для отслеживания продукции, включая сбор физикохимических свойств [4].

Неразрушающие методы позволяют измерять и анализировать партии зерна при их хранении, сокращать отходы и проводить повторные измерения одних и тех же зерен с течением времени [5]. Кроме того, классические методы трудоемки, отнимают много времени, требуют специализированной подготовки образцов, включающей использование химических веществ, которые могут вызвать загрязнение окружающей среды, и неприменимы для сортировки в режиме реального времени.

Существует множество неразрушающих методов, которые используются для сортировки зерна. К ним относят рентгеновскую томографию [6] и микрофокусную рентгенографию [7], системы машинного зрения [8], включая спектроскопические системы измерения в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра (UV-VIS-NIR), мульти- и гиперспектральные системы визуализации. UV-VIS-NIR-спектроскопия является широко используемым инструментом для точной классификации дефектности зерен. Этот метод является быстрым, точным и чувствительным как для зерна гречихи [9], так и для других семян [10]. Гиперспектральное изображение (HSI) в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) может использоваться для контроля зерновых культур, включая зерно гречихи [11, 12].

Метод микрофокусной рентгенографии, по сравнению с используемой контактной рентгенографией, позволяет получить рентгеновские снимки семян и визуализировать мелкие детали структуры семян, которые незначительно отличаются по плотности [13].

Когда для анализа используются технологии анализа изображения, то это, как правило, сопровождается применением методов машинного или глубокого обучения [14]. Эти алгоритмы используются для извлечения признаков изображения и построения цифровых моделей для классификации по сортам или обнаружения дефектных зерен. Однако эти методы требуют мощных вычислительных возможностей, обладают высокими требованиями к программному обеспечению и последующей автоматизации.

Целью исследования является идентификация и классификация зерна гречихи по степени выполненности сочетанием анализа микрофокусного рентгеновского и гиперспектрального изображений и методов многомерного анализа.

МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования служили образцы партии зерна гречихи (производство ООО «Бийский элеватор», Алтайский край). Партия зерна не была подвергнута обрушению и гидротермальной обработке. Гречиха посевная (*Fagopyrum Esculentum* Muench) имеет особый тип роста и созревания, все фазы проходят одновременно, накладываются одна на другую и продолжаются до уборки [15]. Поэтому при сборе урожая в одной партии находятся зерна гречихи, различающиеся как по крупности ядра и не характеризуются однородным гранулометрическим составом [16], так

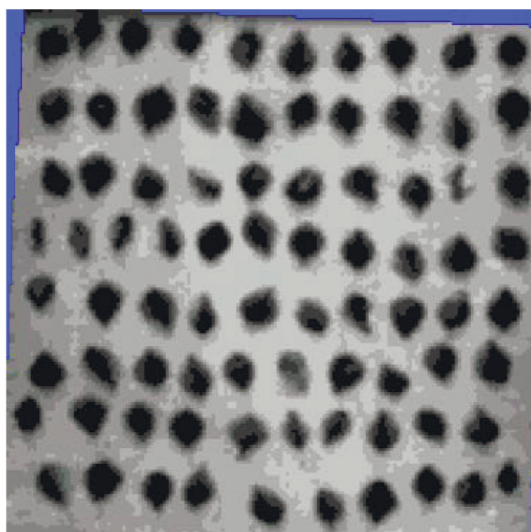


Рис. 1. Изображение образцов зерна гречихи в оттенках серого, полученное с помощью гиперспектральной камеры Specim FX17.

и по зрелости: зерна могут находиться в зрелом, недозревшем и в молочном состоянии [15]. Как следствие, специфика роста и созревания зерна приводит к различию согласно ГОСТ Р 59603—2021 по соотношению нормальных, невыполненных (несформированных) и невыполненных зерен гречихи из одной партии. Для исследования зерен по признаку «невыполненность» из партии были отобраны 81 зерно гречихи. Зерна были приклеены на прямоугольную картонную рамку с липким верхним слоем (рис. 1).

Скрытую дефектность зерен гречихи определяли по цифровым рентгеновским изображениям особенностей внутреннего строения и степени развития основных структур зерна (ГОСТ Р 59603—2021).

Для микрофокусной рентгенографической съемки зерна гречихи использована передвижная рентгенографическая установка ПРДУ-02 производства ЗАО «Элтех-мед» (Санкт-Петербург) в комплектации с рентгеносканером DIGORA (Soredex, Finland).

В состав установки ПРДУ-02 входят: рентгенозащитная камера для проведения рентгенографических работ; источник рентгеновского излучения моноблочного типа РАП-70М; приемник рентгеновского изображения на основе экрана с фотостимулирующим люминофором (ФСЛ-экран); персональный компьютер с программным обеспечением.

Гиперспектральное изображение образцов зерна гречихи было получено в спектральном диапазоне 935—1720 нм с разрешением 3,5 нм с помощью гиперспектральной камеры Specim FX17 (SPECIM, Finland).

Просмотр полученного гиперспектрального изображения проводили с помощью программного комплекса Альбеда 4.0.23. С помощью функции отбора полигонов были получены усредненные спектры образцов зерна, которые были преобразованы в матрицу X размером 81×224 (81 — количество усредненных спектров образцов, 224 — отсчеты на длинах волн). Анализ матрицы X данных проводили методом главных компонент (РСА) в программном пакете Unscrambler (ver. 10.0.4, Camo Software, Норвегия). Матрица X была также использована для построения модели классификации методом дискриминантного анализа при помощи проекции на латентные структуры (PLS-DA) с применением графического пользовательского интерфейса для программного комплекса MATLAB 2018b [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Идентификация рентгенографических признаков и классификация зерен гречихи по степени выполненности. Идентификация и классификация рентгенографических признаков «невыполненности» зерна проведена на основании анализа рентгеновского изображения 81 зерна гречихи. Невыполненность и ее степень [18] выбраны для определения продуктивности зерна.

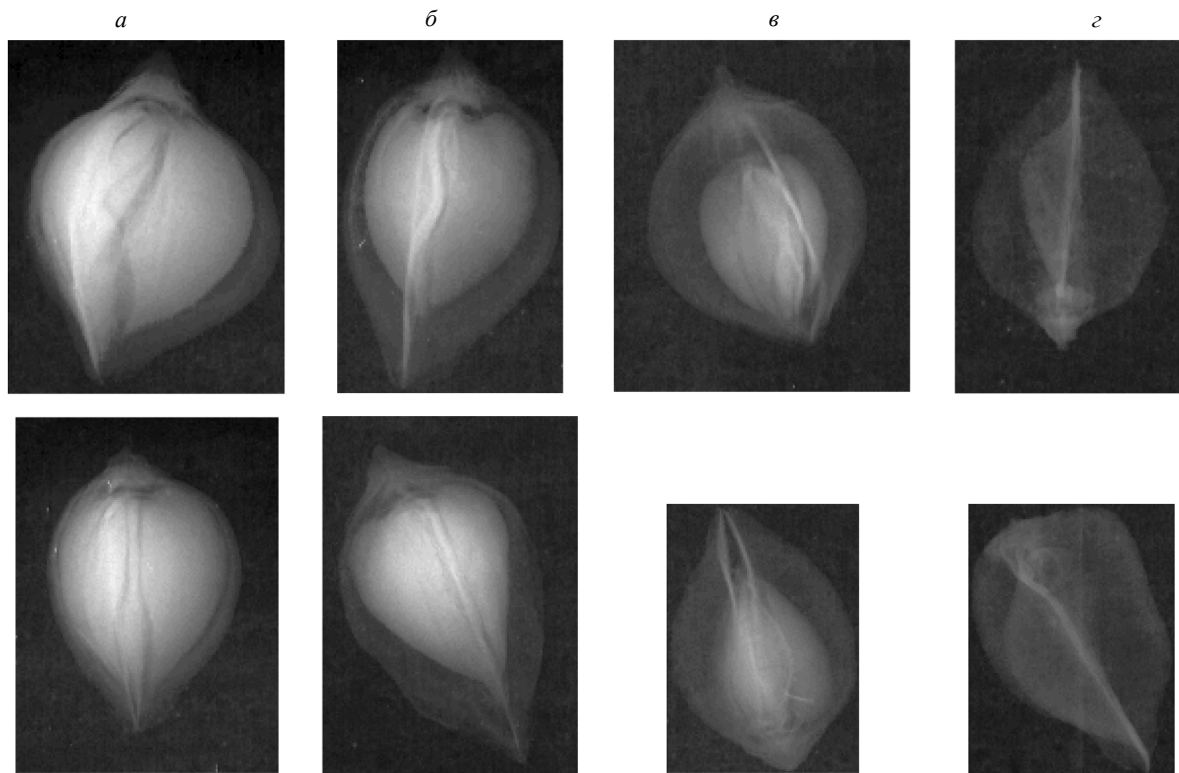


Рис. 2. Рентгеновские изображения зерна гречихи различных групп по степени выполненности: выполненное — 1 группа (а); недовыполненное — 2 группа (б); невыполненное — 3 группа (в); пустое — 4 группа (г).

Анализ цифрового изображения зерна проведен на основе рентгенографических признаков: нерегулярность распределения оптической плотности по площади рентгеновской проекции, обусловленная развитием эндосперма, его отсутствием или неполным развитием. Различные части зерна гречихи: плодовая оболочка, семенная кожура, эндосперм, а также неповрежденные и поврежденные участки, ослабляют рентгеновское излучение в разной степени [19]. На рис. 2 представлены рентгеновские изображения зерна гречихи выполненного и с аномалиями развития.

Выполненные зерна — полностью сформированное без дефектов: эндосперм, область зародыша и оболочки равномерно светлые, без нерегулярных затемнений (рис. 2а). Недовыполненные зерна — в основном жизнеспособные и в отличие от выполненных зерен часть их проекции на рентгенограммах занята темным полем (рис. 2б). Признак «невыполненность» зерна гречихи на цифровом рентгеновском изображении выглядит как полное или частичное потемнение проекции в сравнении с изображением нормальных зерен, что указывает на более низкую плотность или толщину тканей зерна. В случае частичного потемнения видны очертания недоразвившегося зародыша (рис. 2в), а при сплошном потемнении — зерно пустое (рис. 2г), оно имеет незаполненную плодовую оболочку, а проекция зерна полностью темная.

По результатам анализа рентгеновского изображения выявлено, что общее количество образцов гречихи разделены на группы по соотношению участков «светлый — темный» рентгеновской проекции зерен следующим образом: 1 группа — выполненное зерно (ядро занимает 80—100 % зерна); 2 группа — недовыполненное зерно (ядро занимает 50—80 % зерна); 3 группа — невыполненное зерно (ядро занимает 30—40 % зерна/рудимент); 4 группа — пустые зерна (отсутствие ядра) [18, 19]. Разделение образцов зерна гречихи на группы проведено следующим образом: в 1 группу было включено 37, во 2 — 32, в 3 группу — 9, в 4 группу — 3 образца. Зерна гречихи из 1 и 2 групп могут быть использованы для дальнейшей переработки и употребления в пищевых целях (доброкачественные), а зерна из 3 и 4 групп являются недоброкачественными.

Таким образом, неразрушающий метод микрофокусной рентгенографии позволяет выявить скрытые (латентные) структурные дефекты зерна гречихи. По результатам анализа рентгеновских изображений образцов зерна гречихи проведена их градация по степени выполненности на четыре группы.

Обработка гиперспектрального изображения. Гиперспектральное изображение зерна гречихи (см. рис. 1) обрабатывали в программном комплексе Альбеда 4.0.23. С помощью встроенной функции отбора полигонов на изображении были отобраны усредненные спектры каждого образца зерна ($n = 81$) в диапазоне 935—1720 нм.

Усредненные спектры образцов зерна гречихи были подвергнуты следующей предварительной обработке: преобразование спектров отражения в спектры поглощения ($A = \lg(1/R)$), нормализация (maximum normalization — альтернатива классической нормализации, при которой каждый ряд делится не на среднее, а на его максимальное абсолютное значение). Проведено сравнение спектров образцов зерна гречихи из каждой группы по степени выполненности (рис. 3).

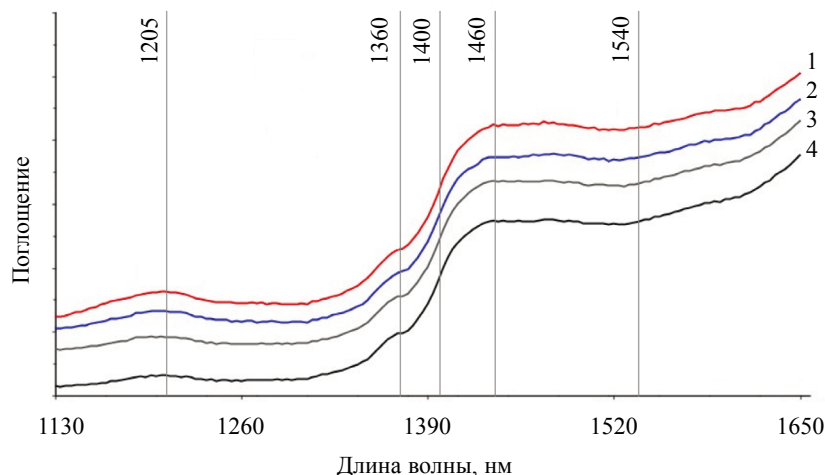


Рис. 3. Профиль усредненных спектров поглощения в диапазоне 1130—1650 нм полигонов образцов зерна гречихи из групп 1—4.

Спектр зерна гречихи состоит из широких полос поглощения, соответствующих главным образом обертонам и комбинациям колебательных мод функциональных групп компонентов состава зерна гречихи (табл. 1). А интенсивность этих полос взаимосвязана с характеристиками количественного состава компонентов зерна гречихи. Средний состав зерна гречихи (масс. %) следующий: крахмал — 52,9 %; вода — 14,0 %; белки — 10,6 %; клетчатка — 10,7 %; жиры — 3,2 %; углеводы (моно- и дисахариды) — 1,5 %; зольность — 2,0 % [20].

Как видно из рис. 3, основное поглощение находится в области 1130—1650 нм, в которой проявляются колебания функциональных групп следующих компонентов состава: крахмала, белков, липидов и влаги (см. табл. 1). В зависимости от степени выполненности зерна, от 1 до 4 группы снижаются значения поглощения в этом диапазоне спектра, что соответствует уменьшению содержания основных компонентов состава в ядре зерна [21—24].

Таблица 1

Назначение полос NIR-спектра функциональным группам компонентов состава зерна гречихи

Полоса, нм	Функциональная группа	Компонент	Источник
977	O—H	Влага	[21]
1205	C=O	Липиды, белки	[21—23]
1360	C=O	Липиды, белки	[22]
1400	Первый обертоны валентных колебаний O—H	Крахмал, влага	[22, 24]
1460	Первый обертоны валентных колебаний O—H и N—H	Крахмал, влага, белок	[24]
1540	Первый обертоны валентных колебаний O—H и C—H	Крахмал	[22, 24]

Данные, полученные методами микрофокусной рентгенографии и гиперспектрального изображения, показывают хорошую сходимость и взаимозаменяемость. Следовательно, для градации

зерна гречихи и определения степени выполненности можно использовать гиперспектральное изображение.

Классификация зерна гречихи по NIR спектрам гиперспектрального изображения. Методом главных компонент проведена декомпозиция X-матрицы усредненных NIR-спектров (после их предварительной обработки) зерна гречихи ($n = 81$) на T-матрицу счетов — координата образцов по главным компонентам (ГК) и P-матрицу факторных нагрузок длин волн NIR спектра поглощения по ГК. Три ГК объясняют 100 % от общей объяснимой дисперсии (95,0, 3,0 и 2,0 % соответственно).

По знаку (+/–) и максимальным значениям факторных нагрузок длин волн спектра, которые информируют о корреляции с ГК, определен их вклад в разделении множества образцов на группы. Спектр поглощения по 1 ГК согласно знаку (+/–) и значениям факторных нагрузок длин волн разделен на три диапазона: знак (+) имеют факторные нагрузки длин волн в диапазоне 935–1130 нм и 1673–1720 нм без явных максимумов; знак (–) — факторные нагрузки длин волн в широком диапазоне 1130–1673 нм.

Вторая ГК разделяет спектр поглощения на аналогичные диапазоны, но с обратным значением знака (+/–) факторных нагрузок длин волн спектра относительно соответствующих факторных нагрузок по 1 ГК. Факторные нагрузки длин волн спектра со знаком (+) имеют два неявных максимума при 1205 и 1365.

По 3 ГК максимумы факторных нагрузок длин волн спектра со знаком (+) в широком диапазоне 935–1673 нм выявлены при 977, 1205, 1360, 1400, 1460 и 1540 нм (см. табл. 1). Эти максимумы длин волн спектра соответствуют функциональным группам основных компонентов состава ядра гречихи.

Образцы зерна гречихи наиболее наглядно разделяются на четыре группы в координатах 1 и 3 ГК следующим образом (рис. 4а):

- образцы из 1 группы («выполненное» зерно) располагаются преимущественно в области координат со знаком (–) по 1 ГК и со знаком (+) по 3 ГК, что соответствует максимуму факторных нагрузок длин волн спектра в диапазоне 1130–1673 нм, соответствующим функциональным группам компонентов состава ядра гречихи (см. рис. 4б, табл. 1);

- образцы из 3 и 4 групп («невыполненное» и пустое зерно) расположены в области координат со знаком (+) по 1 ГК, что соответствует минимальному поглощению в диапазоне 1130–1673 нм спектра (рис. 4б). При этом наблюдается слабое различие по области расположения в этих координатах между образцами из 3 и 4 групп;

- образцы из 2 группы («недовыполненное» зерно) занимают промежуточную область между образцами из 1, 3 и 4 групп.

Следовательно, методом главных компонент спектр разделен на три диапазона: 935–1130, 1130–1673, 1673–1720 нм (см. рис. 4б). Образцы зерна гречихи разделяются по знаку (+/–) на

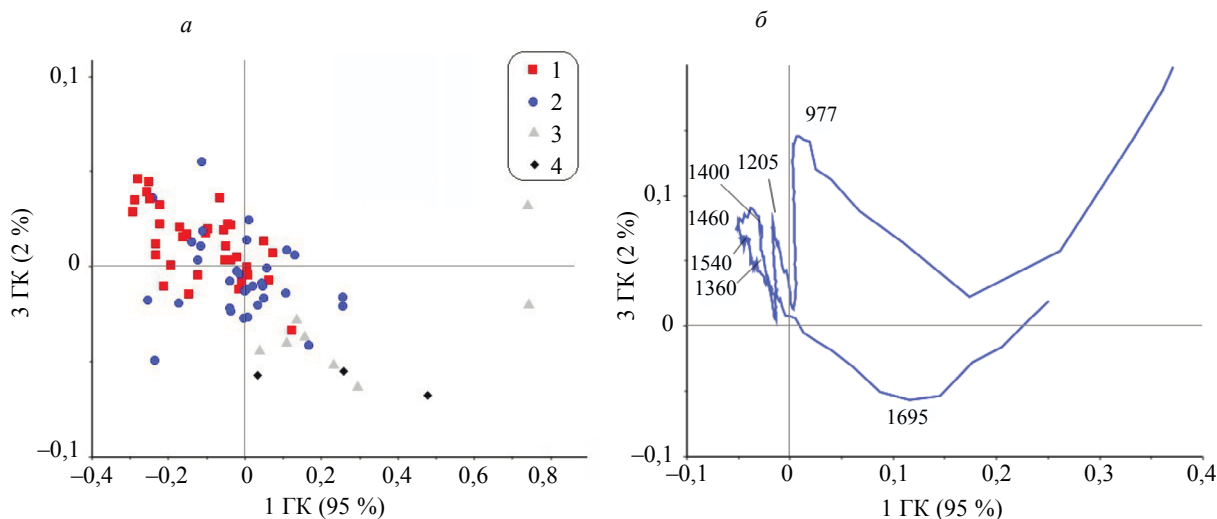


Рис. 4. Расположение точек, соответствующих образцам зерна гречихи из 1–4 групп, в координатах 1 и 3 ГК (а); факторные нагрузки длин волн спектра в координатах 1 и 3 ГК (б), где отмечены максимумы факторных нагрузок длин волн спектра.

группы по степени выполненности, выявленные по данным микрофокусной рентгенографии. При этом наблюдается слабое различие между образцами из 3 и 4 групп зерен гречихи (см. рис. 4а). Идентификация эффективной области, соответствующей диапазону 1130—1673 нм, из всего спектра имеет наиболее важное значение поскольку это позволяет, во-первых, визуализировать различия между группами зерен гречихи по степени выполненности, во-вторых, при дальнейшем исследовании за счет снижения числа каналов снижается стоимость оборудования и вычислительной нагрузки программного обеспечения.

Построение модели классификации зерна гречихи по степени выполненности методом PLS-DA. Матрица X усредненных спектров в диапазоне 935—1720 нм была использована для разработки модели классификации методом PLS-DA. При классификации методом PLS-DA существуют два подхода: мягкий (soft) и жесткий (hard) [17, 25]. В нашем исследовании применен мягкий подход метода PLS-DA. Используя этот подход, образец можно отнести к нескольким классам в отличие от жесткого подхода.

При сортировке зерна могут быть поставлены различные задачи, например, разделить доброкачественное зерно от недоброкачественного, выполненное от недовыполненного или просто отделить пустые зерна из выборки. В связи с этим поставлена цель построения различных моделей классификации зерна от их выполненности.

В матрице данных каждому образцу был назначен класс, соответствующий степени выполненности зерна. В результате построено 3 классификационных модели, различающиеся по количеству групп и их сочетанию, входящих в один из классов.

В первой классификационной модели (далее Модель 1) каждому образцу был присвоен класс, соответствующий номеру одной из четырех групп по данным рентгеновского изображения (см. рис. 2). При построении Модели 2 образцы из 3 и 4 групп (невыполненные и пустые зерна) были объединены в один класс и в результате для анализа было использовано 3 класса; в Модели 3 — образцы из групп 1 и 2 (выполненные и недовыполненные зерна) объединены в первый класс (доброкачественное зерно) и образцы из групп 3 и 4 объединены во второй класс (недоброкачественное зерно). Это связано с тем, что при разделении партии зерна гречихи ключевым является отделение недоброкачественных зерен от доброкачественных, а пересечение групп 1—2 является допустимым, так как образцы из этих групп являются доброкачественным зерном.

Стоит отметить [25], что в PLS-DA общее количество факторов (латентных переменных) подчиняется следующему нестрогому соотношению: 2-3 фактора для каждого класса + 1-2 фактора для описания внешних связей между классами. Поэтому количество используемых факторов варьировали от 8 до 14 в зависимости от количества заданных классов (см. табл. 2).

Таблица 2

Показатели качества PLS-DA-моделей классификации зерна гречихи на классы по степени выполненности

Модель	Количество факторов	Общая специфичность, %	Общая чувствительность, %	Общая эффективность, %
1	10	84	95	89
1	12	96	89	93
1	14	91	96	94
2	14	99	94	96
2	13	96	93	94
2	12	93	95	94
3	8	100	94	97
3	10	100	95	97
3	12	100	95	97

При оценке качества модели PLS-DA используются следующие показатели качества [25]:

чувствительность класса — процент образцов класса, правильно распознанных как членов этого класса;

специфичность класса — процент образцов из других классов, которые правильно отнесены как несовместимые с целевым классом.

Показатели чувствительности и специфичности рассчитываются для каждого класса отдельно, а для оценки производительности модели определяются показатели общей чувствительности и специфичности. *Общая эффективность* классификации представляет собой среднее геометрическое от произведения общей чувствительности и специфичности [25].

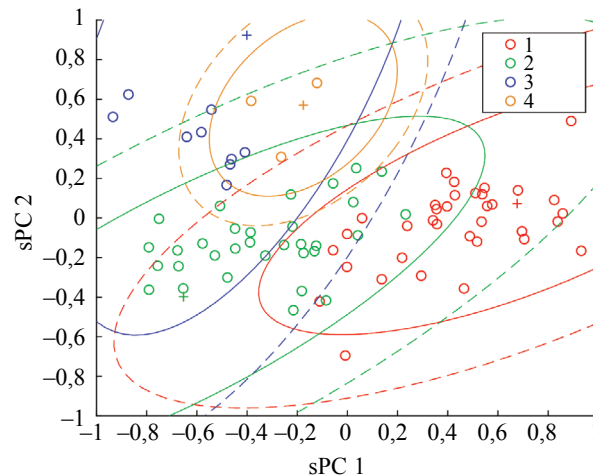


Рис. 5. Расположение точек, соответствующих спектрам образцов 1—4 групп зерна гречихи, в координатах двух плоскостей «суперсчетов» Модели 1, полученной методом PLS-DA.

Расположение координат объектов — образцов зерна гречихи разных классов — в пространстве двух плоскостей «суперсчетов» Модели 1, полученной методом PLS-DA представлено на рис. 5. Область приемлемости для каждого класса представляется в виде эллипсоидов, изображенных вокруг соответствующих центров классов. Визуально заметно разделение образцов на классы в многомерном пространстве двух плоскостей «суперсчетов» Модели 1, полученной методом PLS-DA.

В данном исследовании общая специфичность является более важным показателем при оценке качества моделей классификации. Это объясняется тем, что для эффективной сортировки зерна гречихи важно отделять недоброкачественное зерно от доброкачественного. Поэтому при построении Модели 1 необходимо получение высоких значений специфичности для классов 3 и 4. При таком подходе недопустимым является пересечение 1 и 2 класса против 3 и 4 класса. В результате анализа матрицы данных построена Модель 1 с использованием 12 факторов, которая обладает общей эффективностью 93 %, общая специфичность — 96 %. Важным моментом является то, что специфичность для классов 3 и 4 составила 98 %. Такой результат приемлем для дальнейшего практического применения модели.

ВЫВОДЫ

Показан потенциал сочетания анализа микрофокусного рентгеновского и гиперспектрального изображений и методов многомерного анализа для идентификации и классификации зерна гречихи по степени выполненности.

С помощью микрофокусной рентгенографии зерна гречихи были разделены на группы по степени выполненности. Гиперспектральное изображение зерен гречихи в диапазоне 935—1720 нм получено с помощью камеры Specim FX17, из которого с помощью функции отбора полигонов были получены усредненные спектры и сформирована матрица данных образцов зерна.

Методом главных компонент выделены полосы спектра при 977, 1205, 1360, 1400, 1460 и 1540 нм, вносящие наибольший вклад в градацию образцов зерна по степени выполненности. Методом PLS-DA с использованием матрицы усредненных спектров построена классификационная модель градации зерна гречихи на группы по степени выполненности.

Показано, что HSI является потенциальным инструментом для быстрой и точной идентификации зерен гречихи, который может быть использован при крупномасштабной классификации зерен и определении качества зерен.

Авторы выражают благодарность коллективу ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТОНИКС» за возможность проводить измерения на камере SPECIM FX17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексенко С.С., Казимирова К.О., Штыков С.Н. Сравнительная оценка содержания свободных фенольных соединений и антиоксидантной активности различных образцов гречихи // Журнал аналитической химии. 2022. Т. 77. № 8. С. 704—713. DOI: 10.31857/S0044450222080023
2. Wang F.H., Yang J., Zhu H.L. Research on determination method of starch, protein and total flavonoids content in buckwheat by Near-infrared spectroscopy // Sensor Letters. 2014. V. 12. No. 3—4. P. 888—891.
3. Wei Z., Alam T., Al Sulaie S., Bouye M., Deebani W., Song M. An efficient IoT-based perspective view of food traceability supply chain using optimized classifier algorithm // Information Processing & Management. 2023. V. 60. No. 3. P. 103275.
4. Dyck G., Hawley E., Hildebrand K., Paliwal J. Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling // Smart Agricultural Technology. 2023. V. 3. P. 100079.
5. Sun Y., Ye Z., Zhong M., Wei K., Shen F., Li G., Yuan J., Xing C. Rapid and nondestructive method for identification of molds growth time in wheat grains based on hyperspectral imaging technology and chemometrics // Infrared Physics & Technology. 2023. V. 128. P. 104532.
6. Besançon L., Rondet É., Grabulos J., Lullien-Pellerin V., Lhomond L., Cuq B. Study of the microstructure of durum wheat endosperm using X-ray micro-computed tomography // Journal of Cereal Science. 2020. V. 96. P. 103115.
7. Щукина П.А., Архипов М.В., Гусакова Л.П., Прияткин Н.С. Методика подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию // Агрофизика. 2020. № 3. С. 36—44.
8. Zhang J., Qu M., Gong Z., Cheng F. Online double-sided identification and eliminating system of unclosed-glumes rice seed based on machine vision // Measurement. 2022. V. 187. P. 110252.
9. Platov Y.T., Metlenkin D.A., Platova R.A., Rassulov V.A., Vereshchagin A.L., Marin V.A. Buckwheat identification by combined uv-vis-nir spectroscopy and multivariate analysis // Journal of Applied Spectroscopy. 2021. V. 88. P. 723—730.
10. Li X., Feng X., Fang H., Yang N., Yang G., Yu Z., Shen J., Geng W., He Y. Classification of multi-year and multi-variety pumpkin seeds using hyperspectral imaging technology and three-dimensional convolutional neural network // Plant Methods. 2023. V. 19. No. 1. P. 1—18.
11. An D., Zhang L., Liu Z., Liu J., Wei Y. Advances in infrared spectroscopy and hyperspectral imaging combined with artificial intelligence for the detection of cereals quality // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. V. 63. No. 29. P. 1—31.
12. Caporaso N., Whitworth M.B., Fisk I.D. Near-Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains // Applied spectroscopy reviews. 2018. V. 53. No. 8. P. 667—687.
13. Мусаев Ф.Б., Белецкий С.Л. История и перспективы применения рентгенографии в семеноводстве и семеноведении // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 6. С. 6—15.
14. Jin B., Qi H., Jia L., Tang Q., Gao L., Li Z., Zhao G. Determination of viability and vigor of naturally-aged rice seeds using hyperspectral imaging with machine learning // Infrared Physics and Technology. 2022. V. 122. P. 104097.
15. Вазов В.М. Гречиха на полях Алтая: монография. М.: Изд-во «Дом Академии естествознания», 2013. 188 с.
16. Марьин В.А., Верещагин А.Л. Распределение размера ядра во фракциях зерна гречихи // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. № 1. С. 130—138.
17. Zontov Y.V., Rodionova O.Y., Kucheryavskiy S.V., Pomerantsev A.L. PLS-DA—A MATLAB GUI tool for hard and soft approaches to partial least squares discriminant analysis // Chemometrics and Intelligent Laboratory System. 2020. No. 203. P. 104064.
18. Мусаев Ф.Б., Потрахов Н.Н., Белецкий С.Л. Краткий атлас рентгенографических признаков семян овощных культур. М.: Изд-во ФГБНУ ФНЦО, 2018. 40 с.
19. Белецкий С.Л., Хаба Н.А., Шилкова О.С. Новый аппаратно-программный рентгенодиагностический комплекс // Технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2018. С. 26—32.
20. Козьмина Н.П., Гунькин В.А., Сусянок Г.М. Зерноведение (с основами биохимии растений). М.: Колос, 2006. 464 с.
21. Dziedzic K., Górecka D., Marques A., Rudzińska M., Podolska G. The Content of Phytosterols in Raw and Roasted Buckwheat Groats and By-products // Czech Journal of Food Sciences. 2015. V. 33. P. 424—430. <https://doi.org/10.17221/121/2015-CJFS>
22. Anne Frank Joe A., Gopal A. Identification of spectral regions of the key components in the near infrared spectrum of wheat grain / 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). P. 1—5. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074207>

23. Ertlen D., Schwartz D., Trautmann M., Webster R., Brunet D. Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy // *European Journal of Soil Science*. 2010. V. 61. No. 2. P. 207—216.
24. Rosales J.H., Yaptenco K.F., Aguila M.J.B., Armstrong P.R. Rapid Differentiation of Commercially-Available Soy Sauces using Near-Infrared Spectroscopy // *Philippine Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2019. V. 15. No. 2. P. 3—12.
25. Pomerantsev A.L., Rodionova O.E. Multiclass partial least squares discriminant analysis: Taking the right way—A critical tutorial // *Journal of Chemometrics*. 2018. V. 32. No. 8. P. e3030.

REFERENCES

1. Aleksenko S.S., Kazimirova K.O., Shtykov S.N. Comparative evaluation of free phenolic compounds content and antioxidant activity of different buckwheat samples // *Zhurnal analiticheskoy himii = Journal of Analytical Chemistry*. 2022. V. 77 (8). P. 704—713. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0044450222080023
2. Wang F.H., Yang J., Zhu H.L. Research on determination method of starch, protein and total flavonoids content in buckwheat by Near-infrared spectroscopy // *Sensor Letters*. 2014. V. 12 (3-4). P. 888—891. DOI: 10.1166/sl.2014.3155
3. Wei Z., Alam T., Al Sulaie S., Bouye M., Deebani W., Song M. An efficient IoT-based perspective view of food traceability supply chain using optimized classifier algorithm // *Information Processing & Management*. 2023. V. 60 (3). P. 103275. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306457323000122> [Accessed 12 February 2024]. DOI: 10.1016/j.ipm.2023.103275
4. Dyck G., Hawley E., Hildebrand K., Paliwal J. Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling // *Smart Agricultural Technology*. 2023. V. 3. P. 100079. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375522000442> [Accessed 15 February 2024]. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100079
5. Sun Y., Ye Z., Zhong M., Wei K., Shen F., Li G., Yuan J., Xing C. Rapid and nondestructive method for identification of molds growth time in wheat grains based on hyperspectral imaging technology and chemometrics // *Infrared Physics & Technology*. 2023. V. 128. P. 104532. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023InPhT.12804532S/abstract> [Accessed 15 February 2024]. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104532
6. Besançon L., Rondet E., Grabulos J., Lullien-Pellerin V., Lhomond L., Cuq B. Study of the microstructure of durum wheat endosperm using X-ray micro-computed tomography // *Journal of Cereal Science*. 2020. V. 96. P. 103115. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073352102030624X> [Accessed 18 February 2024]. DOI: 10.1016/j.jcs.2020.103115
7. Shchukina P.A., Arhipov M.V., Gusakova L.P., Priyatkin N.S. Methodology of preparation of digital X-ray images of seeds for visual interpretation // *Agrofizika = Agrophysica*. 2020. V. 3. P. 36—44. (In Russ.).
8. Zhang J., Qu M., Gong Z., Cheng F. Online double-sided identification and eliminating system of unclosed-glumes rice seed based on machine vision // *Measurement*. 2022. V. 187. P. 110252. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121011593> [Accessed 22 February 2024]. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110252
9. Platov Y.T., Metlenkin D.A., Platova R.A., Rassulov V.A., Vereshchagin A.L., Marin V.A. Buckwheat identification by combined uv-vis-nir spectroscopy and multivariate analysis // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2021. V. 88. P. 723—730. DOI: 10.1007/s10812-021-01231-2
10. Li X., Feng X., Fang H., Yang N., Yang G., Yu Z., Shen J., Geng W., He Y. Classification of multi-year and multi-variety pumpkin seeds using hyperspectral imaging technology and three-dimensional convolutional neural network // *Plant Methods*. 2023. V. 19 (1). P. 1—18. DOI: 10.1186/s13007-023-01057-3
11. An D., Zhang L., Liu Z., Liu J., Wei Y. Advances in infrared spectroscopy and hyperspectral imaging combined with artificial intelligence for the detection of cereals quality // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. V. 63 (29). P. 1—31. DOI: 10.1080/10408398.2022.2066062
12. Caporaso N., Whitworth M.B., Fisk I.D. Near-Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains // *Applied spectroscopy reviews*. 2018. V. 53 (8). P. 667—687. DOI: 10.1080/05704928.2018.1425214
13. Musaev F.B., Beletskiy S.L. History and prospects of radiography application in seed production and seed science. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2021. V. 24 (6). P. 6—15. (In Russ.)
14. Jin B., Qi H., Jia L., Tang Q., Gao L., Li Z., Zhao G. Determination of viability and vigor of naturally-aged rice seeds using hyperspectral imaging with machine learning // *Infrared Physics and Technology*. 2022. V. 122. P. 104097. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022InPhT.12204097J/abstract> [Accessed 12 March 2024]. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104097
15. Vazhov V.M. Buckwheat in the fields of Altai: monograph. Moscow: Izdatel'stvo «Dom Akademii estestvoznaniya», 2013. 188 p. (In Russ.)

16. *Marin V.A., Vereshchagin A.L.* Kernel size distribution in buckwheat grain fractions // *Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2019. V. 1. P. 130—138. (In Russ.)
17. *Zontov Y.V., Rodionova O.Y., Kucheryavskiy S.V., Pomerantsev A.L.* PLS-DA—A MATLAB GUI tool for hard and soft approaches to partial least squares discriminant analysis // *Chemometrics and Intelligent Laboratory System*. 2020. V. 203. P. 104064. Available from: <https://vbn.aau.dk/en/publications/pls-da-a-matlab-gui-tool-for-hard-and-soft-approaches-to-partial-> [Accessed 10 March 2024]. DOI: 10.1016/j.chemolab.2020.104064
18. *Musaeu F.B., Potrahov N.N., Beletskiy S.L.* A brief atlas of radiographic features of vegetable seeds. Moscow: Izdatel'stvo FGBNU FNCO, 2018. 40 p. (In Russ.)
19. *Beletskiy S.L., Haba N.A., Shilkova O.S.* New hardware and software X-ray diagnostic complex // *Tekhnologii proizvodstva i hraneniya material'nyh cennostey dlya gosudarstvennyh nuzhd*. 2018. P. 26—32. (In Russ.)
20. *Koz'mina N.P., Gun'kin V.A., Suslyanok G.M.* Grain science (with basics of plant biochemistry). Moscow: Kolos, 2006. 464 p. (In Russ.)
21. *Dziedzic K., Górecka D., Marques A., Rudzińska M., Podolska G.* The Content of Phytosterols in Raw and Roasted Buckwheat Groats and By-products // *Czech Journal of Food Sciences*. 2015. V. 33. P. 424—430. DOI: 10.17221/121/2015-CJFS
22. *Anne Frank Joe A., Gopal A.* Identification of spectral regions of the key components in the near infrared spectrum of wheat grain / 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). P. 1—5. DOI: 10.1109/ICCPCT.2017.8074207
23. *Ertlen D., Schwartz D., Trautmann M., Webster R., Brunet D.* Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy // *European Journal of Soil Science*. 2010. V. 61 (2). P. 207—216. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2009.01219.x
24. *Rosales J.H., Yaptenco K.F., Aguila M.J.B., Armstrong P.R.* Rapid Differentiation of Commercially-Available Soy Sauces using Near-Infrared Spectroscopy // *Philippine Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2019. V. 15 (2). P. 3—12.
25. *Pomerantsev A., Rodionova O.* Multiclass partial least squares discriminant analysis: Taking the right way—a critical tutorial // *Journal of Chemometrics*. 2018. V. 32 (8). P. e3030. Available from: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cem.3030/> [Accessed 10 March 2024]. DOI: 10.1002/cem.3076
-

РАЗВИТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИКЛАДНЫХ РАЗРАБОТОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2024 г. Кай Чжао^{1,**}, Чжедун Гэ^{1,*}, Лянлян Хуо^{2,***}, Ишэн Гао^{3,****},
Юйчэн Чжоу^{1,****}, Чжихао Яо^{1,*****}

¹Школа информатики и электротехники, Университет Шаньдун Цзяньчжун,
Цзинань 250101, Китай

²Восьмое инженерное подразделение Китайской Строительной Компании,
Шанхай 200112, Китай

³Школа архитектуры и городского планирования, Шаньдун Цзяньчжун,
Цзинань 250000, Китай

E-mail: *gezhedong@sdjzu.edu.cn; **zhao_sdjz@163.com;

1123310614@hit.edu.cn; *gao_sdjz@126.com;

*****zhouyucheng_2016@163.com; *****13573410920@163.com

Поступила в редакцию 18.02.2024; после доработки 18.02.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Деревянные строения свидетельствуют об изысканном мастерстве китайских ремесленников. Из-за природных и человеческих факторов повреждения и разрушения древних деревянных конструкций приводят к потере культурного наследия Китая. Поэтому особенно важно изучить существующие методы выявления дефектов деревянных частей и разработать оптимальные методы реставрации для сохранения деревянных конструкций. Было установлено, что дефекты деревянных конструкций в основном включают в себя растрескивание, гниение, поражение насекомыми, изгиб и вытягивание шпунтов и т.д. Эти дефекты являются основными причинами, влияющими на механические свойства деревянных элементов и угрожающими надежности деревянных конструкций. Для обнаружения этих дефектов были использованы такие методы, как пенетrometer, резистограф, волна напряжения, радар, ультразвук, рентген, инфракрасная спектроскопия и пьезоэлектрические преобразователи, которые относятся к методам полуразрушающего и неразрушающего контроля. Подробно рассмотрены принцип, степень развития и примеры применения технологий обнаружения деревянных зданий, чтобы продемонстрировать преимущества и недостатки этих технологий в различных ситуациях. Необходимо разработать новую и эффективную технологию обнаружения, а также определить направление развития технологии выявления повреждений деревянных конструкций в будущем.

Ключевые слова: деревянная конструкция, неразрушающий контроль, полуразрушающий контроль, анализ состояния древесины, исследование на месте.

APPLICATION PROGRESS AND PROSPECT OF DEFECT DETECTION TECHNOLOGY FOR TIMBER STRUCTURE MEMBERS

© 2024 Kai Zhao^{1,**}, Zhedong Ge^{1,*}, Liangliang Huo^{2,***}, Yisheng Gao^{3,****},
Yucheng Zhou^{1,****}, Zhihao Yao^{1,*****}

¹School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University,
Jinan 250101, China

²China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd.,
Shanghai 200112, China

³School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University,
Jinan 250000, China

E-mail: *gezhedong@sdjzu.edu.cn; **zhao_sdjz@163.com;

1123310614@hit.edu.cn; *gao_sdjz@126.com;

*****zhouyucheng_2016@163.com; *****13573410920@163.com

Timber buildings show the exquisite skills of craftsmen in China. Under the influence of nature and human activities, damage and destruction of ancient timber structures lead to the loss of China's cultural heritage. Therefore, it is particularly important to study the existing defect detection methods of timber members and provide excellent restoration plan for the preservation of timber structures. Defects of timber structure members were found to consist mainly of cracking, decay, insect-attack, bending and pullout of tenons, etc. These defects are the main factors that affect the mechanical properties of timber members and endanger the stability of timber structures. Pilodyn, resistograph, stress wave, radar, ultrasound, X-ray, infrared spectroscopy and piezoelectric transducers are all were studies for detection methods mentioned, which belong to semi-destructive testing and non-destructive testing. In detail, the principle, development status and application cases of wood building

detection technology are elaborated to demonstrate the advantages and disadvantages of these technologies in various scenarios. New and feasible detection technology should be developed, and the development direction of damage detection technology for timber structures in the future is put forward.

Keywords: timber structure, non-destructive testing, semi-destructive testing, timber assessment, on-site investigation.

DOI: 10.31857/S0130308224040061

ВВЕДЕНИЕ

Архитектура отражает культурные особенности страны. Если взять в качестве примера Китай, то в наследовании и развитии архитектуры наиболее распространенными и многочисленными с точки зрения сохранности являются деревянные строения. Цзицзяочэн — самый ранний из обнаруженных памятников деревянной архитектуры, который был построен 4700 лет назад [1]. Древесина является основным материалом деревянных зданий. Причинами повреждений древесины являются гниение, поедание молью, длительная нагрузка и т. д. [2], которые разрушают деревянные здания. Такие повреждения носят необратимый характер и представляют собой значительную угрозу для конструктивной целостности деревянных зданий.

Выявление повреждений в деревянных зданиях может предотвратить возникновение опасных ситуаций. Например, 12 августа 2012 г. деревянная арка в переулке Хуагуан на улице Хефанг в Ханчжоу обрушилась из-за разошедшихся деревянных колонн, что привело к серьезным жертвам [3]. Деревянные здания подвержены повреждениям, и лишь немногие из них хорошо сохранились, что делает их очень ценными. Повреждения деревянных конструкций происходят как на поверхности, так и внутри. Если повреждения на поверхности можно оценить с помощью визуального осмотра, то выявление внутренних повреждений представляет собой серьезную задачу. В прошлом из-за несовершенства технологий выявление повреждений деревянных конструкций обычно осуществлялось путем визуального осмотра или обстукивания. Несмотря на быстроту и универсальность, визуальный осмотр все еще не позволяет выявить возможные внутренние дефекты.

Учитывая историческую и культурную ценность деревянных зданий, трудно обнаружить внутренние повреждения в процессе обследования, поскольку деревянные конструкции не могут быть разобраны или разрушены. Основываясь на этой проблематике, многие ученые провели исследования и предложили различные методы обнаружения внутренних повреждений в деревянных конструкциях, опираясь на такие разделы физики, как механика, электромагнетизм, оптика, акустика и другие.

ВИДЫ ДЕФЕКТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Снижение прочности и безопасности зданий, а также сложности в поддержании в надлежащем состоянии стационарных деревянных конструкций делают повреждение деревянных конструкций важным фактором, который необходимо учитывать. В данном исследовании представлены пять типов повреждений деревянных конструкций на примере нескольких известных зданий.

Здание Эль Коррал дел Конде расположено в Сербии. Оно было построено герцогом Оливаресом в 1561 г. Деревянные колонны здания сильно растрескались, а нижняя часть сгнила из-за изменения влажности и биологического поражения деревянных компонентов. Деревянная пагода Инсянь была построена в 1056 г. и имеет богатую историю. Она расположена в уезде Инсянь провинции Шаньси и является одной из старейших деревянных пагод в Китае. Однако из-за сотен лет землетрясений и длительного периода атмосферной коррозии деревянные конструкции деревянной пагоды Инсянь сместились, перекошились, а некоторые внутренние колонны даже растрескались.

Поверхностное растрескивание, показанное на рис. 1а, — частое явление для древних деревянных конструкций, подвергающихся воздействию внешних условий. Внутреннее растрескивание древесины происходит на более поздней стадии сушки древесины и вызвано растягивающим напряжением внутри деревянного каркаса. Балки и колонны, как несущие деревянные элементы, наиболее подвержены растрескиванию.

Гниение и поражение насекомыми также зависят от влажности древесины, однако они не связаны с растрескиванием. В качестве примера можно привести дом Фуцзю Чжоу и монастырь Христа в Томаре. В результате разрушения колонны дома Фуцзю Чжоу обветшали, что привело к необходимости сноса некоторых зданий. В настоящее время основное здание представляет собой четырехугольную резиденцию [4]. Монастырь Христа в Томаре был построен в XII веке в Португалии. Из-за того, что часть крыш зданий построена с использованием деревянных конструкций, стропила и обрешетка существующих крыш были поражены насекомыми и сгнили.



Рис. 1. Примеры дефектов древесины.

Древесина — сложный материал, состоящий в основном из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, которые служат питательной средой для бактерий, грибов и насекомых. Грибковые гифы широко распространены по поверхности деревянного столба (рис. 1б), а вся нижняя часть столба полностью разъедена. Ключевыми внешними факторами, вызывающими гниение древесины, являются температура и влажность [5], поэтому гниение широко распространено в дождливых регионах южного Китая. Насекомые, такие как термиты, жуки-долгоносики и пчелы-плотники, питаются древесиной и откладывают яйца на поверхности или внутри деревянных конструкций.

После вылупления личинки питаются древесиной, в итоге на поверхности деревянных конструкций остаются лишь небольшие отверстия, однако внутренняя часть значительно разрушена. Опилки, показанные на рис. 1в, являются результатом того, что насекомые вгрызаются в деревянные строения для строительства гнезд. Поражение насекомыми и гниение могут снизить несущую способность деревянных конструкций, тем самым создавая угрозу безопасности этих деревянных зданий, включая днища колонн, заглубленные колонны стен и деревянные стропила.

Существует еще два распространенных типа дефектов в деревянных конструкциях, а именно изгиб (рис. 1г) и вытягивание шпунтов (рис. 1д). Крыша монастыря Христа в Томаре подверглась значительному весу и деформации под действием силы тяжести, вызванной неравномерным поглощением и выделением воды древесиной, что привело к неравномерному высыханию и усадке в радиальном и хордовом направлениях, в результате чего возникло явление изгиба. Сильное вытягивание шпунта может привести к его разрушению, что затруднит ремонт строительной конструкции. Вытягивание шпунта произошло в зале Шахья Мани храма Цзюэюань, расположенного в городе Гуаньюань провинции Сычуань [6]. В данном исследовании представлен полный обзор определений, причин, влияющих факторов и характеристик пяти распространенных типов повреждений деревянных конструкций (табл. 1).

ПОЛУРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Все методы контроля повреждений, описанные в данной статье, можно разделить на две категории: полуразрушающие (ПРК) и неразрушающие (НК). ПРК может привести к незначительным

Таблица 1

Типы дефектов в деревянных конструкциях

Тип дефекта	Определение	Причина возникновения	Влияющий фактор	Отличительные особенности
Трещинообразование	Древесина растрескивается из-за внутренних напряжений или внешнего воздействия	Влажность или степень высыхания древесины различны, внутренняя и внешняя усадка древесных волокон неравномерна, что приводит к появлению трещин	Содержание влаги, метод сушки, материал	Поверхностные трещины, уменьшение грузоподъемности
Гниение	Древесина подвергается гниению в результате воздействия воды или окисления в течение длительного периода времени	Под воздействием таких факторов, как температура и влажность, размножающиеся грибки разъедают древесину, что приводит к снижению ее качества	Содержание влаги, температура, свет, влажность, содержание кислорода и питательных веществ	Поверхность неровная, с выбоинами или серьезной потерей качества, а прочность древесины сильно снижена
Поражение насекомыми	Лунки, гнезда или следы коррозии, вызванные насекомыми, поедающими древесину	Вредоносные насекомые, такие как термиты, мучные черви, осы и т.д., поедают древесину	Содержание влаги, влажность, материал древесины и питательные вещества	Поверхностные повреждения, пустоты внутри древесины, серьезная потеря качества, серьезное снижение прочности древесины
Изгиб	Состояние древесины, при котором возникает искривление или изменение формы в одной или нескольких точках	Накопление деформации под воздействием длительного давления или действия силы тяжести	Материал древесины, расположение точек воздействия и прочность	Деревянная конструкция изгибается, провисает или даже раскалывается, а прочность снижается
Вытагивание шпунтов	Деревянные элементы вытягиваются из врезного и шпоночного соединения	В шпунте и врезном соединении появляются трещины или древесина подвергается усушке, что приводит к вытягиванию шпунта под действием внешних сил	Материал древесины и сила воздействия на врезные соединения	В структуре врезного соединения образуются зазоры, прочность соединений снижается, что приводит к их повреждению и поломке

повреждениям на контролируемом объекте, например, в результате сверления. По сравнению с ПРК, НК имеет многочисленные преимущества в обеспечении целостности деревянных конструкций, которые необходимо проконтролировать.

Пенетрометр

Пенетрометр (Pilodyn) состоит из толкающего рычага, фиксированной ножки, ударной иглы и т.д. Ударная игла входит в древесину с точным и равномерным усилием для измерения глубины, что является принципом определения плотности древесины с помощью пенетрометра (рис. 2).
Чтобы обеспечить точность данных измерений, для полевых испытаний следует использовать один и тот же пенетрометр. Часовая стрелка детектора должна быть направлена на центр контролируемой древесины [7].

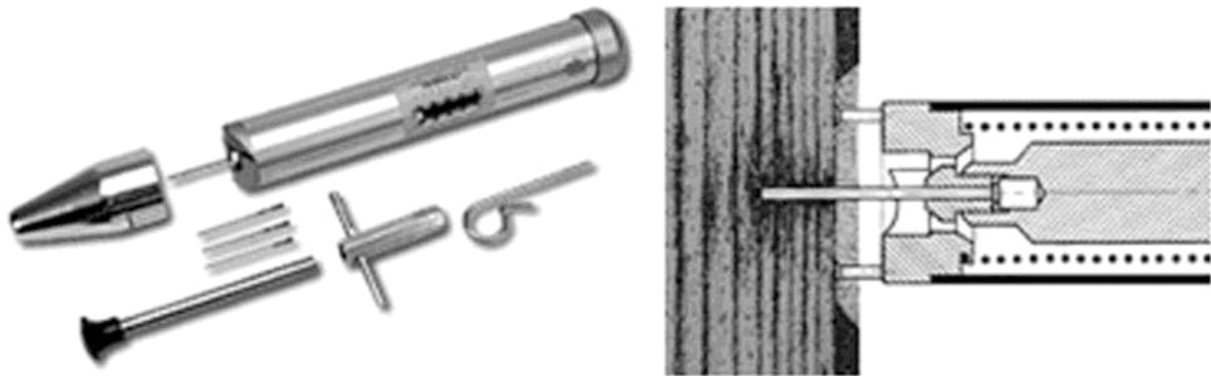


Рис. 2. Пенетромтр и принцип его действия.

Пенетромтр оценивает плотность древесины как один из важных показателей для оценки механических свойств древесины [7] и для облегчения выявления повреждений в деревянных конструкциях. Нейч Талер и др. [8] обнаружили, что существует корреляция между глубиной проникновения ударной иглы пенетромтра и потерей массы древесины. Чем выше степень гниения древесины, тем больше глубина проникновения бойка. Кроме того, была определена зависимость между глубиной проникновения иглы на осевом и радиальном участках и потерей массы. Шанг Даджун и др. [9] в качестве объекта исследования выбрали деревянные конструкции дворца Потала и Норбу Лингка в Тибете и обнаружили, что точность контроля с использованием пенетромтра выше, чем у визуального метода. Хуан Ронгфенг и др. [10] классифицировали рассохшиеся деревянные конструкции, полученные из Зала воинского мастерства Дворцового музея, и оценили радиальную и тангенциальную плотность деревянных конструкций с помощью пенетромтра. Было обнаружено, что изменения плотности древесины в результате гниения не коррелируют с породой дерева. Чтобы провести количественный анализ повреждений древних деревянных конструкций, была создана регрессионная модель между плотностью древесины и глубиной проникновения пенетромтра. Таким образом, пенетромтр является эффективным средством для контроля дефектов деревянных элементов древних конструкций, особенно в результате гниения и поражения насекомыми.

Резистограф

Резистограф может управлять сверлами разных размеров, чтобы они равномерно вращались в древесине. В процессе контроля [11] сверло должно двигаться в направлении, перпендикулярном текстуре древесины. Результаты анализа данных резистографа могут быть представлены в виде графиков волновых форм (рис. 3), где различные сегменты волновой формы представляют внутреннюю информацию о древесине. На основе данных, полученных резистографом, можно определить плотность поперечного сечения древесины. Пиковое значение соответствует области с высокой плотностью, в то время как значение в области минимума соответствует области с низкой плотностью, а сопротивление сверлению полностью разложившейся древесины является наименьшим. Внутренняя влажность древесины влияет на сопротивление сверлению резистометра [12].

Хуан Ронгфенг и др. [13] и Чжан Хоуцзян и др. [14] провели экспериментальные исследования с использованием материалов, полученных из Зала воинского мастерства и храма Чжэньцзюэ в Юаньминьюане (Старый летний дворец). Они обнаружили линейную зависимость между плотностью древесины и сопротивлением сверлению, где большая плотность древесины соответствует увеличению сопротивления сверлению. Для точного прогнозирования плотности древесины Синь Ли и др. [15] использовали относительное сопротивление сверления и относительное сопротивление подачи в качестве опорных переменных для определения плотности древесины и ввели теоретическую модель распространения информации. Точность результатов прогнозирования плотности была наиболее высокой, когда значения относительного сопротивления сверления и относительного сопротивления подачи составляли 0,2 и 0,8 соответственно.

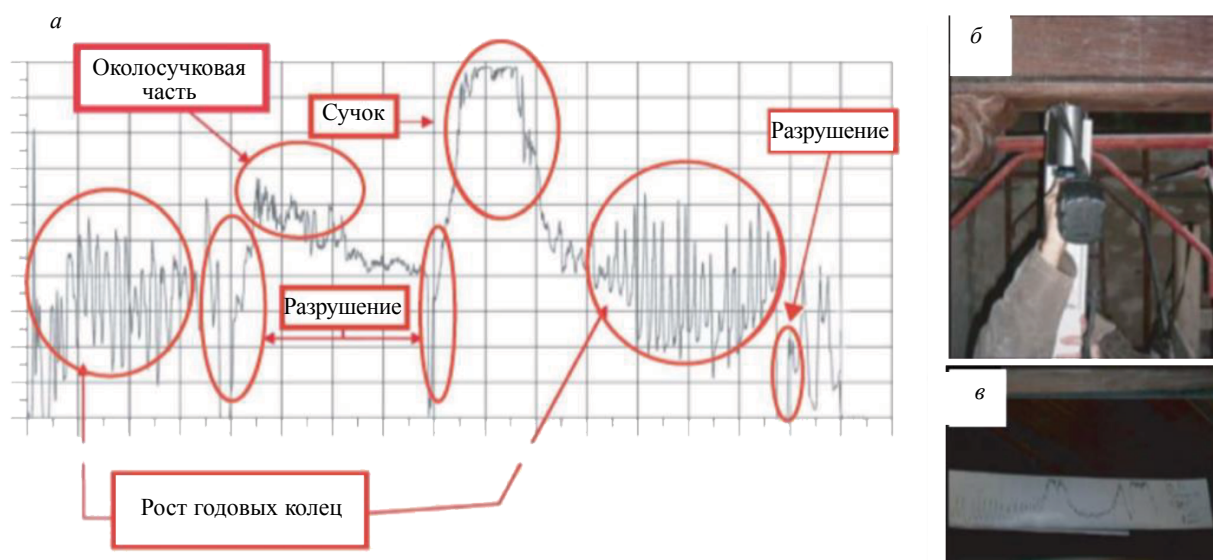


Рис. 3. График примера профиля сопротивления сверлению и описание изменения плотности (а), резистограф (б), распечатка резистограммы (в).

Возможности резистографа по поиску дефектов весьма высоки [16, 17], а резистограф может быть сопряжен с другими системами для облегчения диагностики древних деревянных конструкций [18]. Анализ геометрических характеристик неровных участков деревянных балок под влиянием затухания достигается с помощью измерений резистографа и лазерного сканера. Также можно определять, отклонилась ли траектория бурения резистографа. Jaime Cuartero и др. [19] улучшили вышеупомянутый метод и разработали трехмерную (3D) параметрическую модель, имитирующую разрушающееся состояние деревянных зданий, используя данные измерений резистографа и лазерного сканера.

Волна напряжения

Систему регистрации волн напряжения можно классифицировать как однопутевую или многопутевую. Принцип действия детектора заключается в том, что ударный молоток бьет по датчику с блоком измерения ускорения с постоянной частотой, вызывая волну напряжения, распространяющуюся по древесине. Датчик принимает этот сигнал и рассчитывает время распространения звуковой волны между двумя датчиками. Направление и скорость распространения волны напряжения будут ослабляться дефектами [20, 21]. Связь между частотным спектром сигналов волн напряжения и механическими свойствами древесины позволяет идентифицировать расположенные в ней дефекты, такие как гниение, растрескивание, поражение насекомыми.

Чтобы изучить зависимость между количеством датчиков и точностью обнаружения, в лесном бюро Dailing в провинции Хэйлунцзян было отобрано 10 дефектных бревен [22]. Было обнаружено, что чем больше датчиков, тем точнее изображение поперечного сечения древесины отражает реальную ситуацию. Группа вывела два уравнения, связанные с количеством датчиков, используя степень соответствия изображения и коэффициент ошибок в качестве зависимых переменных. Метод расчета уравнения следующий:

$$y_1 = 0,22 + 0,058x, x = \{3, 4, \dots, 12\}; \quad (1)$$

$$y_2 = 2,787 - 0,247x, x = \{3, 4, \dots, 12\}, \quad (2)$$

где y_1 — показатель степени соответствия изображения; y_2 — коэффициент ошибки; x — количество датчиков. Для контроля древесины диаметром 200—400 мм требуется не менее 12 датчиков. Для достижения точности обнаружения более 90 % [23] необходимо иметь не менее 22 датчиков.

Томография волн напряжения является одним из важных методов визуализации волновых сигналов напряжения. Feng Nailin и др. [24] провели исследование характеристик распростране-

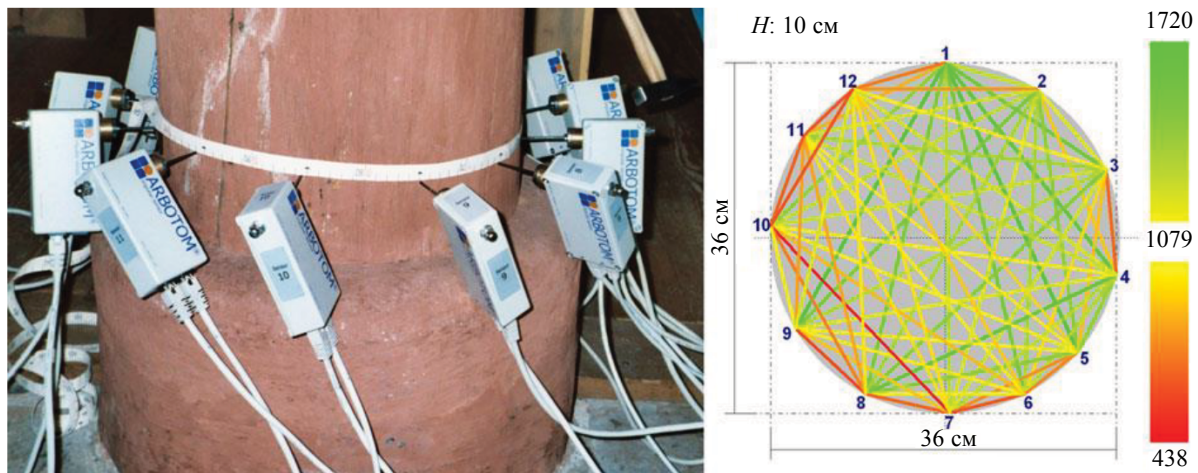


Рис. 4. Контроль на месте многопутевой волны напряжения в деревянной колонне.

ния волн напряжения в древесине, проанализировав скорость распространения при наличии в древесине гнили или других дефектов. Huan Zhan и др. [25] предложили алгоритм томографии для коррекции ошибок скорости при томографии древесины, который повысил точность томографии волн напряжения и точность оценки повреждений древесины. Алгоритм восстановления изображения волн напряжения преобразует полученные данные в изображение распространяющихся волн, отображая внутренние дефекты древесины различными цветами (рис. 4).

Du Xiaochen и др. [26, 27] внесли множество усовершенствований в алгоритм восстановления изображений волн напряжения. Во-первых, они предложили усовершенствованный алгоритм эллиптической пространственной интерполяции и использовали метод компенсации скорости для получения более точных пространственных интерполяционных данных. Это позволило эффективно решить проблему интерференции плотности при реконструкции формы поперечного сечения ствола дерева в дефектных областях. Впоследствии для дальнейшего усовершенствования алгоритма были внедрены алгоритм сегментации лучей, основанный на технологии эллиптических окрестностей, и алгоритм сегментационной эллиптической пространственной интерполяции. Они были использованы для сегментации пучков лучей волн напряжения и оценки скорости распространения волн напряжения, что позволило более точно определить размер и форму внутренних дефектов в древесине. Du Xiaochen и др. [28] также провели исследование по трехмерной визуализации волн напряжения. На основе алгоритма Kriging был предложен метод выявления внутренних дефектов в древесине с помощью трехмерной визуализации волн напряжения, названный TKriging. Этот алгоритм демонстрирует более высокую стабильность, а извлеченная форма области дефекта близко приближается к реальной форме дефекта, со средней относительной ошибкой всего 24,97 %.

Zhang Junjie и Kourosh Khoshelham [29] предложили метод, сочетающий ближнюю фотограмметрию с технологией звуковой томографии для трехмерного восстановления как внешней, так и внутренней поверхности дерева. Для получения координат акустического датчика используется время распространения звуковой волны и фотограмметрическая модель, а для получения внутреннего состояния дерева применяется пространственная интерполяция скорости звуковой волны.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Метод неразрушающего контроля деревянных конструкций в основном использует акустические и оптические методы для оценки архитектурных повреждений без изменения структуры и механических характеристик элементов здания.

Рентгеновское излучение

Когда рентгеновское излучение проходит через объект, его поглощение зависит от плотности, толщины и энергии пучка излучения объекта. Устройство приема рентгеновского излучения собирает сниженную энергию рентгеновского излучения, а компьютер генерирует проекционное изображение объекта. С помощью методики формирования рентгеновских изображений можно получать двухмерные проекционные и томографические изображения, а трехмерные изображения создаются путем комбинации нескольких томографических изображений. Рентгеновское излучение подходит для контроля дефектов древесины [30].

Brian V. Funt и Edwin C. Bryant [31] разработали систему анализа изображений, полученных методом компьютерной томографии (КТ), для выявления различных типов дефектов, таких как гниение и трещины в древесине, опираясь на такие характеристики, как уровень серого цвета изображения, количество пикселей на дюйм и форма интересующей области. Johan Skog и Johan Oja [32] обнаружили, что, используя данные рентгеновского и трехмерного сканирования в сочетании с компенсацией длины пути, можно определить прогнозируемую плотность заболони и сердцевины для бревен в поперечном сечении. Связь между плотностью древесины и рентгеновскими изображениями исследовали Thomas Lechner и др. [33]. Они предложили метод количественной оценки плотности древесины по значениям градаций серого, полученным на рентгеновских снимках. С помощью калибровочного клина была получена линейная корреляция между интенсивностью градаций серого на рентгеновских изображениях и соответствующими измерениями плотности. Работоспособность этого подхода была экспериментально подтверждена на примере деревянных балок.

Kaori Fujita и др. [34] произвели обследование колонн храма Кенчо-дзи в Японии и создали модель данных. Была показана эффективность использования рентгеновского излучения для контроля дефектов деревянных конструкций. Gao Yisheng и др. [35] использовали метод компьютерной томографии для восстановления деревянных конструкций, разрушенных пчелами-плотниками, и отверстия в сотах внутри деревянных конструкций были отчетливо видны, демонстрируя тем самым огромный потенциал технологии компьютерной томографии в области выявления дефектов деревянных конструкций. Это свидетельствует о значительном потенциале метода компьютерной томографии в области контроля деревянных конструкций. Средством контроля, использованным Gao Yisheng и коллегами, является медицинская компьютерная томография (рис. 5а). На рис. 5б показаны восстановленные результаты внутреннего контроля деревянных конструкций. Niclas Björngrim и др. [36] провели обследование восьми балок моста Lejonström, второго по длине деревянного моста в Швеции, и на КТ-изображениях были обнаружены явные признаки трещин и гниения внутри деревянных балок. Кроме того, применение рентгеновской дифракции при исследовании баясины из деревянной пагоды Иньсянь позволило точно определить изменения в кристаллической структуре целлюлозы, что подтверждает преимущество применения рентгеновского излучения в области неразрушающего контроля [37].

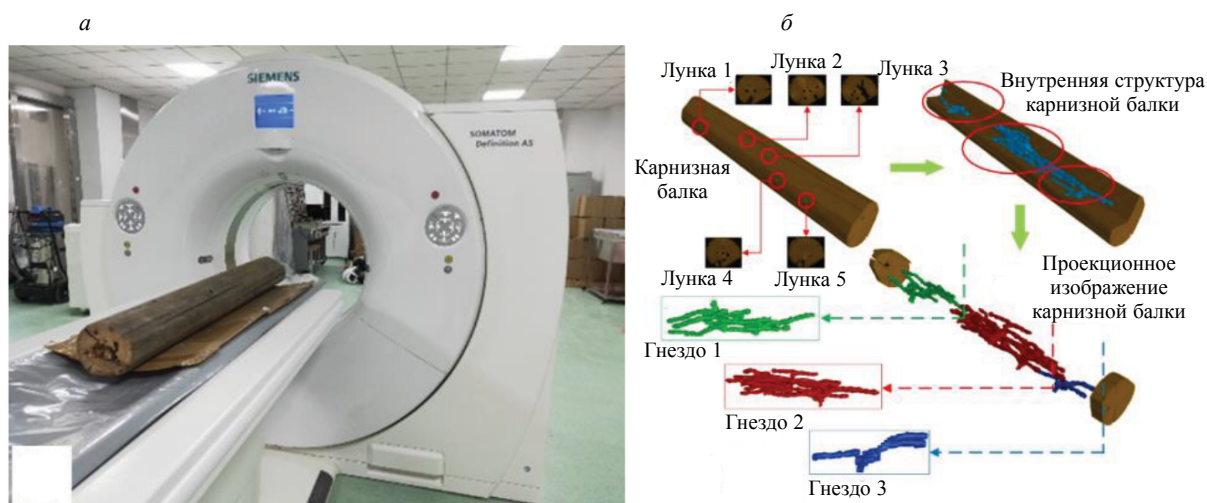


Рис. 5. Контроль и восстановление внутренних дефектов в балке: рентгеновское оборудование для исследования древесины (а); результаты восстановления внутренней структуры карнизной балки (б).

Воздействие рентгеновских лучей, являющихся одним из видов электромагнитного излучения, может привести к потенциальному долгосрочному ущербу для здоровья людей в окружающей среде [38]. Поэтому при использовании метода рентгеновского сканирования необходимо принимать меры защиты. Стоимость, размеры оборудования и проблемы безопасности приводят к тому, что технология рентгеновской визуализации не нашла широкого применения при обследовании зданий. Рентгеновская визуализация — это технология неразрушающего контроля, которая обеспечивает точность результатов и возможность получения четких изображений внутренней структуры деревянных конструкций.

Радиолокационная система

Принцип работы радара заключается в том, чтобы пропускать радиоволны и микроволны через объекты, обнаруживать отраженные сигналы прерывистых волн в среде распространения и анализировать связь между изменениями амплитуды и объектами. Глубина проникновения радара определяется частотой сигнала волны и электромагнитными свойствами среды [39]. Как правило, радар (рис. 6) состоит из пары передающей и приемной антенн, генератора электромагнитных импульсов и системы сбора данных [40].

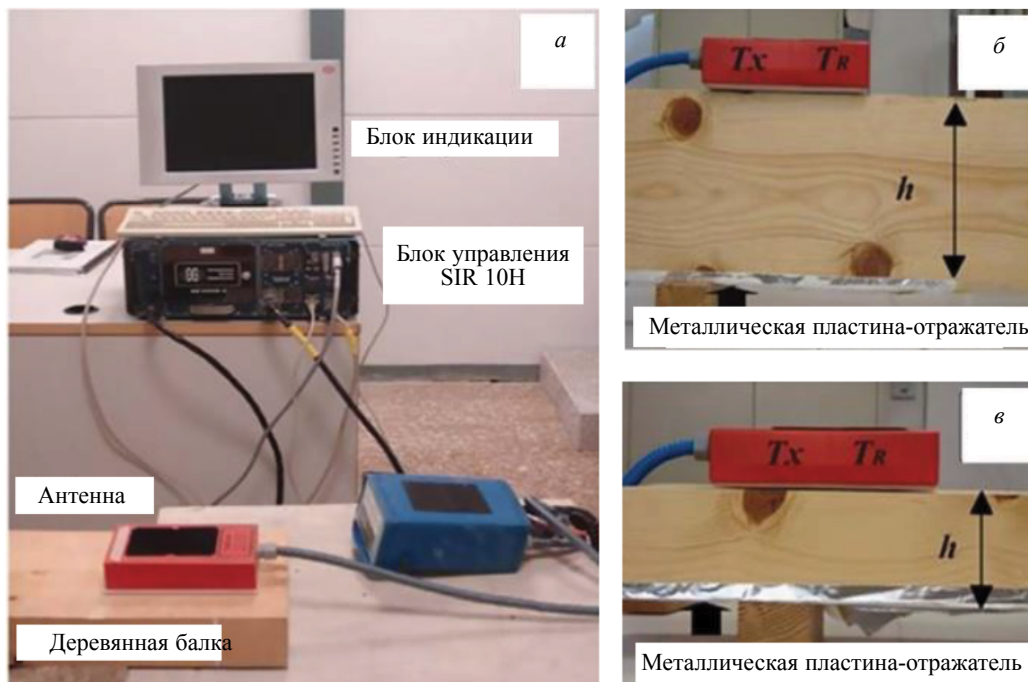


Рис. 6. Устройство SIR-10H, соединенное с 1,6 ГГц-антенной (Geophysical Survey Systems Inc.), и радиолокационные измерения на образцах древесины (а); антенна, расположенная на краю (б) и на поверхности деревянных образцов (в) в процессе сбора данных.

Dayakar Devaru и др. [41] использовали MATLAB для анализа данных радиолокационного сканирования, различения нормальной и поврежденной древесины, обнаружения металлов, сучков и гниения. Yoshihisa Fujii и др. [42] разработали небольшой радар, предназначенный для обнаружения разложения грибков и поражения древесины насекомыми. Однако на результаты обнаружения радара влияют различные факторы, включая влажность, температуру и антикоррозийную обработку, особенно содержание влаги, что может привести к ошибочному распознаванию и пропуску сигнала от дефекта [43]. Основываясь на этом явлении, I. Rodríguez-Abad и др. [44] измерили содержание влаги (СВ) в древесине с помощью радара и убедились, что скорость электромагнитных волн может быть использована для мониторинга изменений содержания влаги в древесине.

С помощью данных о радиолокационных измерениях можно создавать трехмерные изображения, что облегчает восприятие сложных геометрических форм. Maurizio Lualdi и др. [45] обнару-

жили, что плотная сеть радарных линий и подходящая система позиционирования могут быть использованы для построения трехмерных изображений. Однако радар не подходит для объектов, расположенных перпендикулярно земле, таких как колонны и стены. X. Núñez-Nieto и др. [46] использовали срезы, полученных с помощью георадара, для анализа данных, в то время как с помощью модели конечных разностей во временной области имитировали передачу радиолокационных волн в среде с различной влажностью, что дало удовлетворительные результаты.

Метод радиолокации уже неоднократно применялся в таких странах, как Австралия и Испания. Возможность ее применения на месте не вызывает сомнений, и она обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, быстрое распознавание и безопасность [47—50]. Недостатком является то, что внутренние характеристики объекта нелегко различить, что затрудняет определение оптимальной частоты антенны при работе в полевых условиях.

Ультразвуковой метод

Ультразвуковой метод похож на метод волн напряжения тем, что он позволяет оценить форму измеряемого объекта на основе затухания и скорости распространения волны.

Ультразвуковой контроль подразделяется на контактный и бесконтактный методы. Контактный метод предполагает совмещение датчика с подложкой с помощью смазки или непосредственного прикрепления датчика к материалу. Недостатком является то, что контактная жидкость портит поверхность древесины [50]. После длительных исследований был разработан бесконтактный метод, не требующий использования контактных жидкостей [51]. Существует три метода размещения датчиков для ультразвукового контроля: прямой метод, при котором датчик размещается параллельно древесине, и косвенный метод, при котором излучатель и приемник размещаются на одной поверхности (рис. 7). Paulo B. Lourenço и др. [52] показали, что непрямой метод имеет наилучший эффект обнаружения по сравнению с двумя другими методами размещения датчиков.

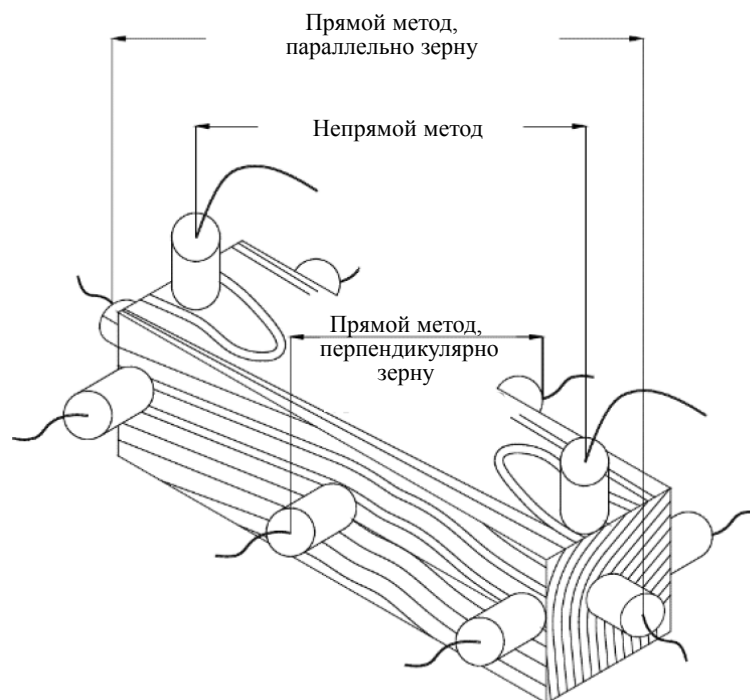


Рис. 7. Стандартная схема ультразвуковых методов контроля.

С помощью метода ультразвукового исследования можно обнаружить внутренние дефекты в древесине [53]. Факторы, влияющие на ультразвуковые измерения, включают геометрию поля

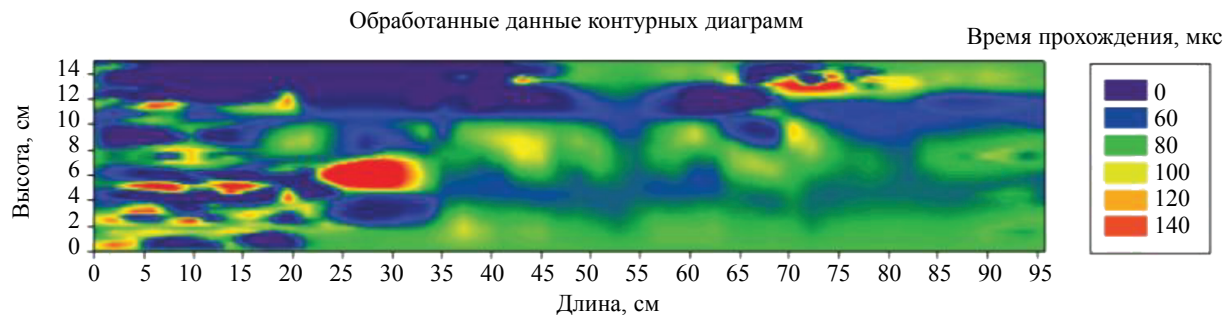


Рис. 8. Результаты определения зоны повреждения в клееных балках с помощью ультразвукового оборудования.

излучения, отражение и преломление волн на макроскопической границе среды, а также явление рассеяния [54]. При использовании компьютерной томографии для анализа времени распространения ультразвука в результатах можно увидеть распадающиеся участки. С развитием технологий появились автоматические томографические системы для поиска дефектов в деревьях [55]. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco и Amanda Rocha Teixeira [56] использовали ультразвук для контроля участка клееного бруса, в котором наблюдалось внутреннее разрушение, а затем применяли изохроматическую карту для отображения поврежденного участка (рис. 8).

Количество дефектов в древесине можно подсчитать, используя скорости ультразвуковых волн сжатия, коэффициенты пропускания и модули упругости в радиальном и тангенциальном направлениях [53, 57].

При объединении ультразвуковой технологии с динамической обобщенной сетью «TimberNet» ультразвуковой сигнал передается в сеть в качестве входного сигнала, что позволяет быстро идентифицировать повреждения и автоматически извлекать признаки повреждений путем вычислений [58]. Этот метод исключает необходимость вмешательства человека, а точность распознавания достигает 100 %. Это демонстрирует исключительную способность сочетать технологию ультразвука с нейронными сетями, что знаменует собой значительный прогресс в области ультразвуковой диагностики. Кроме того, положительные результаты были достигнуты благодаря объединению методов ультразвуковых измерений с эмпирической модовой декомпозицией [59].

По сравнению с различными типами аппаратуры для обнаружения дефектов древесины, метод ультразвука оказывается достаточно эффективным в качестве метода предварительного контроля дефектов [60]. Однако акустический метод обнаружения не позволяет точно определить местоположение и тип дефектов [61]. Кроме того, остается неясной корреляция между влажностью древесины и скоростью распространения ультразвука [61—64].

ДРУГИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Инфракрасная спектроскопия

Метод инфракрасной спектроскопии позволяет обнаружить наличие плесени и раннего гниения в деревянных конструкциях [65]. Гниение постепенно разрушает древесину, поэтому его трудно обнаружить. Гниение деревянных конструкций можно определить с помощью инфракрасной спектроскопии по уменьшению или ослаблению содержания лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы.

Принцип ближней инфракрасной спектроскопии заключается в возбуждении инфракрасным светом колебаний функциональных групп C—H, N—H и O—H в древесине для обнаружения наличия водородсодержащих групп с последующей оценкой соответствующих физических и химических свойств древесины [66]. Спектроскопия в ближней инфракрасной области часто используется в сочетании с другими методами для обнаружения дефектов древесины. Anna Sandak и др. [67] использовали спектроскопию в ближней инфракрасной области для оценки спектра и стехиометрии образцов древесины, обнаружив, что грибы оказывают влияние на полосы лигнина и гемицеллюлозы. Оборудование, используемое для ИК-спектроскопии, состоит в основном из источника света и детектора, как показано на рис. 9. В работе [68] подчеркивается, что при использовании ближней инфракрасной спектроскопии для оценки состояния древесины необходимо

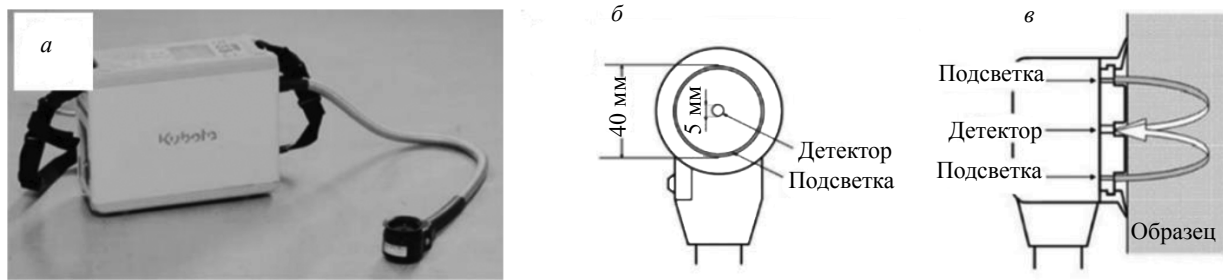


Рис. 9. Фотография портативного спектрофотометра (KBA100R) (а); схема зонда (б); схема облучения и контроля с использованием Vis-NIR light (в).

создать специализированную базу данных с высокоточными эталонными значениями для обеспечения надежной модели оценки. Технология спектроскопии в ближней инфракрасной области обеспечивает многочисленные преимущества, такие как возможность объединения спектральных данных с эталонными значениями посредством многомерного анализа данных и создания моделей прогнозирования различных свойств древесины. Технология спектроскопии позволяет обнаружить начальные процессы гниения деревянных конструкций [69].

Dilek Dogu и др. [70] использовали оптическую микроскопию и инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) для оценки древесины, привезенной из монастыря Великий Метеорон в Греции. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье использовалась для анализа состояния лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы. Было установлено, что древесина подверглась коррозии под воздействием грибов и насекомых.

Пьезокерамические преобразователи

В последние годы был достигнут значительный прогресс в контроле состояния металла и бетона с помощью пьезокерамических преобразователей и активного зондирования, а также значительные достижения в оценке дефектов деревянных конструкций [71]. Принцип метода контроля дефектов древесины с использованием пьезокерамических преобразователей и активного зондирования заключается в активном измерении волн напряжения. Активное зондирование подразумевает использование пьезоэлектрического преобразователя в качестве источника волн напряжения, а генерируемая волна напряжения передается другому пьезоэлектрическому преобразователю. Внутреннее повреждение древесины можно оценить путем измерения затухания волн напряжения. Однако этот метод требует прикрепления датчика к поверхности наблюдаемого объекта с помощью эпоксидной смолы. В этой работе автор предложил показатель повреждений, использующий анализ вейвлет-пакетов, что позволило успешно обнаружить трещины и отверстия в режиме реального времени. Nan Fang и др. [72] сообщили, что пьезокерамические датчики и активное

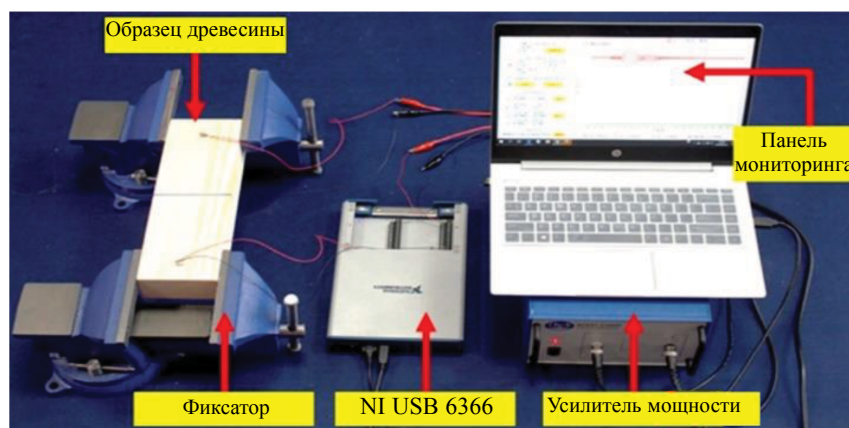


Рис. 10. Оборудование для контроля на основе пьезокерамики.

зондирование были использованы для контроля деревянных конструкций, но результаты оказались неудовлетворительными. Xiong Haibei и др. [73] усовершенствовали метод контроля с помощью пьезокерамических преобразователей и активного зондирования (рис. 10), заменив метод количественной оценки изменения сигнала волны напряжения во временной области на метод визуальной области, и успешно обнаружили трещины в древесине. В табл. 2 приведены восемь типов технологий обнаружения дефектов деревянных конструкций.

Таблица 2

Сравнение методов контроля дефектов в деревянных конструкциях

Метод	Принцип контроля	Способ контроля	Область контроля	Контролируемые типы дефектов	Преимущества	Недостатки
Пенетрометр	Механика	ПРК	Точка	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Малый объем, простота использования, высокая устойчивость к внешним воздействиям	Информация об единичном измерении, влияние износа иглы
Резистограф	Механика	ПРК	Отрезок прямой	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Малый объем, высокая точность и скорость контроля, простота использования, высокая устойчивость к внешним воздействиям	Информация об единичном измерении, влияние износа иглы и скорости сверления
Волна напряжения	Акустика	ПРК	Отрезок прямой/ Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Простота использования, высокая устойчивость к внешним воздействиям	Определение уровня волны напряжения в одном направлении является единым, акустическое отражение подвержено ошибкам
Рентгеновское излучение	Оптика	НК	Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Благодаря технологии компьютерной томографии изображение максимально приближено к контролируемому объекту	Высокая стоимость оборудования, большой объем, в процессе контроля используется ионизирующее излучение
Ультразвук	Акустика	НК	Отрезок прямой / Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Простота использования, высокая скорость контроля, хорошая диаграмма направленности и высокое проникновение (в объект контроля)	Для контроля этим способом необходимо использовать контактную жидкость, тип контактной жидкости вещества, условия контроля, физические свойства объекта могут повлиять на результаты

Окончание табл. 2

Радиолокационная система	Электромагнетизм	НК	Плоскость	Поражение насекомыми, растрескивание, гниение	Малый объем, возможность проведения масштабных исследований за короткое время	Контроль нескольких объектов может привести к пропускам и ошибкам, низкая точность обнаружения дефектов на небольших площадях
Инфракрасная спектроскопия	Колебания молекул	НК	Плоскость	Гниение	Анализ дефектов древесины с химической точки зрения	Можно контролировать только некоторые объекты
Пьезокерамические преобразователи и активное зондирование	Акустика	НК	Плоскость	Растрескивание	Малый объем, Простота использования	Технология в разработке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы неразрушающего контроля имеют различные сценарии применения, и среди них нет абсолютного превосходства или недостатка. В практическом применении эти методы все же имеют некоторые недостатки. Например, радиолокационный и ультразвуковой контроль может оказаться неэффективным для распознавания дефектов на цилиндрических поверхностях со значительной кривизной. Для повышения эффективности обнаружения дефектов в деревянных конструкциях целесообразно создать многофункциональную интегрированную систему. Каждый метод должен пройти всестороннюю оценку, и на основе характеристик каждого метода распределить их по различным этапам процесса контроля. Такой подход позволяет добиться комплексной оптимизации технологий контроля, повышая точность и эффективность данных мониторинга. Оборудование для контроля должно развиваться в направлении большей адаптивности и интеграции для проведения испытаний на месте. На этапе обработки данных оно может быть объединено с такими технологиями, как глубокое обучение, для автоматического сбора и анализа данных, что позволит добиться более точной локализации дефектов и определения их типа. Кроме того, на основе типов и размеров дефектов может быть составлен отчет об анализе механических характеристик деревянных компонентов. Результаты анализа могут быть интегрированы в цифровую информацию о деревянных сооружениях, а алгоритмы могут быть использованы для моделирования эволюции повреждений здания, анализа причин и процессов повреждения деревянных зданий, моделирования влияния повреждений на общую структуру и оценки последствий отказа от ремонта. Разработка решений по устранению дефектов, включая выбор материала и продолжительность консервации после ремонта.

Авторы признательны молодежному проекту Фонда естественных наук провинции Шаньдун, № проекта ZR2020QC174.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Данная работа поддержана Фондом естественных наук провинции Шаньдун, Китай (№ гранта ZR2020QC174), программой развития инноваций и предпринимательства для студентов Китайского национального университета (№ гранта X202310119 и X202210330).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weimin Guo, Xianjun Fan, Ruijing Wu, Tao Shi, Yongchao Ma, Mengzhou Yu, Yue Hu.* Neolithic large-scale wooden structure F63 at the Jijiaocheng site in Lixian county, Hunan // *Archaeology*. 2023, V. 5. P. 41—61.
2. *Tampone Gennaro.* Acquaintance of the ancient timber structures // *Historical constructions*. 2001. P. 117—144.
3. *Xin Yi, Shen Yu.* Reflections on anti-corrosion design of timberwork building from the memorial arch collapse accident // *Journal of Tianjin Chengjian University*. 2013. V. 19. No. 02. P. 87—91.
4. *Peixuan Wang, Shengcai Li, Macchioni Nicola, Palanti Sabrina, Milani Gabriele.* Comprehensive evaluation method of historical timber structural building taking Fujiu Zhou House as an example // *Forests*. 2021. V. 12. No. 9. P. 1—21.
5. *Xingxia Ma, Yunfei Qiao, Dongqing Li, Yanhua Wang.* Biological hazard prevention and protection system for wood components in ancient buildings // *Chinese Journal of Wood Science and Technology*. 2023. V. 37. No. 01. P. 83—90.
6. *Qian Zhou, Weiming Yan, Jinbao Ji.* Typical aseismic construction problems in ancient Chinese wooden buildings of the Ming and Qing Dynasties // *Sciences of Conservation and Archaeology*. 2011. V. 23. No. 02. P. 36—48. <https://doi.org/10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2011.02.001>
7. *Hansen Christian Pilegaard.* Application of the Pilodyn in forest tree improvement. Humblebaek: Danida Forest Seed Centre 11, 2002.
8. *Thaler Nejc, Lesar Boštjan, Humar Miha.* Correlation between brown rot decay and Pilodyn measurements // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2012. V. 70. No. 6. P. 893—895. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0617-8>
9. *Dajun Shang, Xinfang Duan, Zhongping Yang, Pingping Wang, Guanwu Zhou.* Research on some decayed and insect-attacked ancient wood members in part of Xizang by PILODYN nondestructive evaluation method // *Forestry Science & Technology*. 2007. V. 5. P. 53—55.
10. *Rongfeng Huang, Yanmei Wu, Hua Li, Xiuying Liu.* Quantitative analysis of decaying detected by Pilodyn in wood of ancient architecture // *Scientia Silvae Sinicae*. 2010. V. 46. No. 10. P. 114—118.
11. *Tannert Thomas, Anthony Ronald W., Kasal Bohumil, Kloiber Michal, Piazza Maurizio, Riggio Mariapaola, Rinn Frank, Widmann Obert, Yamaguchi Obuyoshi.* In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques // *Materials and Structures*. 2014. V. 47. P. 767—785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>
12. *Anagnostopoulou Vasiliki, Pournou Anastasia.* Correlating visual grading with NTD methods for assessing timber condition in historic buildings // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 273—280. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.273>
13. *Rongfeng Huang, Xiaohuan Wang, Hua Li, Xiuying Liu.* Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture // *Journal of Beijing Forestry University*. 2007. V. 6. P. 167—171.
14. *Houjiang Zhang, Leil Zhu, Yanliang Sun, Xiping Wang, Haicheng Yan.* Determining modulus of elasticity of ancient structural timber // *Advanced Materials Research*. 2011. V. 217. P. 407—412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.217-218.407>
15. *Li Xin, Qianb Wei, Chang Lihong.* Analysis of the density of wooden components in ancient buildings by micro-drilling resistance, using information diffusion // *BioResources*. 2019. V. 14. No. 3. P. 5777—5787. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.5777-5787>
16. *Jerzy Jasieńko, Tomasz Nowak, Łukasz Bednarz.* Wrocław university's Leopoldinum Auditorium—tests of its ceiling and a conservation and strengthening concept // *Advanced Materials Research*. 2010. V. 133. P. 265—270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.265>
17. *Xiping Wang, Teder Marko, Wacker James.* Condition assessment of the timber structures of a century-old industrial building using a nondestructive inspection procedure // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 840—848.
18. *Cabaleiro I Manuel, Branco Jorge M., Sousa Hélder S., Conde Borja.* First results on the combination of laser scanner and drilling resistance tests for the assessment of the geometrical condition of irregular cross-sections of timber beams // *Materials and Structures*. 2018. V. 51. P. 1—15. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1225-9>
19. *Cuartero Jaime, Cabaleiro Manuel, Sousa Hélder S., Branco Jorge M.* Tridimensional parametric model for prediction of structural safety of existing timber roofs using laser scanner and drilling resistance tests // *Engineering Structures*. 2019. V. 185. P. 58—67. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.096>
20. *Kolsky H.* Stress waves in solids // *Courier Corporation*. 1963. V. 1. P. 88—110.
21. *Wensu Lin, Jinhua Wu.* Study on application of stress wave for nondestructive test of wood defects // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 401. P. 1119—1123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.401-403.1119>
22. *Lihai Wang, Huadong Xu, Cilin Zhou, Li Li, Xuechun Yang.* Effect of sensor quantity on measurement accuracy of log inner defects by using stress wave // *Journal of Forestry Research*. 2007. V. 18. No. 3. P. 221—225. <https://doi.org/10.1007/s11676-007-0045-5>

23. *Shanqing Liang, Fu Feng*. Effect of sensor number and distribution on accuracy rate of wood defect detection with stress wave tomography // *Wood Research*. 2014. V. 59. No. 4. P. 521—532.
24. *Hailin Feng, Yiming Fang, Jian Li, Guanghui Li*. Using stress wave based technology for wood material nondestructive testing // *Advanced Materials Research*. 2011. V. 143. P. 265—270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.143-144.265>
25. *Zhan Huan, Zhi Jiao, Guanghui Li, Xi Wu*. Velocity error correction based tomographic imaging for stress wave nondestructive evaluation of wood // *BioResources*. 2018. V. 13. No. 2. P. 2530—2545. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2530-2545>
26. *Xiaochen Du, Shaozhe Li, Guanghui Li, Hailin Feng, Shenyong Chen*. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation // *BioResources*. 2015. V. 10. No. 3. P. 3948—3962.
27. *Xiaochen Du, Jiajie Li, Hailin Feng, Shengyong Chen*. Image reconstruction of internal defects in wood based on segmented propagation rays of stress waves // *Applied Sciences*. 2018. V. 8. No. 10. P. 1—18. <https://doi.org/10.3390/app8101778>
28. *Xiaochen Du, Hailin Feng, Mingyue Hu, Shengyong Chen*. Three-dimensional stress wave imaging of wood internal defects using TKriging method // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. V. 148. P. 63—71. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.005>
29. *Junjie Zhang, Khoshelham Kourosh*. 3D reconstruction of internal wood decay using photogrammetry and sonic tomography // *The Photogrammetric Record*. 2020. V. 35. No. 171. P. 357—374. <https://doi.org/10.1111/phor.12328>
30. *Osterloh Kurt R. S., Bücherl Thomas, Hasenstab Andreas, Rädcl Christoph, Zscherpel Uwe, Meinel Dietmar, Weidemann Gerd, Goebels Jürgen, Ewert Uwe*. Fast neutron radiography and tomography of wood as compared to photon based technologies / *Proceedings of DIR 2007—International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, 2007. Lyon, France.
31. *Funt Brian V., Bryant Edwin C.* Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography images // *Forest Products Journal*. 1987. V. 37. No. 1. P. 56—62.
32. *Skog Johan, Oja Johan*. Density measurements in pinus sylvestris sawlogs combining X-ray and three-dimensional scanning // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2010. V. 25. P. 470—481. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.509326>
33. *Lechner Thomas, Sandin Ylva, Kliger Robert*. Assessment of density in timber using X-ray equipment // *International Journal of Architectural Heritage*. 2013. V. 7. P. 416—433. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.642055>
34. *Fujita Kaori, Shin Eunmi, Ibaraki Akito, Sanuki Masashi*. Earthquake response monitoring and structural analysis of traditional Japanese timber temple // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 823—828. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.823>
35. *Yisheng Gao, Zhedong Ge, Jiaqi Fang, Xiaoxia Yang, Yucheng Zhou*. Effect of carpenter bee nests on timber building components Based on computed tomography (CT) // *BioResources*. 2022. V. 17. No. 2. P. 3320—3331. <https://doi.org/10.15376/biores.17.2.3320-3331>
36. *Björngrim Niclas, Myrnycheva Olena, Fjellström Per-Anders*. The use of large-scale X-ray computed tomography for the evaluation of damaged structural elements from an old timber bridge // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. V. 17. No. 6. P. 1028—1029. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2137697>
37. *Keying Long, Kaiqiang Chen, Lanying Lin, Feng Fu, Yong Zhong*. Deterioration of microstructures and properties in ancient architectural wood from Yingxian wooden pagoda (1056 AD) during natural aging // *Forests*. 2023. V. 14. P. 1—12. <https://doi.org/10.3390/f14020393>
38. *Sklarczyk Christoph, Porsch Felix, Wolter Bernd, Boller Christian, Kurz Jochen H.* Nondestructive characterization of and defect detection in timber and wood // *Advanced materials research*. 2013. V. 778. P. 295—302. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.295>
39. *Harry M.J.* Chapter 1—Electromagnetic principles of ground penetrating radar. Ground penetrating radar: Theory and applications / 1st edn. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. P. 1—40.
40. *Kasal Bohumil, Tannert Thomas*. In situ assessment of structural timber // *Springer Science & Business Media*. 2011. P. 7. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0560-9>
41. *Devaru Dayakar, Halabe Udaya B., Gopalakrishnan B., Agrawal Sachin, Grushecky Shawn*. Algorithm for detecting defects in wooden logs using ground penetrating radar // *Intelligent Systems in Design and Manufacturing*. 2005. V. 5999. P. 110—121. <https://doi.org/10.1117/12.630835>
42. *Fujii Yoshihisa, Fujiwara Yuko, Yanase Yoshiyuki, Mori Takuro, Yoshimura Tsuyoshi, Nakajima Masao, Tsusumi Hiroki, Mori Mitsunori, Kurisaki Hiroshi*. Development of radar apparatus for scanning of wooden-wall to evaluate inner structure and bio-degradation non-destructively // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 289—294. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.289>
43. *Butnor J.R., Pruyne M.L., Shaw D.C., Harmon M.E., Mucciardi A.N., Ryan M.G.* Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges // *Forest pathology*. 2009. V. 39. P. 309—322. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00590.x>

44. *Rodríguez Abad I., Martínez-Sala R., Capuz Lladró R., Díez Barra R., García-García F.* Assessment of the variation of the moisture content in the pinus pinaster ait using the non destructive GPR technique // *Materiales de Construcción*. 2011. V. 61. No. 301. P. 143—156. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.49608>
45. *Lualdi Maurizio, Zanzi Luigi, Binda Luigia.* Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations / *Proceedings, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 2003, Berlin, Germany.
46. *Núñez-Nieto X., Solla M., Novo A., Lorenzo H.* Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling // *Construction and Building materials*. 2014. V. 71. P. 551—560. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.083>
47. *Muller W.* Timber girder inspection using ground penetrating radar // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2003. V. 45. No. 12. P. 809—812.
48. *Pérez Gracia V., Santos-Assunção S., Caselles O., Clapés J., Canas J.A.* Study of wood beams in buildings with ground penetrating radar / *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2014.
49. *Pérez Gracia V., Caselles O., Clapés J., Santos-Assunção S.* GPR building inspection: Examples of building structures assessed with ground penetrating radar / *Proceedings of 9th international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR)*. IEEE, 2017.
50. *Beall F.C.* Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties // *Wood Science and Technology*. 2002. V. 36. P. 197—212. <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0138-4>
51. *Marcantonio Vera, Monarca Danilo, Colantoni Andrea, Cecchini Massimo.* Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 120. P. 32—42. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.10.012>
52. *Lourenço Paulo B., Feio Artur O., Machado José S.* Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood // *Construction and Building Materials*. 2007. V. 21. No. 8. P. 1617—1627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.011>
53. *Xuechun Yang.* Testing theories and experiments of log inner decay based on stress-wave technology. PhD dissertation, Northeast Forestry University, 2004.
54. *Bucur Voichita, Böhnke Isabelle.* Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood // *Ultrasonics*. 1994. V. 32. No. 5. P. 385—390.
55. *Brancheriau L., Ghodrati A., Gallet P., Thaunay P., Lasaygues P.* Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees (*Picea abies*) // *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. V. 353. P. 1—13. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/353/1/012007>
56. *Mantilla Carrasco Edgar Vladimiro, Rocha Teixeira Amanda.* Methodology for inspection of wood pathologie using ultrasonic pulses // *Cerne*. 2012. V. 18. P. 479—486.
57. *Tallavo Fernando, Cascante Giovanni, Pandey Mahesh D.* A novel methodology for condition assessment of wood poles using ultrasonic testing // *NDT&E International*. 2012. V. 52. P. 149—156. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.08.002>
58. *Yang Zhang, Kaveng Yuen, Mousavi Mohsen, Gandomi Amir H.* Timber damage identification using dynamic broad network and ultrasonic signals // *Engineering Structures*. 2022. V. 263. P. 1—11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114418>
59. *Mousavi Mohsen, Taskhiri Mohammad Sadegh, Holloway Damien, Olivier J.C., Turner Paul.* Feature extraction of wood-hole defects using empirical mode decomposition of ultrasonic signals // *NDT and E International*. 2020. V. 114. P. 1—10. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102282>
60. *Hasníková Hana, Kuklík Petr.* Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure // *Wood research*. 2014. V. 59. No. 3. P. 411—420.
61. *Reinprecht Ladislav, Šupina Pavol.* Comparative evaluation of inspection techniques for impregnated wood utility poles: Ultrasonic, drill-resistive, and CT-scanning assessments // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015. V. 73. P. 741—751. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0943-8>
62. *Morales Conde M.J., Rodríguez Liñán C., de Hita P. Rubio.* Use of ultrasound as a nondestructive evaluation technique for sustainable interventions on wooden structures // *Building and environment*. 2014. V. 82. P. 247—257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.022>
63. *Verbist Maxime, Matos Filipe T., Branco Jorge M.* Structural and health assessment of historic timber roofs from the Convent of Christ in Tomar // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2019. V. 9. P. 491—511. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00347-6>
64. *Nowak Tomasz, Karolak Anna, Sobótka Maciej, Wyjadłowski Marek.* Assessment of the condition of Wharf timber sheet wall material by means of selected non-destructive methods // *Materials*. 2019. V. 12. P. 1532—1554. <https://doi.org/10.3390/ma12091532>
65. *Jelle Bjørn Petter, Hovde Per Jostein.* Fourier transform infrared radiation spectroscopy applied for wood rot decay and mould fungi growth detection // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2012. V. 19. P. 1—6. <https://doi.org/10.1155/2012/969360>
66. *Schwanninger Manfred, Rodrigues José Carlos, Fackler Karin.* A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components // *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2011. V. 19. P. 287—308.

67. Sandak Anna, Ferrari Silvia, Sandak Jakub, Allegratti Ottaviano, Terziev Nasko, Riggio Mariapaola. Monitoring of wood decay by near infrared spectroscopy // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 802—809. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.802>
68. Sandak Anna, Riggio Mariapaola, Sandak Jakub. Non destructive characterization of wooden members using near infrared spectroscopy // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 778. P. 328—334. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.328>
69. Sandak Anna, Sandak Jakub, Riggio Mariapaola. Assessment of wood structural members degradation by means of infrared spectroscopy: an overview // *Structural Control and Health Monitoring*. 2016. V. 23. P. 396—408. <https://doi.org/10.1002/stc.1777>
70. Dogu Dilek, Yilgor Nural, Mantanis George, Tuncer Fatma Digidem. Structural evaluation of a timber construction element originating from the great metéoron monastery in Greece // *BioResources*. 2017. V. 12. No. 2. P. 2433—2451.
71. Jicheng Zhang, Yongshui Huang, Yu Zheng. A feasibility study on timber damage detection using piezoceramic-transducer-enabled active sensing // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 5. P. 1—11.
72. Fang Han, Jinwei Jiang, Kai Xu, Ning Wang. Damage detection of common timber connections using piezoceramic transducers and active sensing // *Sensors*. 2019. V. 19. P. 1—12. <https://doi.org/10.3390/s19112486>
73. Haibei Xiong, Lin Chen, Cheng Yuan, Qingzhao Kong. A novel piezoceramic-based sensing technology combined with visual domain networks for timber damage quantification // *Frontiers in Materials*. 2021. V. 8. P. 1—12. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.688594>
-

Отчет о проведении XXXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

г. Екатеринбург, Международный выставочный центр «Екатеринбург-Экспо»,
13—14 марта 2024 г.

XXXV Уральская конференция с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» была успешно проведена 13—14 марта 2024 г. Во второй день конференции 14 марта была организована молодежная секция, участниками которой стали студенты профильных кафедр, аспиранты, молодые специалисты и ученые (возраст участников — до 35 лет включительно).

Организаторами и партнерами Уральской конференции выступили Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (ИФМ УрО РАН), Институт машиноведения Уральского отделения РАН (ИМАШ УрО РАН), Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), Уральское отделение РАН, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, а также Общероссийская общественная организация малого и среднего предпринимательства «ОПОРА РОССИИ». Информационную поддержку обеспечили журналы «Дефектоскопия/Russian Journal of Nondestructive Testing», «Сварка и диагностика», «Территория NDT». Председателем оргкомитета конференции являлся профессор Смородинский Я.Г. (ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург).

Научная программа конференции включала следующие разделы:

1. Физические основы неразрушающего контроля и диагностики.
2. Методы и средства измерения физических полей. Новые средства и системы контроля.
3. Контроль труб и диагностика трубопроводов.
4. Контроль сварных соединений.
5. Методы и средства контроля напряженно-деформированного состояния изделий и объектов.
6. Опыт практического применения физических методов и средств контроля.
7. Стандартизация и метрологическое обеспечение средств НК.
8. Квалификация и подготовка персонала в области НК.

В конференции приняли участие ведущие специалисты в области неразрушающего контроля, технической диагностики и метрологии из 11 городов России и Белоруссии: Екатеринбурга, Москвы, Санкт-Петербурга, Минска, Ижевска, Новосибирска, Тюмени, Томска, Казани, Тамбова и Луганска.

Заседания основной и молодежной секций проходили очно 13 и 14 марта соответственно. Стендовые доклады были представлены в виде on-line видео-докладов, размещенных на стендах на сайте конференции conf.defectoskopiya.ru. Общее количество участников, принявших участие в конференции, превысило 100 человек. На сайте конференции, на котором была размещена вся организационная информация и сборник тезисов докладов всех участников, а также проходила секция стендовых докладов, зарегистрировано более 600 обращений.

В пленарном заседании первого дня конференции с приглашенными докладами выступили:

Сясько Владимир Александрович (президент РОНКТД, профессор, д.т.н.), «Метрологическое обеспечение и стандартизация передовых средств НК, МС и ТД на основе использования интернет-технологий»;

Вавилов Владимир Платонович (Томский политехнический университет, профессор, д.т.н.), «Теория и практика теплового неразрушающего контроля в Томском политехническом университете»;

Вопилкин Алексей Харитонович (ООО «НПЦ «ЭХО+», профессор, д.т.н.), «Ультразвуковая дефектометрия: от спектрального образа до когерентного изображения портрета дефектов».

После выступлений приглашенных докладчиков были заслушаны 17 устных докладов. Открывали секцию представители Ижевского государственного технического университета (г. Ижевск) Муравьев В.В. и Муравьева О.В. Они рассказали об оценке неоднородности остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штангового насоса, а также о вопросах распространения акустических волн в тонких пористых материалах на примере листов терморасширенного графита.

Следом поделились опытом использования поверхностных ультразвуковых волн для оценки состояния головки рельсов в пути, результатами анализа чувствительности вихретокового контроля углепластика накладным преобразователем и рассказали о возможностях контроля соединений с

натягом средствами тензометрии при локальном тепловом нагружении представители Сибирского государственного университета путей сообщения (г. Новосибирск) Бобров А.Л. и Бехер С.А.

Далее выступили научные сотрудники Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург) Сташков А.Н., Никитин А.В., Черных С.Е., Михайлов Л.В. В своих докладах они рассказали о возможностях оценки механических напряжений в ферромагнитных материалах по магнитным измерениям, инфракрасной термографии корундовых керамических пластин, восстановлении формы дефекта ферромагнитной пластины путем решения обратной задачи магнитостатики и серии прямых задач, а также об оптимизации намагничивающей системы для дефектоскопа бурильных труб.

Представитель МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва) Крысько Н.В. доложил о сочетании данных различных методов неразрушающего контроля сварных соединений и основного металла магистральных трубопроводов, а представитель Казанского государственного энергетического университета (г. Казань) Гарнышова Е.В. и Измайлова Е.В. — о неразрушающем способе контроля поверхностей теплообмена и трубопроводных систем, а также об информационно-измерительной системе для контроля тепловых сетей методом акустической эмиссии.

Сотрудник ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» (г. Екатеринбург) Трякина Н.Ю. поделилась результатами анализа механизма образования дефектов газопровода в результате воздействия дугового разряда на стенку трубы, а представитель НИУ «МЭИ» (г. Москва) Барат В.А. — особенностями выявления структурной неоднородности в комбинированных сварных соединениях сталей методом акустической эмиссии.

Представитель Томского политехнического университета (г. Томск) Шпильной В.Ю. осветил некоторые аспекты применения методов конъюнктивного и дизъюнктивного синтеза для анализа графических изображений, полученных одним или несколькими методами неразрушающего контроля.

Следом были заслушаны доклады специалистов ООО «Константа» и Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург) Голева А.С. и Сясько М.В. Они рассказали об исследовании методов анализа исходных данных при измерении механических свойств материалов методом динамического инструментального индентирования, а также о технологиях автоматической градуировки и поверки двухпараметровых вихретоковых толщиномеров диэлектрических покрытий.

Завершился первый день конференции проведением круглого стола, посвященного теме нейтронных исследований (модератор — Гоголинский К.В., НИЦ «Курчатовский институт»). В рамках круглого стола были заслушаны доклады Губкина А.Ф. (ИФМ УрО РАН) об использовании методов нейтронографии в области неразрушающего контроля и за ее пределами, а также Карпова И.Д. и Мурашева М.М. о нейтронных исследованиях остаточных напряжений на дифрактометре «СТРЕСС» и об исследованиях металлических изделий традиционных и аддитивных производств методами нейтронной визуализации.

Во второй день конференции 14 марта прошла молодежная секция, на которой было заслушано 14 устных докладов аспирантов, молодых специалистов и ученых. Первым выступил представитель МГТУ имени Н.Э. Баумана (г. Москва) Шевченко А.В. В его докладе он рассказал о методах машинного обучения в анализе данных ультразвукового контроля в виде изображений. Далее выступил сотрудник Томского политехнического университета (г. Томск) Чулков А.О. с докладом, посвященным тепловой дефектоскопии при непрерывном линейном сканировании, а представитель Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов) Захаров Ю.А. вопрос влияния толщины расслоений в сотовых конструкциях на температурное поле при активной термографии. Следом директор НЧОУ ДПО «Уральский центр профессионального обучения» (г. Екатеринбург) Ревина О.А. сделала обзорный доклад, посвященный возможностям дополнительного образования специалистов по неразрушающему контролю в Уральском регионе, а представитель ВНИИМ им. Менделеева (г. Санкт-Петербург) Антонов Д.И. рассказал об обеспечении достоверности автоматизированного импульсного электроискрового контроля покрытий труб в поточном производстве.

В завершении второго дня конференции выступила большая группа исследователей из ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург). Перов В.Н. рассказал о магнитоакустических параметрах оценки анизотропии сплава никель—железо, а его коллега Кочнев А.В. — о мониторинге изменения относительной магнитной проницаемости при циклических испытаниях на изгиб образцов из аустенитной хромоникелевой стали. Бояринцев А.И. представил сравнительные характеристики люминоесцентных детекторных материалов на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-d}$ для нейтронной дозиметрии. Матосян А.М. представил доклад, посвященный исследованию магнитных свойств термообработанной и

пластически деформированной стали 38ХС. Ксенофонов Д.Г. доложил об определении факторов, влияющих на воспроизводимость результатов измерений в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание», а Гордеев Н.В. рассказал о магнитных свойствах и структуре стали 09Г2С после циклических испытаний на изгиб. Бызов А.В., Мызнов К.Е. и Батуева А.В. описали особенности процесса цементации сталей при изготовлении градуировочных образцов для вихретокового структуроскопа, рассказали об изменении магнитных характеристик труб при гидро- и пневмоиспытаниях магистральных трубопроводов, а также подняли тему оптимизация мест расположения датчиков поля и потока в приставных преобразователях магнитных структуроскопов.

На протяжении двух дней работы конференции, одновременно с устными докладами, проходила стендовая сессия. Стендовые доклады были представлены в виде видеопрезентаций (предварительно записанных докладов), размещенных на сайте конференции. Общее количество представленных стендовых докладов составило 22. Участники конференции имели возможность задать докладчикам вопросы и получить на них ответы в письменной форме. В докладах прозвучали результаты исследований практически по всем видам неразрушающего контроля.

Наряду с ведущими специалистами в области неразрушающего контроля в конференции принимали участие аспиранты российских ВУЗов и молодые специалисты из академических институтов. Слушателями конференции были также и представители машиностроительных заводов России.

На заключительном заседании участники конференции и члены оргкомитета отметили, что все представленные доклады были посвящены проблемам и вызовам сегодняшнего дня в области неразрушающего контроля и технической диагностики. Докладчики и слушатели, в свою очередь, подчеркнули высокий уровень организации и проведения конференции.

Ознакомиться подробнее с научной программой, тезисами и докладами XXXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» можно на сайте конференции»: conf.defectoskopiya.ru.

Оргкомитет