

**ДЕФЕКТΟΣКОПИЯ**

Журнал ежемесячный  
 Основан в феврале 1965 года  
 Екатеринбург

№ 2  
 2021

**СОДЕРЖАНИЕ****Акустические методы**

- А.А. Беспалько, А.П. Суржиков, Д.Д. Данн, Г.Е. Уцын, М.В. Петров, Е.К. Помишин.** Моделирование акустико-электрического неразрушающего контроля дефектности диэлектрических материалов ..... 3
- Иржи Брозовский, Ленка Боднарова.** Влияние направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей при испытании динасовых кирпичей ультразвуковым импульсным методом ..... 15
- Р.Р. Исхужин, В.Н. Борисов, В.Г. Агавин, А.А. Узких, К.К. Хафизова.** Ультразвуковой контроль сварного шва тонкостенной титановой оболочки с индикатором непровара ..... 24
- М.В. Бурков, А.В. Еремин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, С.В. Панин.** Диагностика ударных повреждений монолитных и сотовых углепластиков с помощью ультразвуковых волн Лэмба ..... 33

**Радиационные методы**

- Н.А. Михайлова, А.А. Демидов, В.Ю. Чергищев, Н.В. Осияненко.** Определение гранулярности радиографических пленок в соответствии с ISO 11699-1 ..... 44

**Общие вопросы дефектоскопии**

- Фатемех Мирджалили, Алиреза Навабазам, Нина Саманизаде.** Получение наночастиц гидроксипатита из естественных зубов ..... 51
- В.М. Ушаков, С.Г. Евтушенко.** Неразрушающий контроль в нормах безопасности МАГАТЭ и России при управлении старением конструкций, систем и элементов атомных электростанций ..... 61

**Электромагнитные методы**

- Ли Кайюй, Цю Пэнчэн, Ван Пин, Лу Цзысян, Чжан Чжэнда.** Методика на основе импульсных вихревых токов для определения механических свойств ферромагнитных материалов ..... 67



## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. А.А. Беспалько<sup>1,\*</sup>, А.П. Суржиков<sup>1,\*\*</sup>, Д.Д. Данн<sup>1,\*\*\*</sup>, Г.Е. Уцын<sup>2,\*\*\*\*</sup>, М.В. Петров<sup>1</sup>, Е.К. Помишин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 40

E-mail: \*besko48@tpu.ru; \*\*Surzhikov@tpu.ru; \*\*\*DDDann@tpu.ru; \*\*\*\*uge23@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.09.2020; после переработки 03.12.2020

Принята к публикации 11.12.2020

Показано влияние дефектности твердотельных диэлектрических образцов на параметры электромагнитного отклика при детерминированном акустическом воздействии на объект контроля. Приведены закономерности изменения параметров электромагнитных сигналов при вариациях и увеличении вектора напряженности электрического поля по отношению к контакту материалов образца и дефекта. Показано, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с акустическим импедансом и проводимостью контактирующей среды и дефекта. Установлено соответствие амплитуд электромагнитных откликов на определенное при математическом моделировании распределение во времени и пространстве механических напряжений, возникающих в дефектной системе при распространении акустического импульса. Приведены данные изменения параметров электромагнитных сигналов при увеличении размеров модельных дефектов в однотипных образцах.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, диэлектрики, акустическое воздействие, электромагнитная эмиссия, электрическое поле, моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308221020019

### ВВЕДЕНИЕ

Для обнаружения дефектности твердотельных материалов в настоящее время используют различные, достаточно хорошо разработанные, неразрушающие методы контроля. К ним относятся: акустические импульсные и акустико-эмиссионные [1, 2]; электрические и электромагнитные [3, 4]; магнитные [5, 6]; рентгеновские [7, 8] и другие [9]. Для диэлектрических материалов и структур такое разнообразие неразрушающих методов эффективно использовать можно не везде. Это обусловлено высокой проникаемостью рентгеновского излучения и его опасным влиянием на здоровье оператора, отсутствием магнитных свойств в подавляющем большинстве диэлектриков, близкими величинами акустического импеданса при ультразвуковом зондировании.

Раннее выявление дефектности диэлектрических структур имеет большое значение для контроля их механической и электрической прочности. В целях безопасности необходимо периодически проводить неразрушающий контроль изоляторов, конструкционных органических диэлектриков, бетонных конструкций и других диэлектрических структур и изделий. В связи с этим целесообразно применять комплексные методы неразрушающего контроля. Таким комплексным методом может являться контактное акустическое зондирование предмета контроля и бесконтактная регистрация электромагнитного отклика на такое воздействие с последующим амплитудно-частотным анализом электромагнитного сигнала (ЭМС). Электромагнитный сигнал возникает при колебании двойных электрических слоев, возникающих на бортах трещин и полостей, при поляризации контактов материалов, слоев и других дефектов [9—18]. Математическим моделированием и лабораторными исследованиями показано, что такие преобразования являются одним из основных способов возбуждения ЭМС в гетерогенных диэлектрических материалах. Акустические импульсы при своем распространении взаимодействуют с имеющимися и вновь возникшими дефектами. В результате такого воздействия заряды или двойные электрические слои на границах раздела сред, включений или блоков, на бортах трещин или на других дефектах структуры диэлектрических материалов излучают электромагнитные сигналы.

В работе [19] в теоретических исследованиях приведено физическое обоснование электромагнитного метода контроля диэлектрических гетерогенных материалов. Указывается, что в случае, когда нормированным однократным ударом производится возмущение механических колебаний, это должно способствовать появлению тока смещения. В свою очередь, ток смещения будет зависеть от скоростей изменения объемной плотности элементарных источников и дипольного момента.

Величина поверхностных зарядов, их пространственная структура и амплитуда колебаний определяется для исследуемых образцов физико-химическими свойствами их внутренних областей.

В экспериментальных работах [18—21] также указывается, что прохождение акустических волн вызывает генерацию ЭМС, которая связана с колебаниями двойных электрических слоев. Выявлено, что в результате акустико-электрических преобразований происходит передача энергии акустических сигналов в энергию ЭМС. При этом амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов и зарядового состояния имеющихся дефектов в виде включений.

Таким образом, при внешнем детерминированном акустическом воздействии можно успешно осуществлять тестирование дефектности в виде твердотельных включений или пустот в диэлектрические материалы по параметрам электромагнитных откликов на это возмущение. Было проведено численное и экспериментальное моделирование такого тестирования. В настоящей работе рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований изменения параметров ЭМС и их спектров при импульсном детерминированном акустическом возбуждении модельных образцов с дефектами в виде твердотельных включений.

## МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выявления закономерностей влияния размеров и электрических свойств дефектов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном детерминированном акустическом возбуждении изготавливали образцы из цементно-песчаной смеси с размещением в них твердотельных включений в виде параллелепипеда. На рис. 1а схематично приведен вид такого образца с размерами  $(50 \times 50 \times 95) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ . Боковая поверхность  $(50 \times 95) \times 10^{-6} \text{ м}^2$  размечалась на 15 площадок для измерения ЭМС.

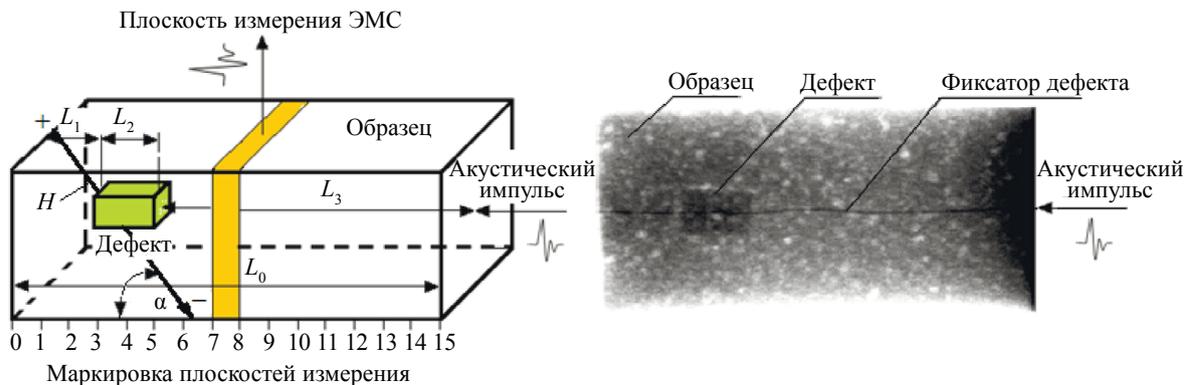


Рис. 1. Представление модельного образца из цементно-песчаной смеси с дефектом в нем при импульсном акустическом возбуждении (а) и рентгенограмма реального образца с дефектом из фторопласта (б).

На рисунке отмечены длина всего образца  $L_0$ , расстояния от противоположной удару поверхности до дефекта  $L_1$ , продольный размер дефекта  $L_2$  и расстояние от дефекта до точки удара  $L_3$ . На рис. 1б показано реальное расположение дефектов в образце, полученное с помощью цифровой рентгенографии с использованием детектора PerkinElmer XRD 0822 [22]. Для исследования влияния дефектов, в виде включений из твердотельных материалов с разным акустическим импедансом, на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии были изготовлены образцы с размещением в них дефектов определенной формы. Исследования проводились с различными твердотельными дефектами, механические и электрические характеристики которых размещены ниже в табл. 1. Использовались проводящие, полупроводящие и диэлектрические материалы с разным акустическим импедансом.

Как видно из таблицы, наряду с диэлектриками в качестве дефектов использовались металлы, обладающие высокой проводимостью, которая может обуславливать токи утечки. В результате поляризация и образование двойных электрических слоев на контактах материалов снизится, что приведет к существенному снижению амплитуды ЭМС при акустико-электрических преобразо-

Таблица 1

**Акустические и электрические параметры используемых материалов**

№ п.п.	Материал дефекта	Удельная плотность материала $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольного звука $c_p$ , м/с	Акустический импеданс $z \cdot 10^6$ , кг/с·м <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом·м
1	Цементно-песчаная смесь (ЦПС) (влажность –1,5 %)	1900	2765	5,25	$4,0 \cdot 10^6$
2	Оргстекло (PMMA)	1200	2700	3,24	$10^{17} - 10^{18}$
3	Фторопласт (PTFE)	2200	1340	2,95	$10^{15} - 10^{17}$
4	Эбонит	1150	2400	2,76	$10^{12} - 10^{14}$
5	Стекло, флинт	2500	4560	11,4	$10^9 - 10^{12}$
6	Магнетитовая руда (75 %)	4150	5870	24,34	$10^{-3} - 10^2$
7	Дюралюминий, D16T	2700	6400	17,28	$2,8 \cdot 10^{-8}$
8	Латунь, L59	8500	4600	39,10	$6,5 \cdot 10^{-8}$
9	Сталь углеродистая	7800	5890	45,94	$1,3 \cdot 10^{-7}$

ваниях. Но если дефекты из проводящих материалов поместить в изолирующий материал, каким является затвердевшая цементно-песчаная смесь с удельным электрическим сопротивлением  $10^4 - 10^5$  Ом·м, то токи утечки будут на уровне  $10^{-5} - 10^{-6}$  А при приложенном к образцу напряжении 100 В. Более того, в модельных экспериментах удобно использовать проводники, потому что в них имеются свободные электроны, которые под действием электрического поля смещаются в соответствие с направлением его напряженности.

В настоящей работе приведены данные только с включениями в виде параллелепипеда из фторопласта и руды с 75 % содержанием магнетита. Кроме того, приведены параметры спектров электромагнитных сигналов при неизменных размерах образца, но с другими параметрами дефектов равные  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup> из фторопласта и магнетитовой руды. Размеры дефекта выбирались таким образом, чтобы возбуждающий акустический импульс взаимодействовал с ним и имел достаточно низкий декремент затухания. Для дефекта с меньшими размерами необходим и более короткий акустический импульс. При изготовлении образцов соотношение песка и цемента составляло две весовые части к одной, соответственно, а водно-цементное соотношение составляло 0,7. Песок использовали с диаметром песчинок  $(0,25 - 0,8) \times 10^{-3}$  м. Положение включения в образце контролировалось с помощью цифровой рентгенографии, которое показано на рис. 1б. Электрическое сопротивление  $R$  между электродами измерителя иммитанса LCR — 819 без дефекта на частоте 1,0 кГц составило  $9,6 \times 10^7$  Ом, на частоте 10 кГц —  $3,6 \times 10^7$  Ом, на частоте 100 кГц —  $9,3 \times 10^6$  Ом. Измерения сопротивления проводили через середину торцевой площадки образца  $(50 \times 50) \times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>. Измерения в такой же геометрии электрического сопротивления образца из цементно-песчаной смеси с дефектом в виде включения из фторопласта  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup> показали, что на частоте 1,0 кГц  $R$  равнялось  $9,3 \times 10^7$  Ом, на частоте 10 кГц —  $3,6 \times 10^7$  Ом, на частоте 100 кГц —  $1,1 \times 10^7$  Ом. Погрешность измерения сопротивления составляла 0,05 %.

На рис. 2 приведена блок-схема стенда для возбуждения акустических импульсов в образцах и измерения параметров электромагнитных откликов на такое воздействие.

Акустическое импульсное возбуждение проводилось через торцевую поверхность образцов ударом шарика с помощью специального пружинного устройство [23]. Акустический импульс имел форму, близкую к колокообразной, а длительность по основанию составляла  $50 \times 10^{-6}$  с, что соответствует основной гармонике 20 кГц. Этот импульс уверенно опознавал минимальную используемую в исследованиях модельную неоднородность  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^9$  м<sup>3</sup>. Если осуществить возбуждение модельного образца акустическим импульсом длительностью  $10^{-6}$  с, то можно определить минимальный размер дефекта при таком воздействии. Так при продольной скорости звука 3000 м/с размер контролируемого дефекта  $L = 1,5 \times 10^{-3}$  м. Такая величина будет существенно ниже используемых дефектов в цементно-песчаной смеси и близок к размеру песчинок.

Энергию вводимого в образец акустического импульсного возбуждения определяли по скорости налета и отскока шарика. Скорости вычисляли по времени пролета шарика через две оптические пары, установленные на известном расстоянии в ограничительной трубке с внутренним

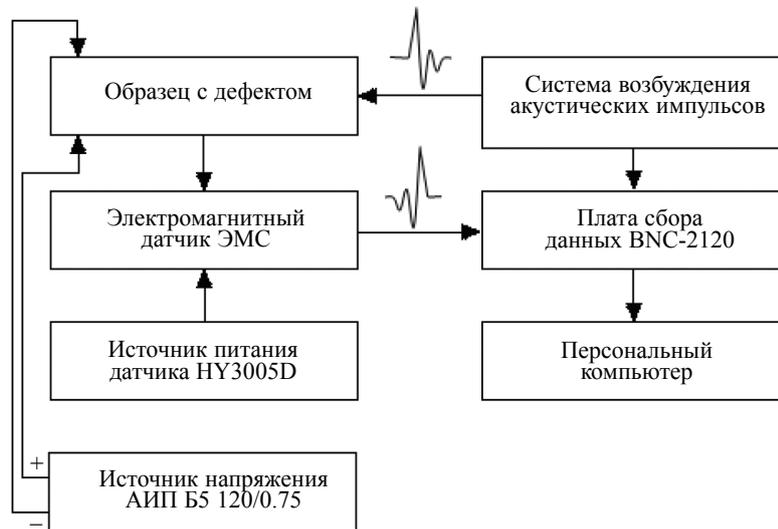


Рис. 2. Блок-схема стенда для детерминированного акустического возбуждения, регистрации и обработки электромагнитных сигналов.

диаметром  $8 \times 10^{-3}$  м. На стенде можно определять продольную скорость звука и декремент затухания возбуждающего акустического импульса. Удар шариком возможно заменять системой пьезоэлектрического возбуждения посредством широкополосного апериодического пьезоэлектрического излучателя и импульсного генератора. Генератор выдает на выходе дискретно-импульсное напряжение 100, 200, 400, 600 и 800 В с длительностью  $(1,0; 5,0; 10,0; 50,0; 100,0) \times 10^{-6}$  с [18].

Кроме того, на стенде имелась возможность размещать образцы в слабых электрических полях с напряженностью  $H$  от нуля до 2400 В/м. Полосчатый емкостной приемник ЭМС размером  $(5 \times 30) \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup> вместе с усилителем перемещали последовательно вдоль образца по измерительным площадкам (см. рис. 1а). При измерении параметров ЭМС в электрическом поле точечные электроды, создающие электрическое поле, сдвигали параллельно электромагнитному датчику. Конструкция точечных электродов позволяла менять угол наклона напряженности электрического поля по отношению к плоскости контакта цементно-песчаной смеси образца и материала дефекта. Для учета энергии введенного акустического импульса и регистрируемых параметров ЭМС использовали специализированную программу, обеспечивающую вывод на дисплей компьютера и запоминание амплитудно-частотных спектров электромагнитных сигналов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было выполнено численное моделирование и исследование, с использованием аппарата механики сплошных сред процессов распространения упругих волн в диэлектрическом образце при импульсном воздействии.

Вычислительный алгоритм для определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) модельного образца при импульсном акустическом возбуждении построен на соотношениях механики деформированного тела с использованием конечно-разностных соотношений.

В общем случае система уравнений, описывающая поведение деформируемого твердого тела в пространственном случае, включает в себя уравнения движения:

$$\rho U'_i = \rho G_i + \sigma_{ij,j}; \quad (1)$$

уравнения неразрывности:

$$V' / V - U_{i,j} = 0; \quad (2)$$

соотношения для компонент тензора скоростей полных деформаций:

$$\varepsilon'_{i,j} = \frac{1}{2}(U_{i,j} + U_{j,i}); \quad (3)$$

определяющие соотношения, задающие связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}); \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta x_{ij}}{x_{ij}}. \quad (5)$$

В выражениях (1)—(5):  $x_{ij}$  — пространственные координаты;  $U_i = x'_i$  — компоненты вектора скорости;  $V = \rho_0 / \rho$  — удельный относительный объем материала;  $\rho_0, \rho$  — начальная и текущая плотности;  $G_i$  — компоненты вектора массовых сил;  $\varepsilon_{ij}$  — компоненты тензора полной деформации.

В формулах штрих над символом означает производную по времени, запятая после индекса — производную по соответствующей координате, по повторяющимся индексам производится суммирование. Численная реализация проводилась с использованием нецентральной разностной схемы второго порядка точности относительно шагов по пространству и времени [24]. Корректность численных результатов оценивалась как по внутренней сходимости результатов при изменении параметров конечно-разностной сетки и шагов интегрирования по времени, так и проведенными авторами расчетами модельных задач [25]. В трехмерном случае по пространственным переменным относительно просто построить нецентральную схему второго порядка для системы гиперболических уравнений, основанную на двух шаговой формуле для каждого из уравнений вида:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial X} + H. \quad (6)$$

Соответствующая разностная схема выглядит следующим образом:

$$U_{n+\alpha_1}^{(1)} = U_n + \alpha_1 \Delta t U'_n; \quad (7)$$

$$U_{n+1} = U_n + w_0 \Delta t U'_n + w_1 \Delta t U_{n+\alpha_1}^{(1)}. \quad (8)$$

Верхний индекс обозначает величину, вычисленную в данный момент времени, указанный нижним индексом. В результате получим:

$$U_i^{(1)} = U_i^n - \alpha_1 \Delta t \left[ (1 - \varepsilon \nabla) \left( \frac{\Delta F_i^n}{\Delta X} \right) + H_i^n \right]; \quad (9)$$

$$U_i^{n+1} = U_i^n - w_0 \Delta t \left[ (1 + k \nabla) \left( \frac{\Delta F_i^n}{\Delta X} \right) + H_i^n \right] - w_1 \Delta t \left[ (1 - \varepsilon \Delta) \left( \frac{\Delta F_i^{(1)}}{\Delta X} \right) + H_i^{(1)} \right], \quad (10)$$

где верхний индекс обозначает момент времени, а нижний — пространственную координату. Предиктор  $U_i^{(1)}$  вычисляется в момент  $(n + \alpha_1) \Delta t$ . В этих соотношениях используются обозначения:  $\Delta t$  — шаг по времени и  $\Delta X$  — шаг по пространству,  $\nabla$  — оператор Гамильтона.

Расчетная область разбивается на конечные элементы сеткой. Сетка регулярная, то есть используются равные по размеру конечные прямоугольные элементы. Используемая схема типа крест является нецентральной схемой, так как значения функций вычисляются в узлах сетки. К преимуществу нецентральных схем относят и отсутствие полуцелых индексов, что делает более простой реализацию граничных условий. Схема имеет второй порядок аппроксимации по пространственным и временным переменным. В реализованной схеме используем на свободных границах условия в перемещениях, а на границах, реализующих опорные реакции, — в смешанном виде, когда задаются и перемещения, и напряжения.

Граничные условия соответствуют лабораторному эксперименту. На боковой границе задавалось нулевое смещение, так как образец зажимался в струбцине. Большие грани свободны, поэтому напряжения на границе равны нулю. На боковой границе задавалась нагрузка в виде нарастающей и затем убывающей функции, имеющая зависимость от времени и пространственных координат. Импульс возбуждения соответствовал экспериментальному акустическому возбуждению по форме, амплитуде и длительности. Длительность приложенной нагрузки в расчетах составляла величину  $t_0 = 50 \times 10^{-6}$  с, что соответствует эксперименту.

Результаты решения механической задачи визуализировали в виде трехмерных областей распределения продольных смещений для детального анализа волнового процесса, который необходим на данной стадии работы. Для сравнения с экспериментальными измерениями проводили расчет распространения напряжений акустического импульса, возбуждаемого ударом шарика в структуре из цементно-песчаной смеси с диэлектрическим дефектом в виде фторопласта и 75 %-й магнетитовой руды размером  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ ,  $(20 \times 20 \times 30) \times 10^{-9} \text{ м}^3$  и  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ . Удельное акустическое сопротивление цементно-песчаной смеси составлял  $z_{\text{цпс}} = (\rho c)_{\text{цпс}} = 5,25 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , где  $\rho_{\text{цпс}} = 1900 \text{ кг/м}^3$  — плотность смеси, а  $c_{\text{цпс}} = 2765 \text{ м/с}$  — скорость продольного звука в нем. При этом удельное акустическое сопротивление фторопластового дефекта отличался почти в 2 раза и составлял  $z_{\text{ф}} = (\rho c)_{\text{ф}} = 2,95 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , где  $\rho_{\text{ф}} = 2200 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{\text{ф}} = 1340 \text{ м/с}$ . У магнетитовой руды удельное акустическое сопротивление было существенно выше  $z_{\text{мр}} = (\rho c)_{\text{мр}} = 24,34 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , где  $\rho_{\text{мр}} = 4150 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_{\text{ф}} = 5870 \text{ м/с}$ . В расчетах принималось, что прочностные свойства материала образца справочные. Импульсная нагрузка, как уже отмечалось выше, прикладывалась по центру нормально боковой грани образцов площадью  $(50,0 \times 50,0) \times 10^{-6} \text{ м}^2$ .

При расчетах использовали линейные геометрические соотношения Коши, связывающие деформации и перемещения, и линейные физические соотношения между напряжениями и деформациями. Уравнения равновесия также принимались в стандартном для плоских постановок виде.

При распространении акустического импульса по модельной системе образцов со вставкой изменялось и ее напряженно-деформированное состояние (НДС). Результаты расчетов визуализируются в виде трехмерных волновых областей, иллюстрирующих распространение упругих возмущений в модельной системе образцов с дефектом.

На рис. 3 показано распространение упругого возмущения, приложенного к модельному образцу в виде параллелепипеда из цементно-песчаной смеси размером  $(50 \times 50 \times 95) \times 10^{-9} \text{ м}^3$  с дефектом из фторопласта величиной  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ . На рисунке видно, как фронт волны огибает включение размером  $25 \times 25 \times 38 \text{ мм}$ . При этом часть возмущений отражается, а другая проходит дальше в соответствии с соотношениями акустического импеданса цементно-песчаной смеси и материала дефекта.

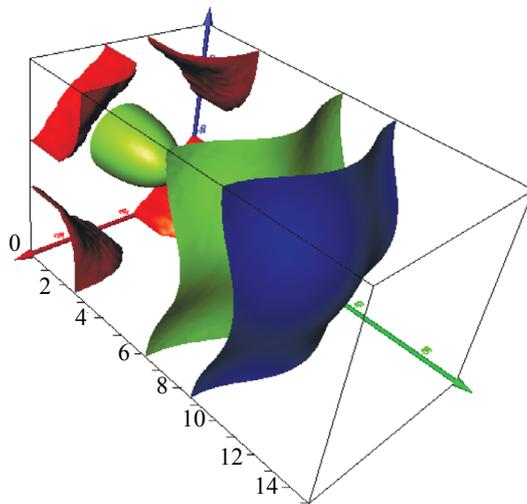


Рис. 3. Распределение изоповерхностей, демонстрирующих распределения смещений разного уровня по модельному образцу  $(50 \times 50 \times 95) \times 10^{-9} \text{ м}^3$  с дефектом из фторопласта величиной  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$  в момент времени  $25 \times 10^{-6} \text{ с}$  после начала приложения акустического импульса.

В результате возникают колебания в килогерцовой области спектра. Необходимо отметить, что частотный спектр, очевидно, связан с деформационно-прочностными характеристиками материала образца и дефекта. Волновой фронт, распространяясь в материале модельного образца, достигает области с отличающимися от основного материала упругими свойствами, частично отражается от границы. Одновременно с этим в соответствии с акустическим импедансом материалов образца и дефекта происходит частичное огибание акустической волной твердотельного включения. Известно, что в однородной среде волна распространяется сферически. В неоднородной среде волновой фронт имеет сложную форму из-за серии многократных отражений как от неоднородности, так и

от боковых стенок. Наличие в образце дефектов в виде небольших включений не отражается на волновом процессе. Если рассматривать образцы с включениями при больших длительностях приложенного импульса, то волновой процесс проходит без видимых изменений.

Были проведены расчеты для образца из цементно-песчаной смеси с включениями, характеристики которых задавалась в численном эксперименте в виде области с упругими свойствами, отличающимися от основного массива образца. В расчетах использовалась модель образца, представленная на рис. 1. Возбуждение производили точечным источником в виде удара шариком по схеме, показанной на рис. 2. Акустические возмущения имели вид сферических волн, которые приводили в движение двойные электрические слои на границах раздела сред. На рис. 4 приведены результаты расчетов изменения НДС в двумерном пространстве в образце с дефектами из фторопласта (рис. 4а) и магнетитовой руды (рис. 4б). Рассматривая результаты расчета для различных материалов включения и их размеров, разницу в параметрах НДС сложно оценить. Основные различия в волновых процессах наблюдаются на границах раздела материала. На рис. 4а и б представлены данные расчета на границе дефекта и основного материала образца.

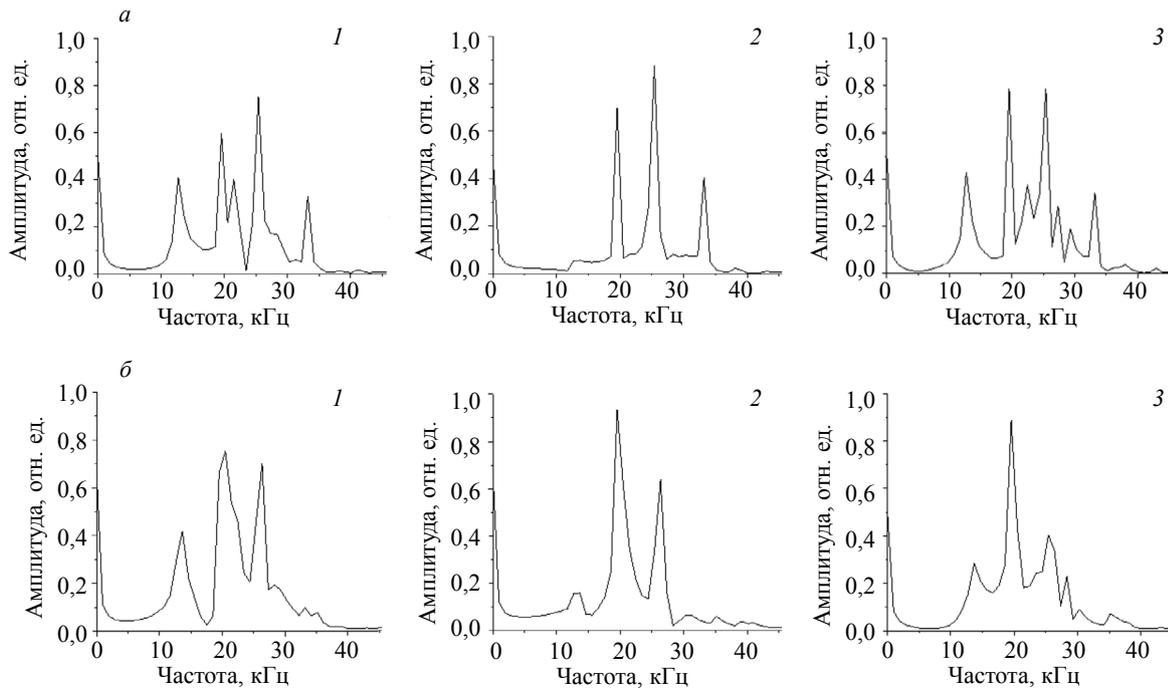


Рис. 4. Изменения спектра расчетных электромагнитных сигналов образца цементно-песчаной смеси с дефектами размером  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9} \text{ м}^3$  из фторопласта (а) и 75 % магнетитовой руды (б) в разных поперечных сечениях относительно расстоянии от поверхности, противоположной вводу акустического импульса:

1 —  $3,0 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 —  $3,0 \times 10^{-2} \text{ м}$ ; 3 —  $8,0 \times 10^{-2} \text{ м}$ .

При схожих параметрах основного материала и включения разница в волновых процессах может быть оценена только на основе расчетных данных параметров, связанных с электрическим откликом. Это становится возможным с использованием построенной математической модели, которая представлена в работе [19]. В ней показано, что изменения НДС при распространении акустического импульса согласуются с параметрами ЭМС в каждой части исследуемого образца.

Акустические импульсы при своем распространении взаимодействуют с имеющимися и вновь возникшими дефектами. В результате такого воздействия заряды или двойные электрические слои на границах раздела сред, включений или блоков, на дефектах структуры диэлектрических материалов излучают электромагнитные сигналы [26, 27]. Интенсивность излучения определяется вектором Умова—Пойнтинга [26].

Регистрация ЭМС в реальных условиях эксперимента осуществлялась с помощью емкостного датчика, который устанавливался около одной из наибольших граней образца. Для увеличения соотношения ЭМС/шум на стенде, блок-схема которого приведена на рис. 2, сначала исследовали влияние приложенного электрического поля на параметры электромагнитного отклика при им-

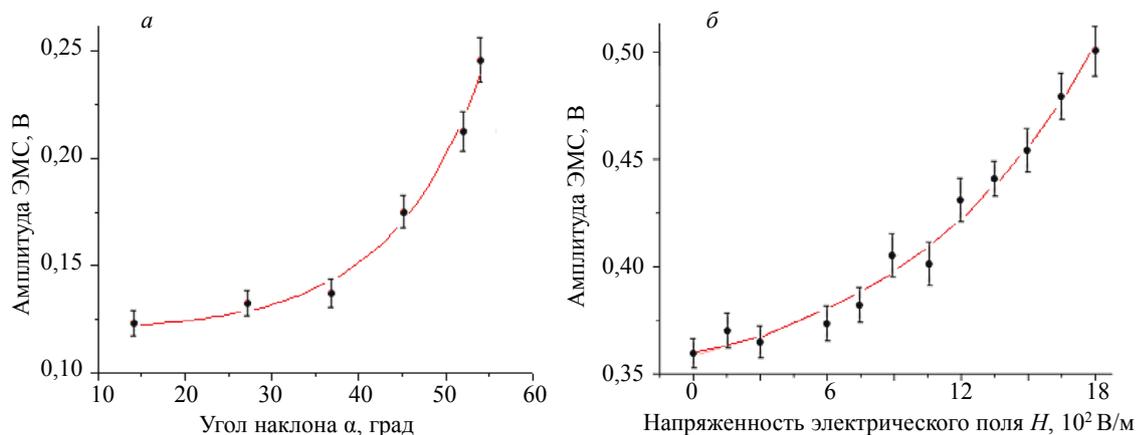


Рис. 5. Изменения амплитуды электромагнитного сигнала: от угла наклона  $\alpha$  вектора напряженности электрического поля  $H$  по отношению к поверхности контакта цементно-песчаной смеси и торцевой части дефекта из фторопласта с размерами  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9} \text{ м}^3$  (а); то же при увеличении напряженности приложенного электрического поля и постоянном  $\alpha = 45^\circ$  (б).

пульсном акустическом воздействии. С этой целью изменяли угол  $\alpha$  наклона вектора напряженности электрического поля к поверхности контакта цементно-песчаной смеси и торцевой части дефекта (см. рис. 1а), а также величину напряженности поля до  $H = 1800 \text{ В/м}$ . При направлении напряженности электрического поля перпендикулярно распространению продольных акустических импульсов амплитуда электромагнитного сигнала практически не изменялась. Максимальные изменения электромагнитного отклика наблюдались при распространении акустического импульса вдоль направления напряженности электрического поля и перпендикулярно контакту ЦПС и дефекта. Это обусловлено максимальной поляризацией в приложенном электрическом поле контакта материалов образца и дефекта. На рис. 5а показано влияние угла наклона  $\alpha$  напряженности электрического поля на амплитуду электромагнитного отклика на измерительной площадке, находящейся напротив контакта ЦПС и дефекта. Надо отметить, что при увеличении угла наклона и постоянной величине напряжения на электродах уменьшается величина  $H$  от 2400 до 1400 В/м из-за возрастания расстояния между ними. На рис. 5б приведена зависимость амплитуды ЭМС от величины напряженности электрического поля при неизменном угле наклона  $\alpha = 45^\circ$  по отношению к контакту материала образца и торца дефекта из фторопласта, расположенного перпендикулярно распространения акустического импульса, а на рис. 6 — с дефектом из магнетитовой руды.

Здесь для возбуждения акустического импульса в образце использовали удар шариком. Контролируемые поверхности контактов располагались перпендикулярно распространению акустического импульса. На рис. 5б и рис. 6 видно, что амплитуда ЭМС увеличивается при нарастании напряженности приложенного к образцу электрического поля.

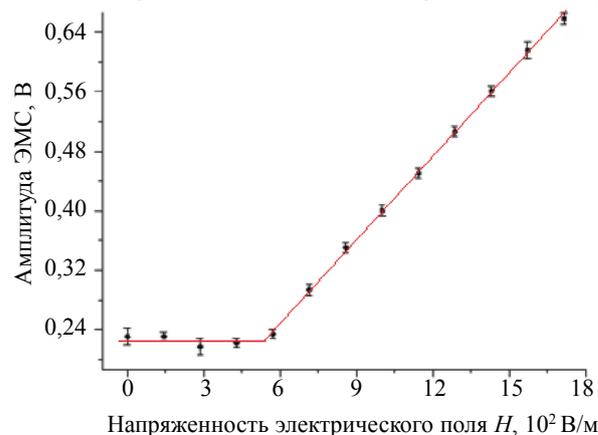


Рис. 6. Изменения амплитуды электромагнитного сигнала при постоянном угле наклона  $\alpha$  вектора напряженности электрического поля  $H$  по отношению к поверхности контакта цементно-песчаной смеси и торцевой части дефекта из магнетитовой руды с размерами  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9} \text{ м}^3$ .

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований было установлено возрастание амплитуды ЭМС с увеличением угла вектора напряженности электрического поля относительно контакта материалов образца и дефектов. Причем при неизменном угле наклона было выявлено нарастание амплитуды ЭМС при изменении напряженности поля в интервале от нуля до  $18,0 \times 10^2$  В/м.

Как уже отмечалось выше, при разработке акустико-электрического метода контроля дефектности диэлектрических материалов важным является знание их акустических и электрических свойств. В табл. 1 приведены параметры для вмещающей цементно-песчаной смеси и материалов модельных дефектов с разными акустическими и электрическими свойствами.

На рис. 7 показан результат измерения акустико-электрических преобразований в образце, имеющем включение в виде дефекта из фторопласта (ПТФЭ). Продольная скорость звука в ПТФЭ равна 1340 м/с при плотности  $\rho_{\text{ф}} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>.

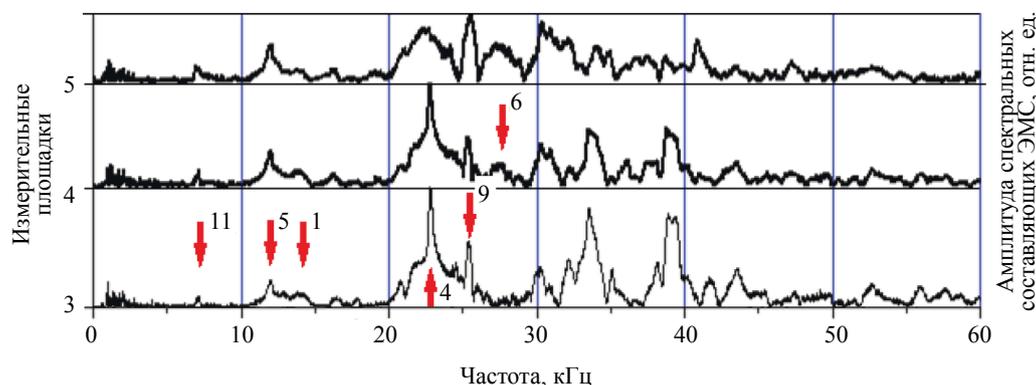


Рис. 7. Спектры ЭМС на разных измерительных площадках модельного образца ЦПС с дефектом из фторопласта при возбуждении детерминированным акустическим импульсом.

Акустический импеданс цементно-песчаной смеси (ЦПС) образца имеет значение  $z_{\text{цпс}} = 5,25 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>·с, что почти в два раза больше, чем у ПТФЭ, который соответствует значению  $z_{\text{ф}} = 2,95 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>·с. Дефект размером  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$  м находился на уровне измерительных площадок 3, 4 и частично 5. Введение акустического импульса проводили со стороны измерительной площадки № 15.

На рис. 7 видно, что на дальней от удара измерительной площадке № 3 наибольшая амплитуда спектральных составляющих ЭМС. Это указывает на присутствие в районе этой площадки начала дефекта в объеме образца. Данные по параметрам спектральных составляющих ЭМС с других измерительных площадок здесь не приведены, так как они существенно меньше по амплитуде и не имеют упорядоченности. Распространение вводимого акустического импульса по длине образца  $L_0$  соответствует спектральной составляющей ЭМС 14,55 кГц. На рис. 7 эта частота обозначена стрелкой 1. Другие рассчитанные и приведенные в табл. 2 частоты также соответствуют спектральным составляющим ЭМС. На рисунке они обозначены теми же цифрами, что и в табл. 2. Выделенные на рис. 7 стрелками частоты являются определяющими для выявления местоположения дефекта.

В табл. 2 приведены результаты расчетов спектральных составляющих ЭМС в модельном образце из цементно-песчаной смеси с дефектом из фторопласта при возбуждении детерминированным акустическим импульсом.

Идентичность параметров возбуждающих образец акустических импульсов отслеживалась по скорости налета шарика на ударную поверхность. Расчет частот производили по формуле  $f_i = c_i / 2L_i$ , где  $f_i$  — частотная составляющая спектра ЭМС;  $c_i$  — продольная скорость звука в основном материале модельного образца или дефекта;  $L_i$  — длина отрезка образца, по которому распространяется акустический импульс. Увеличение дефекта при неизменных размерах образца приводит к изменению спектра и появлению высокочастотных спектральных составляющих ЭМС. На рис. 8 приведены спектры частот, полученные при измерении ЭМС для образцов с дефектами из фторопласта разных размеров:  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$ ;  $(20 \times 20 \times 30) \times 10^{-9}$  и  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>. При этом задняя граница дефекта находилась на одном расстоянии от торца образца, противоположного вводу акустического импульса при ударе шариком. Измерения всегда проводились на всех выделенных площадках образца от № 1 до № 15 (см. рис. 1а). На рис. 8 приведены электромагнитные

Результаты расчетов спектральных составляющих ЭМС в модельном образце из цементно-песчаной смеси с дефектом из фторопласта

№ п.п.	Отрезки образца, $10^{-3}$ м	Время двойного прохождения акустического импульса, $10^{-6}$ с	Частота спектра ЭМС, $10^3$ Гц	Продольная скорость звука $c_p$ , м/с	Материал
1	$L_0 = 95$	68,70	<b>14,55</b>	2765	ЦПС
2	$L_1 = 20$	14,47	69,10	2765	ЦПС
3	$L_2 = 15$	22,39	44,67	1340	ПТФЭ
4	$L_3 = 60$	43,47	<b>23,00</b>	2765	ЦПС
5	$L_0 + L_1$	83,30	<b>12,00</b>	2765	ЦПС <sub>0,1</sub>
6	$L_1 + L_2$	36,86	<b>27,10</b>	2765 <sub>1</sub> , 1340 <sub>2</sub>	ЦПС <sub>1</sub> , ПТФЭ <sub>2</sub>
7	$L_3 + L_2$	65,86	15,18	2765 <sub>3</sub> , 1340 <sub>2</sub>	ЦПС <sub>3</sub> , ПТФЭ <sub>2</sub>
8	$L_1 + L_2 + L_3$	80,34	<b>12,45</b>	2765 <sub>1,3</sub> , 1340 <sub>2</sub>	ЦПС <sub>1,3</sub> , ПТФЭ <sub>2</sub>
9	$L_0 + L_1 - L_3$	39,83	<b>25,11</b>	2765 <sub>0,1,3</sub>	ЦПС <sub>0,1,3</sub>
10	$L_0 - L_3$	25,23	39,64	2765 <sub>0,3</sub>	ЦПС <sub>0,3</sub>
11	$L_0 + L_1 + L_2 + L_3$	149,16	<b>6,7</b>	2765 <sub>0,1,3</sub> , 1340 <sub>2</sub>	ЦПС <sub>0,1,3</sub> , ПТФЭ <sub>2</sub>

сигналы, регистрируемые на измерительных площадках, соответствующих контакту материалов образца и дефекта, расположенного вблизи поверхности, через которую вводили акустический импульс.

Расчет частот ЭМС (рис. 8) с помощью программы БПФ показал, что наибольший пик спектра соответствует поперечному размеру образца равному  $5,0 \times 10^{-2}$  м. Стрелками указаны частоты, связанные с разными размерами дефектов из фторопласта. Как уже отмечалось выше, эти частоты связаны с уменьшением расстояния между дефектом и основными поверхностями образца, размеры которого остаются неизменными. В результате, частота ЭМС на участках, соответствующих длине дефекта, возрастает, что и выявлено в экспериментальных измерениях. При измерениях ЭМС наблюдали изменения спектра в зависимости от места сканирования.

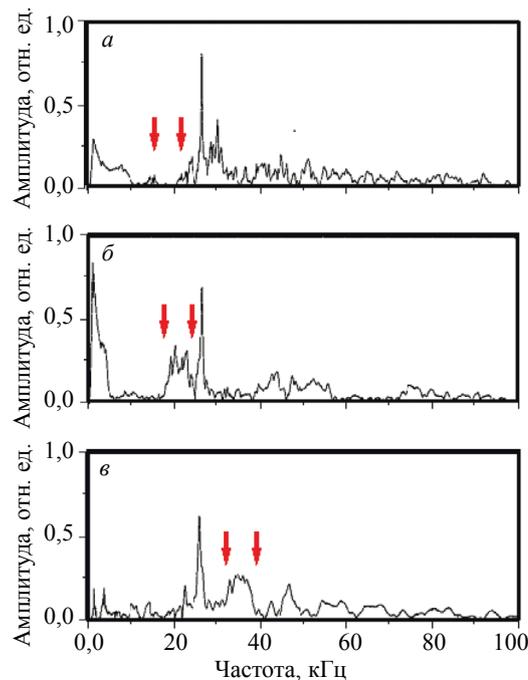


Рис. 8. Изменения спектра электромагнитных сигналов образца цементно-песчаной смеси с дефектами из фторопласта разных размеров:

$a$  —  $(10 \times 10 \times 15) \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>;  $b$  —  $(20 \times 20 \times 30) \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>;  $v$  —  $(25 \times 25 \times 38) \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>.

На противоположной от удара площадке в спектре наблюдается преобладание низкочастотной составляющей. В то же время в других местах преобладает высокочастотная составляющая. Это объясняется сформированной дефектом сложной волновой картиной НДС, которая оказывает влияние на частотный спектр регистрируемого электромагнитного сигнала.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований было установлено возрастание амплитуды ЭМС с увеличением угла вектора напряженности электрического поля относительно контакта материалов образца и дефектов. Причем при неизменном угле наклона было выявлено нарастание амплитуды ЭМС при изменении напряженности поля в интервале от нуля до  $18 \times 10^2$  В/м. Такое возрастание обусловлено увеличением поляризации поверхностей контактов материалов образца и дефектов в виде твердотельных включений. Приложение электрического поля существенно улучшает соотношение амплитуды ЭМС/шум.

В результате моделирования установлено соответствие амплитуд электромагнитных откликов на определенное расчетным путем распределение во времени и пространстве механических напряжений, возникающих в дефектной системе при распространении акустического импульса. Показано, что параметры электромагнитных сигналов отображают распределение параметров возбуждающего акустического импульса в разных частях объема контролируемого образца, на которое оказывает влияние соотношение акустического импеданса материалов образца и дефекта. Увеличение дефекта при неизменных размерах образца приводит к изменению спектра и появлению высокочастотных спектральных составляющих ЭМС. Кроме того, по спектрам ЭМС возможно определение местонахождения диэлектрического дефекта в диэлектрическом материале.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 19-19-00178.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Physical Acoustics (edited by W.P. Mason). V. 1. New York: Academic Press, 1964. 532 p.
2. Клюев В.В. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 т. М.: Машиностроение, 2008.
3. Blitz J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Springer, 1997. 261 p.
4. Ida N. Numerical Modeling for Electromagnetic Non-Destructive Evaluation. London: Chapman & Hall edition, 1995. 511 p.
5. Михеев М.Н., Горкунов Е.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 266 с.
6. Francesco Ficilli. Non-Destructive Testing by Magnetic Techniques. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 140 p.
7. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. М.: Атомиздат, 1974. 510 с.
8. Неразрушающий контроль / Под ред. В.В. Сухорукова. Кн. 4. М.: Высшая школа, 1992. 321 с.
9. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН СССР. 1981. Т. 256. № 4. С. 824—826.
10. Гордеев В.Ф., Мальшиков Ю.П., Чахлов В.Л., Баумбах Х., Капхан Г., Словик В., Бирхольц В. Электромагнитный эмиссионный контроль прочности бетонов // Дефектоскопия. 1992. № 7. С. 76—80.
11. Rabinovitch A., Frid V., Goldbaum J., Bahat D. Polarization-depolarization process in glass during percussion drilling // Philosophical Magazine. 2003. V. 83. No. 25. P. 2929—2939.
12. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A. Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes // Strain. 2010. V. 47. P. 144—152.
13. Bepal'ko A.A., Surzhikov A.A., Yavorovich L.V. Study of Mechanoelectrical Transformation in Rocks Under Dynamic Impact // Non-Ferrous Metals. 2007. № 1. P. 9—12.
14. Мирошниченко М.И., Куксенко В.С. Излучение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // Физика твердого тела. 1980. Т. 22. № 5. С. 1531—1534.
15. O'Keefe, S.G., Thiel D.V. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials // Phys. Earth and Planet. Inter. 1995. V. 89. No. 11. P. 127—135.
16. Petrenko V.F. On the nature of electrical polarization of materials caused by cracks, application to ice // Philosophical Magazine B. 1993. V. 67. No. 3. P. 301—315.
17. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 6245—6249.
18. Bepal'ko A.A., Shtirts V.A., Fedotov P.I., Chulkov A.O., Yavorovich L.V. Modelling of Infrared Glow in Rock Holes // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. V. 38. P. 29—30.
19. Bepal'ko A.A., Isaev Y.N., Yavorovich L.V. Transformation of acoustic pulses into electromagnetic response in stratified and damaged structures // Journal of Mining Science. 2016. Т. 52. № 2. С. 279—285.

20. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Диагностика развития деструктивных зон в образцах горных пород при одноосном сжатии по спектральным характеристикам электромагнитных сигналов // Дефектоскопия. 2011. № 10. С. 41—49.
  21. Фурса Т.В., Уцын Г.Е., Данн Д.Д., Петров М.В. Перспективы развития неразрушающего метода контроля гетерогенных неметаллических материалов по параметрам электрического отклика на ударное воздействие // Дефектоскопия. 2017. № 2. С. 24—30.
  22. X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822. [Electronic resource]
  23. Беспалько А.А., Федотов П.И., Яворович Л.В. Исследование и контроль намагниченности образцов магнетитовой руды по параметрам электромагнитного сигнала // Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 221—224.
  24. Уорминг Р.Ф., Кутлер П., Ломакс Г. Нецентральные разностные схемы II и III порядка точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11. № 2. С. 76—85.
  25. Барашков В.Н., Герасимов А.В., Люшкин Б.А. Прогнозирование разрушения промышленных установок // Химическая промышленность. 1998. № 10. С. 657—661.
  26. Landau L.D., Lifshits E.M. Electrodynamics of continuous media. Great Britain: Bristol, 1963. V. 8. 474 p.
  27. Вишневецкая Н.Л., Защинский Л.А. Расчет напряженности самосогласованного электрического поля, возникающего в диэлектрике при механическом напряжении // Известия ВУЗов. Физика. 1977. № 5. С. 71—74.
-

## ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОЗВУЧИВАНИЯ И СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ ДИНАСОВЫХ КИРПИЧЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

©2021 г. Иржи Брозовский<sup>1,\*</sup>, Ленка Боднарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Технический университет Брно, Строительный факультет, 60200 Брно, Чешская республика, Veveri 331/95  
\*e-mail: brozovsky.j@fce.vutbr.cz

Поступила в редакцию 09.10.2020; после исправления 27.11.2020  
Принять к публикации 27.11.2020

Приводятся сведения о влиянии направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей на результаты измерений ультразвуковым методом на кирпичах из динаса. Порядок измерения ультразвуковым импульсным методом, указанный в стандартах для других строительных материалов, не совсем применим при испытании динасового кирпича. Весьма проблематичным является использование для измерений преобразователей с собственной частотой 500 кГц. Не подтвердилось предположение о том, что скорость распространения ультразвука увеличивается с уменьшением длины базы прозвучивания. Самые низкие скорости распространения ультразвука были установлены при прозвучивании по высоте образца. Эту аномалию можно объяснить ориентировкой открытых пор во внутренней структуре кирпича, а также процессом формирования. Приведенные сведения о влиянии направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей создают условия для обеспечения воспроизводимости результатов измерений динасовых кирпичей.

*Ключевые слова:* огнеупорные материалы, динас, динасовый кирпич, ультразвук, ультразвуковой импульсный метод, собственная частота преобразователя, направление прозвучивания, скорость.

**DOI:** 10.31857/S0130308221020020

### ВВЕДЕНИЕ

Огнеупорные материалы имеют большое значение во многих технических отраслях промышленности, где происходит контакт материала с высокими температурами. Одним из наиболее широко используемых материалов является динас, который представляет собой кремниевый огнеупорный материал, содержащий не менее 93 % SiO<sub>2</sub>. Динасовые кирпичи изготавливаются из кварцевого порошка, извести и добавок. Из приготовленной сырьевой смеси прессуют кирпичи, которые потом сушат и обжигают. Внутренняя структура динасового кирпича имеет относительно большое количество открытых пор, около 20 % по объему.

Огнеупорные материалы характеризуются хорошими механическими свойствами и низкой ползучестью под нагрузкой. Одним из преимуществ огнеупорных материалов является хорошее сопротивление механическому истиранию. Сопротивление истиранию — один из основных параметров огнеупорных материалов при использовании в промышленных установках, например, в промышленных печах и технологическом оборудовании нефтехимической промышленности, в мусоросжигательных заводах и на тепловых угольных электростанциях. Высокое сопротивление истиранию позволяет использовать их в качестве облицовочного материала, например, в промышленных установках с движущимися газами и жидкостями совместно с твердыми частицами. Огнеупорные материалы — один из способов повышения стойкости других материалов к воздействию движущихся жидкостей. Базальтовые футеровки также используются для повышения износостойкости бетона к движущимся жидкостям в бетонных трубах, по днищам колодцев [24].

Одним из критериев для оценки качества динасовых кирпичей является скорость распространения ультразвука.

Ультразвуковой метод используется в основном для определения параметров бетона. Порядок выполнения измерений приводится в технических стандартах европейских и других зарубежных (ČSN EN 12504-4 [13], ISO 1920-7 [18], ASTM C 597 [1], ГОСТ 17624 [15]), а также в чешских ČSN 73 1371 [11], ČSN 73 1380 [12], а сведения о его использовании для бетона приводятся, например в [19, 20, 22, 23]. Использование ультразвукового метода для других строительных материалов указано в зарубежных стандартах ASTM C 1419-14 [2] (огнеупорные материалы), ГОСТ 24830—81 [16] (огнеупорные бетоны), ГОСТ 24332—88 [17] (кирпич и камни силикатные). Приведенные стандарты описывают использование ультразвукового метода для оценки качества этих изделий. Для испытания огнеупорных изделий ультразвуковым методом не существует чешский технический стандарт.

Собственная частота преобразователей влияет на время распространения ультразвука в исследуемых изделиях. Рекомендуемая собственная частота преобразователей для бетона от 20 до

150 кГц (ČSN EN 12504-4[13]). Американский стандарт ASTM C 1419-14 [2] рекомендует собственную частоту преобразователей от 0,5 до 2,5 МГц, а российский ГОСТ 24830—81 [16] для испытаний огнеупорного бетона предлагает собственную частоту преобразователей от 25 до 60 кГц. Из анализа приведенных стандартов очевидны существенные различия в требованиях к собственной частоте преобразователей для испытания огнеупорных материалов. Для бетонов это влияние также приводится в [19, 20], а для силикатного кирпича сведения о влиянии собственной частоты преобразователей — в [8].

В ГОСТ 24830—81 [16] (огнеупорные бетоны) и ГОСТ 24332—88 [17] (кирпич и камни силикатные) четко определены места расположения преобразователей при измерении ультразвуковым методом. Согласно ASTM C 1419-14 [2] можно проводить прозвучивание по длине, ширине и высоте изделия; не указаны предпочтительные направления прозвучивания. Тургут и Куцук исследовали влияние направления прозвучивания на бетонных образцах, результаты показаны в работе [21]. Брозовский и сотрудники исследовали влияние направления прозвучивания на глиняном и силикатном кирпичах, результаты исследования влияния приведены в литературе [3—6].

В статье представлены результаты исследования влияния направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей на результаты измерений ультразвуковым методом при оценке качества динасового кирпича.

### ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе рассматривается влияние выбранных факторов, а именно направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей, на результаты измерений ультразвуковым методом при оценке качества динасового кирпича.

Ультразвуковой метод используется в основном при испытании бетона для определения динамического модуля упругости, прочности на сжатие бетона или для оценки изменений внутренней структуры бетона и других строительных материалов, чаще всего при испытании на морозостойкость. ČSN EN 13791 [14] предпочитает ультразвуковой метод для определения прочности на сжатие бетона в конструкции.

Только в стандартах по испытанию силикатного кирпича и огнеупорных бетонов приведены требования к направлению прозвучивания. Требования стандартов на собственную частоту преобразователей разные, например, для бетона собственная частота преобразователя зависит от наименьшего размера испытываемого образца в направлении ультразвука и от скорости распространения ультразвука, согласно ASTM C 1419-14 [2] требуемая собственная частота преобразователей для огнеупорных изделий 500 кГц.

При подборе собственной частоты преобразователей необходимо учитывать длину базы прозвучивания. Как правило, преобразователи с высокой собственной частотой используются для коротких баз прозвучивания, так как на более длинных базах прозвучивания происходит значительное затухание ультразвуковых импульсов, что значительно проявляется на материалах с большим содержанием пор или дефектов внутренней структуры.

При исследовании влияния направления прозвучивания определялась как разница в скорости распространения ультразвука с точки зрения длины базы прозвучивания, так и с точки зрения направления прессования кирпича. Для оценки влияния собственной частоты преобразователей определялась разница в скорости распространения ультразвука как в зависимости от используемой частоты, так и в зависимости от направления прозвучивания.

Анализ результатов измерений, проводимых на динасовых кирпичах, позволил дать оценку рассматриваемым влияниям на результаты измерений ультразвуковым методом и дать рекомендации по использованию ультразвукового метода для оценки их качества.

### МЕТОДЫ, МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для испытания динасовых кирпичей ультразвуковым методом не существует собственного стандарта. Американский стандарт ASTM C 1419-14 [2] для испытаний огнеупорных материалов в некоторых пунктах носит слишком общий характер (направление прозвучивания определено неоднозначно), положения, касающиеся собственной частоты преобразователей, являются проблематичными в связи со внутренней структурой динаса. При прозвучивании динасовых кирпичей по длине, ширине и высоте можно предполагать различные скорости распространения ультразвука. Теоретически скорость распространения ультразвука должна быть наибольшей при измерении на самой короткой базе прозвучивания и увеличиваться с ее длиной.

Методология измерений для определения влияния направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей была основана на ASTM C 1419-14 [2] и ČSN EN 12504-4 [13].

#### Образцы для испытаний

Исследования проводили на динасовых кирпичах заводского изготовления, базового размера 230×114×76 мм, а также на специально изготовленных кирпичах той же длины и ширины, но высотой 100 и 150 мм.

Образцы перед измерениями высушивали при температуре 110 °С, измерения проводили в течение 5 ч после охлаждения до комнатной температуры.

#### Ультразвуковой импульсный метод

**Аппаратура** — ультразвуковой импульсный прибор с точностью до 0,1 с; основная собственная частота преобразователей 54 кГц; исследование влияния собственной частоты на результаты измерений — преобразователи с собственной частотой 500 кГц (согласно ASTM C 1419-14 [2]), 54 кГц (согласно ГОСТ 24830—81 [16] / ČSN EN 12504-4 [13]) и 150 кГц (согласно ČSN EN 12504-4 [13]).

Подбор собственной частоты преобразователей 54 кГц исходил из практических соображений. Преобразователи с собственной частотой 54 кГц обычно поставляются к ультразвуковому прибору для испытания бетона и являются одними из наиболее широко используемыми на практике. Дополнительно для исследования влияния собственной частоты преобразователей на результаты ультразвуковым измерений была выбрана собственная частота 150 кГц.

**Материал для акустического контакта** — технический вазелин согласно ГОСТ 24830—81 [16] / ASTM C 1419-14 [2].

**Проведение измерения** — измерения на динасовых кирпичах проводили сквозным прозвучиванием по длине, ширине и высоте кирпича. В каждой точке установки преобразователя перед измерением определяли длину базы прозвучивания, а затем измеряли время распространения ультразвука. Измерение по длине образца проводили в 3 измерительных точках; по ширине и высоте — в 5 измерительных точках. Результат измерения — время распространения ультразвука.

**Обработка результатов** — скорость распространения ультразвука (ČSN EN 12504-4 [13] / ГОСТ 24830—81 [16]) вычислялась по формуле:

$$V = \frac{L}{T}, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость распространения ультразвука, км/с;  $L$  — длина базы прозвучивания, мм;  $T$  — время распространения ультразвука, мкс.

#### Результаты измерений

**Исследование влияния направления прозвучивания** — результаты измерения скорости распространения ультразвука приведены в табл. 1 и изображены на рис. 1.

Таблица 1

Среднее, минимальное и максимальное значения скорости распространения ультразвука в динасовых кирпичах — набор данных для исследования влияния направления прозвучивания

Направление прозвучивания	По длине образца			По ширине образца			По высоте образца		
	$V_L$	$V_{L_{\min}}$	$V_{L_{\max}}$	$V_W$	$V_{W_{\min}}$	$V_{W_{\max}}$	$V_T$	$V_{T_{\min}}$	$V_{T_{\max}}$
мм	км/с								
230×114×76	2,099	2,054	2,138	2,132	2,095	2,161	2,008	1,970	2,032
230×114×100	2,097	2,052	2,133	2,135	2,091	2,184	2,002	1,966	2,035
230×114×150	2,060	1,992	2,100	2,112	2,050	2,196	1,957	1,906	2,028
Среднее значение — все образцы	<b>2,085</b>	<b>1,992</b>	<b>2,138</b>	<b>2,127</b>	<b>2,050</b>	<b>2,196</b>	<b>1,989</b>	<b>1,906</b>	<b>2,035</b>

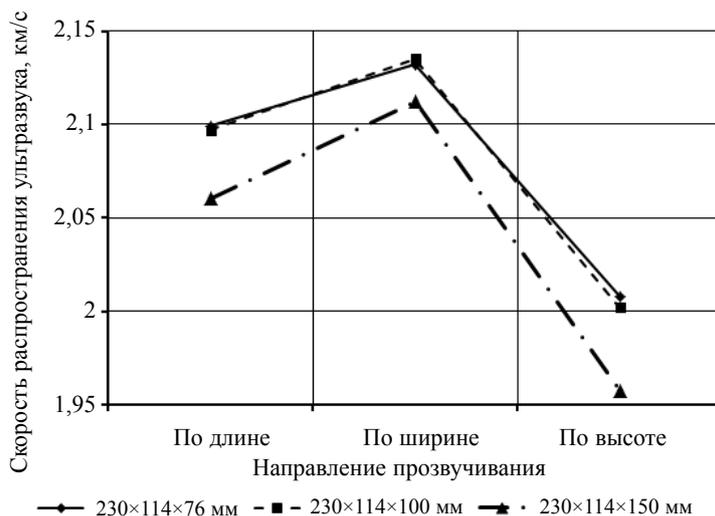


Рис. 1. Скорость распространения ультразвука в зависимости от направления прозвучивания динасовых кирпичей.

Таблица 2

Среднее, минимальное и максимальное значения скорости распространения ультразвука в динасовых кирпичях — набор данных для исследования влияния собственной частоты преобразователей

Направление прозвучивания	По длине образца								
	54 кГц			150 кГц			500 кГц		
Собственная частота преобразователей	$V_L$	$V_{Lmin}$	$V_{Lmax}$	$V_L$	$V_{Lmin}$	$V_{Lmax}$	$V_L$	$V_{Lmin}$	$V_{Lmax}$
Размер кирпича	км/с								
мм									
230×114×76	2,102	2,057	2,138	2,098	2,048	2,167	2,092	1,983	2,206
230×114×100	2,098	2,053	2,133	2,103	2,032	2,122	2,055	2,019	2,122
230×114×150	2,054	1,992	2,129	2,061	1,980	2,151	1,999	1,942	2,072
Направление прозвучивания	По ширине образца								
Размер кирпича	$V_W$	$V_{Wmin}$	$V_{Wmax}$	$V_W$	$V_{Wmin}$	$V_{Wmax}$	$V_W$	$V_{Wmin}$	$V_{Wmax}$
мм	км/с								
230×114×76	2,134	2,095	2,161	2,124	2,072	2,189	2,211	2,165	2,237
230×114×100	2,133	2,099	2,180	2,127	2,099	2,180	2,210	2,175	2,266
230×114×150	2,105	2,050	2,196	2,097	2,033	2,214	2,179	2,135	2,214
Направление прозвучивания	По высоте образца								
Размер кирпича	$V_T$	$V_{Tmin}$	$V_{Tmax}$	$V_T$	$V_{Tmin}$	$V_{Tmax}$	$V_T$	$V_{Tmin}$	$V_{Tmax}$
мм	км/с								
230×114×76	2,009	1,970	2,043	2,004	1,943	2,056	2,092	2,047	2,134
230×114×100	2,000	1,966	2,035	1,992	1,935	2,027	2,074	2,050	2,115
230×114×150	1,955	1,906	2,028	1,955	1,892	2,050	1,893	1,854	1,944

**Исследование влияния собственной частоты преобразователей** — результаты измерения скорости распространения ультразвука приведены в табл. 2 и изображены на рис. 2. Для наглядности в таблицах и рисунках указаны средние значения скорости распространения ультразвука для каждого набора измеряемых образцов.

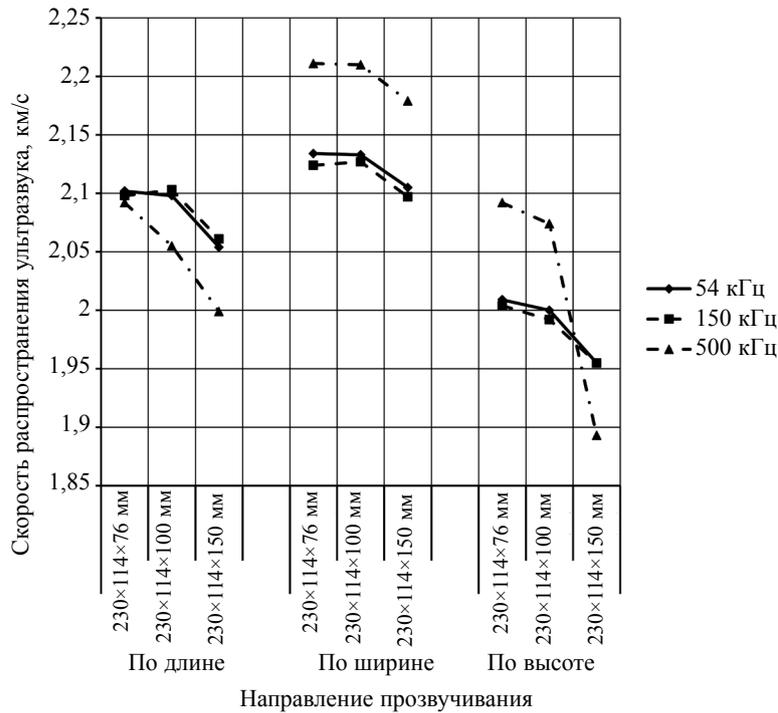


Рис. 2. Скорость распространения ультразвука в зависимости от собственной частоты преобразователей и направления прозвучивания динасовых кирпичей.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### а) Влияние направления прозвучивания на результаты измерения ультразвуковым методом

Для оценки влияния направления прозвучивания на результаты измерений ультразвуковым методом были рассчитаны процентные разницы скоростей при прозвучивании по длине, ширине и высоте кирпича по формулам:

$$\Delta_1 = \frac{V_W - V_L}{V_L} \cdot 100; \quad (2)$$

$$\Delta_2 = \frac{V_T - V_L}{V_L} \cdot 100; \quad (3)$$

$$\Delta_3 = \frac{V_T - V_W}{V_W} \cdot 100; \quad (4)$$

где  $\Delta_1$  — процентная разница между скоростью распространения ультразвука при прозвучивании по ширине и длине кирпича относительно скорости распространения ультразвука при прозвучивании по длине кирпича, %;  $\Delta_2$  — процентная разница между скоростью распространения ультразвука при прозвучивании по высоте и длине кирпича относительно скорости распространения ультразвука при прозвучивании по длине кирпича, %;  $\Delta_3$  — процентная разница между скоростью распространения ультразвука при прозвучивании по высоте и ширине кирпича относительно скорости распространения ультразвука при прозвучивании по ширине кирпича, %;  $V_{L;W;T}$  — скорость распространения ультразвука при прозвучивании по длине; ширине; высоте кирпича, км/с.

В табл. 3 приведены средние значения разниц скоростей распространения ультразвука в км/с и процентах.

При исследовании влияния направления прозвучивания предполагалось, учитывая пористую структуры материала образцов, что скорость распространения ультразвука будет уменьшаться с увеличением длины базы прозвучивания.

Таблица 3

**Разницы в скоростях распространения ультразвука в разных направлениях прозвучивания в км/с и процентах**

Размер кирпича мм	$V_W - V_L$ км/с	$V_T - V_L$ км/с	$V_T - V_W$ км/с	$\Delta_1$ %	$\Delta_2$ %	$\Delta_3$ %
230×114×76	0,033	-0,092	-0,124	1,56	-4,36	-5,83
230×114×100	0,038	-0,095	-0,133	1,82	-4,54	-6,24
230×114×150	0,053	-0,103	-0,156	2,57	-4,99	-7,36
<b>Среднее значение</b>				<b>1,98</b>	<b>-4,63</b>	<b>-6,48</b>

Результаты измерений показали, что наибольшая скорость распространения ультразвука при измерении по ширине образца, скорость распространения ультразвука при измерении по длине образца была ниже, но наименьшей была скорость распространения ультразвука при измерении по высоте образца, как показано на рис. 1. Наблюдаемая тенденция между направлением прозвучивания (размером образца) и скоростью распространения ультразвука одинакова независимо от типа кирпича, который отличается только своей высотой. Установленный тренд динамики скоростей распространения ультразвука, вероятно, связан с ориентировкой открытых пор во внутренней структуре кирпичей, которые образуются при сушке и обжиге динасового кирпича. Другим фактором является мера давления при прессовании, зависящее от высоты кирпича. При увеличении высоты кирпича может оказаться его прессовка недостаточной.

У образцов размерами 230×114 мм и высотой 76 мм или же 100 мм средняя скорость распространения ультразвука существенно не отличалась.

У кирпичей размером 230×114×150 мм средняя скорость распространения ультразвука была во всех случаях ниже, объясняется это тем, что при такой высоте изделия не было достигнуто достаточной прессовки.

Скорость распространения ультразвука при прозвучивании по ширине образца была в среднем на 1,98 % выше по сравнению со скоростью распространения ультразвука по высоте образца, скорость распространения ультразвука по высоте образца была на 4,63 % ниже по сравнению со скоростью при прозвучивании по длине образца, а была на 6,48 % ниже по сравнению со скоростью при прозвучивании по ширине образца.

*б) Влияние собственной частоты преобразователей на результаты измерения ультразвуковым методом*

Для оценки влияния собственной частоты преобразователей на результаты измерений ультразвуковым методом были рассчитаны процентные разницы скоростей при прозвучивании по длине, ширине и высоте кирпича по формулам:

$$\Delta_{4,i} = \frac{V_{i,150} - V_{i,54}}{V_{i,150}} \cdot 100; \quad (5)$$

$$\Delta_{5,i} = \frac{V_{i,500} - V_{i,54}}{V_{i,500}} \cdot 100; \quad (6)$$

$$\Delta_{6,i} = \frac{V_{i,500} - V_{i,150}}{V_{i,500}} \cdot 100, \quad (7)$$

где  $\Delta_4$  — процентная разница между скоростью распространения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 150 и 54 кГц относительно скорости распространения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 150 кГц, %;  $\Delta_5$  — процентная разница между скоростью распространения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 500 и 54 кГц относительно скорости распространения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 500 кГц, %;  $\Delta_6$  — процентная разница между скоростью распространения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 500 и 150 кГц относительно скорости распростра-

нения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 500 кГц, %;  $i$  — направление прозвучивания ( $L$  — по длине,  $W$  — по ширине,  $T$  — по высоте);  $V_{54;150;500}$  — скорость распространения ультразвука при прозвучивании преобразователями с собственной 54, 150, 500 кГц, км/с.

Скорость распространения ультразвука при измерении преобразователями с собственной частотой 54 и 150 кГц во всех направлениях прозвучивания отличается минимально, в первом случае разница составляет 0,17 %, что можно считать погрешностью измерения. Другие результаты были получены при измерениях преобразователями с собственной частотой 500 кГц.

Таблица 4

**Разницы в скоростях распространения ультразвука для разной собственной частоты преобразователей и разных направлений прозвучивания в км/с и процентах**

Размер кирпича, мм	$V_{150}-V_{54}$ км/с	$V_{500}-V_{54}$ км/с	$V_{500}-V_{150}$ км/с	$\Delta_4$ %	$\Delta_5$ %	$\Delta_6$ %
Направление прозвучивания	По длине образца					
230×114×76	-0,004	-0,006	-0,010	-0,21	-0,41	-0,59
230×114×100	0,005	-0,047	-0,042	0,23	-2,32	-2,07
230×114×150	0,007	-0,062	-0,055	0,35	-3,12	-2,74
<b>Среднее значение</b>				<b>0,13</b>	<b>-1,95</b>	<b>-1,80</b>
Направление прозвучивания	По ширине образца					
230×114×76	-0,010	0,087	0,076	-0,51	3,92	3,45
230×114×100	-0,006	0,083	0,077	-0,31	3,74	3,46
230×114×150	-0,008	0,082	0,075	-0,38	3,77	3,42
<b>Среднее значение</b>				<b>-0,40</b>	<b>3,81</b>	<b>3,44</b>
Направление прозвучивания	По высоте образца					
230×114×76	-0,006	0,089	0,083	-0,31	4,23	3,98
230×114×100	-0,008	0,082	0,075	-0,40	3,95	3,59
230×114×150	-0,0003	-0,061	-0,062	-0,02	-3,25	-3,26
<b>Среднее значение</b>				<b>-0,24</b>	<b>1,64</b>	<b>1,44</b>

При прозвучивании по длине образца скорость распространения ультразвука была ниже по сравнению со скоростью распространения ультразвука при измерении преобразователями с собственной частотой 54 и 150 кГц; в зависимости от вида кирпича она была ниже, от 0,5 до 2,9 %. При прозвучивании по ширине образца и использовании преобразователей с собственной частотой 500 кГц была скорость распространения ультразвука примерно на 1,1 % выше по сравнению со скоростью распространения ультразвука с преобразователями с собственной частотой 54 и 150 кГц.

При прозвучивании по высоте образца и использовании преобразователей с собственной частотой 500 кГц была скорость распространения ультразвука на образцах высотой 76 и 100 мм примерно на 3,9 % выше по сравнению со скоростью распространения ультразвука с преобразователями с собственной частотой 54 и 150 кГц. Однако на образцах высотой 150 мм при прозвучивании преобразователями с собственной частотой 500 кГц была скорость распространения на 3,25 % ниже по сравнению со скоростью распространения ультразвука при измерении преобразователями с собственной частотой 54 и 150 кГц.

При измерении динасовых кирпичей преобразователями с собственной частотой 500 кГц, особенно при длине базы прозвучивания 230 и 150 мм, наблюдалось сильное затухание сигнала в результате чего снижалась скорость распространения ультразвука, что и влияет на достоверность результатов измерений. При измерении на длине измерительной базы 76 и 114 мм эффект ослабления сигнала был значительно меньше.

Результаты измерений преобразователями с собственной частотой 54 и 150 кГц показывают минимальные отличия. В большинстве случаев скорость распространения ультразвука при измерении преобразователями с собственной частотой 54 кГц немного выше, но незначительно.

*в) Рекомендации по измерению динасовых кирпичей ультразвуковым импульсным методом*

Оценивая результаты измерений ультразвуковым методом, направленные на выявление влияния направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей, были даны следующие рекомендации.

*Подготовка образцов:* перед измерениями образцы в течение не менее 5 ч высушить при 110 °С. Измерения провести в течение 5 ч после охлаждения.

*Собственная частота преобразователей:* 54 или 150 кГц.

*Материал для акустического контакта:* солидол, технический вазелин в соответствии с ГОСТ 24830—81 [16].

*Направление прозвучивания:* предпочтительно прозвучивание по ширине образца, если не предъявлены другие требования.

*Расположение точек измерений:* кромка преобразователя должна располагаться на расстоянии не менее 20 мм от грани образца.

*Минимальное число точек установки преобразователя:*

прозвучивание по ширине образца — 5 точек измерений в середине высоты образца;

прозвучивание по длине образца — 3 точки измерений в середине высоты образца;

прозвучивание по ширине образца — не менее 6 точек измерений на трех уровнях высоты.

*Длина базы прозвучивания:* определяется для каждой точки прозвучивания с точностью до 0,1 мм.

*Время распространения ультразвука:* в каждой точке прозвучивания измеряется дважды. Если разница между временем распространения ультразвука более 0,5 %, проводится дополнительное измерение времени распространения ультразвука, а значение, неудовлетворяющее приведенному требованию исключается.

*Обработка результатов:* для каждой точки прозвучивания вычисляется скорость распространения ультразвука по формуле (1). Для каждого направления прозвучивания образца вычисляется средняя скорость распространения ультразвука. Скорость распространения ультразвука округляется на 0,001 или на 1 м/с.

## ВЫВОДЫ

Порядок измерения ультразвуковым импульсным методом, указанный в стандартах для других строительных материалов, не совсем применим при испытании динасового кирпича.

Не подтвердилось предположение о том, что скорость распространения ультразвука увеличивается с уменьшением длины базы прозвучивания. Самые высокие скорости распространения ультразвука были установлены при измерении по ширине кирпича (это справедливо для всех кирпичей). И наоборот, самые низкие скорости распространения ультразвука были установлены при прозвучивании по высоте образца. Эту аномалию можно объяснить ориентировкой открытых пор во внутренней структуре кирпича, а также процессом формирования, который не обязательно приводит к идеальной прессовке кирпича, особенно при увеличении его высоты.

Весьма проблематичным является использование для измерений на динасовых кирпичах преобразователей с собственной частотой 500 кГц, приведенной в ASTM C 1419-14 [2]. Внутренняя структура динаса образована соединением зерен кварца, между которыми находятся поры, что и является причиной ослабления сигнала, которое происходит особенно на более длинных базах прозвучивания, а следовательно, влияет на достоверность результатов измерения. Поэтому рекомендуется для измерения динасовых кирпичей использовать преобразователи с собственной частотой 54—150 кГц, поскольку результаты измерений показывают минимальные различия.

Чтобы обеспечить воспроизводимость измерений, выполненных разными лабораториями при оценке качества динасового кирпича, необходимо установить единую базу прозвучивания.

Приведенные сведения о влиянии направления прозвучивания и собственной частоты преобразователей при измерении динасовых кирпичей ультразвуковым импульсным методом создают условия для обеспечения воспроизводимости результатов измерений при оценке их качества или исследовательской работе в этой области.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Чешского научного фонда, проект № 18-25035S «Исследование влияния движущихся жидкостей на износ цементных композитов и последующее моделирование механической коррозии».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM C 597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, United States : ASTM International, 2009.
2. ASTM C 1419-14 Standard test method for sonic velocity in refractory materials at room temperature. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
3. *Brozovsky J., Zach J., Brozovsky J. (jr.)* Non-destructive testing of solid brick compression strength in structures // The e-Journal of Nondestructive Testing. 2007. V. 12. No. 11. P. 1—9. ISSN 1435—4934.
4. *Brozovsky J., Zach J., Brozovsky J. (jr.)* Determining the strength of solid burnt bricks in historical structures // The e-Journal of Nondestructive Testing. 2008. V. 13. No. 9. P. 1—10. ISSN 1435—4934.
5. *Brozovský J., Brožovská Onderková J.* Zjišťování pevnosti cihel plných pálených v historických stavbách (Определение прочности глиняного кирпича в исторических объектах) // Zprávy památkové péče. 2011. roč. 71, č. 2. Str. 116—120.
6. *Brozovsky J., Zach J.* Evaluation of technical condition of masonry / In 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianópolis — Brazil. 2012. ISBN 978-85-63273-10-9. P. 1—10.
7. *Brozovsky J.* Use of Non-Destructive Ultrasonic Pulse Testing Methods in Evaluation of Brick Parameters / In 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (SCMT3). 2013. Kyoto, Japan, str. 1—10.
8. *Brozovsky J.* Calcium Silicate Bricks — Ultrasonic Pulse Method: Effects of Natural Frequency of Transducers on Measurement Results // International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering. 2014. V. 8. No. 9. P. 914—917. eISSN 1307-6892 (ICACE 2014).
9. *Brozovsky J.* Evaluation of frost resistance of calcium silicate masonry units with ultrasonic pulse and resonance methods // Russian Journal of Nondestructive Testing. V. 50. No. 10. P. 607—615. ISSN 1061-8309.
10. *Brožovský J.* Zkoušení cihel ultrazvukovou impulsovou metodou — vliv vlhkosti a způsobu prozvučování na výsledky měření (Испытание глиняного кирпича ультразвуковым импульсным методом — влияние влажности и направления прозвучивания на результаты измерений) // TZB-info. 2018. roč. 20, č. 33. Str. 1—8. ISSN 1801-4399.
11. ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu — Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu (Неразрушающее испытание бетона — Ультразвуковой импульсный метод испытания бетона). Prague : Czech standards institute, 2011.
12. ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování — Porušení vnitřní struktury (Испытание морозостойкость бетона — Повреждение внутренней структуры). Prague : Czech standards institute, 2007.
13. ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu (Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса). Prague : Czech standards institute, 2005.
14. ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích (Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях). Prague : Czech standards institute, 2005.
15. ГОСТ 17624—2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. Moscow: Standartinform.
16. ГОСТ 24830—81 Изделия огнеупорные бетонные. Ультразвуковой метод контроля качества. Moscow: Standartinform.
17. ГОСТ 24332—88 Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии. Moscow: Standartinform.
18. ISO 1920-7 Testing of concrete — Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete. Switzerland: International Organization for Standardization, 2004.
19. *Malhotra V.N., Carino, N.J.* Handbook on nondestructive testing of concrete / 2nd edition, CRC Press, USA, 2004.
20. *Pavlik A., Doležel J.* Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí (Неразрушающий контроль бетонных конструкций), SNTL Prague, CZ, 1977.
21. *Turgut P., Kucuk O.F.* Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2006. V. 42. No. 2. P. 745—751.
22. *Tanyidzit P., Coskun A.* Determination of the Principal Parameter of Ultrasonic Pulse Velocity and Compressive Strength of Lightweight Concrete by Using Variance Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2008. V. 44. No. 9. P. 639—646.
23. *Ulucan Z. Ç., Türk K., Karataş M.* Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2008. V. 44. No. 5. P. 367—374.
24. *Wood R.J.K.* The erosion performance of candidate internal coatings for slurry handling and pipeline transport / Edited by: Richardson JF., In: Slurry handling and pipeline transport — HYDROTRANSPORT 14. Book Series: BHR GROUP CONFERENCE SERIES PUBLICATION. Issue: 36. P. 699—718. ISBN: 1-86058-213-3. 1999.

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНОГО ШВА ТОНКОСТЕННОЙ ТИТАНОВОЙ ОБОЛОЧКИ С ИНДИКАТОРОМ НЕПРОВАРА

© 2021 г. Р.Р. Исхужин<sup>1</sup>, В.Н. Борисов<sup>1,\*</sup>, В.Г. Атавин<sup>1</sup>, А.А. Узких<sup>1</sup>, К.К. Хафизова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабина», Россия 456770 Снежинск, Челябинская область, ул. Васильева, 13, а/я 245

\*E-mail: [bvn@vniitf.ru](mailto:bvn@vniitf.ru)

Поступила в редакцию 04.11.2020; после доработки 25.12.2020

Принята к публикации 25.12.2020

Рассмотрена методология ультразвукового контроля качества сварного шва тонкостенных оболочек из титанового сплава толщиной 0,6 мм. Выполнен обзор публикаций, посвященных вопросам возбуждения и распространения волн Лэмба и практическим задачам УЗК тонкостенных изделий. Решена задача выявления слипаний (участков сварного шва с непроваром, хорошо проводящих ультразвуковые волны, но не обеспечивающих механической прочности). Предложено в качестве индикатора непровара сварного шва использовать угловую проточку. Выполнен анализ распространения в материале различных мод волн Лэмба, выбраны оптимальные параметры контроля. Высокая информативность сигнала достигнута с применением вейвлет-анализа и прецизионных цифровых фильтров с малым шагом. Выполнен анализ дефектограмм сварного шва, содержащего дефектные и бездефектные участки. Результаты ультразвукового сканирования сопоставлены с данными металлографии.

*Ключевые слова:* акустические методы, дефектоскопия, ультразвуковой контроль, волны Лэмба, сварной шов, дисперсионный анализ, мода, слипание, проточка.

DOI: 10.31857/S0130308221020032

### ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности (в частности, в атомной технике) применяются тонкостенные оболочки ответственного назначения. К сварным швам (СШ) таких оболочек предъявляются жесткие требования по прочности и, соответственно, бездефектности. С целью обеспечения контроля качества СШ разрабатываются специализированные методики и системы ультразвукового контроля (УЗК). При этом к наиболее сложным СШ, с точки зрения УЗК, относятся швы с подкладными кольцами и выполненные из материалов, склонных к образованию слипаний — участков СШ, хорошо проводящих ультразвуковые волны, но не обеспечивающих механической прочности. В статье приведены методические решения УЗК СШ криволинейной оболочки из сплава ВТ-20, осложненного перечисленными факторами.

### ОБЪЕКТ КОНТРОЛЯ

Оболочка изготовлена из двух полусфер толщиной 0,6 мм, выполненных из титанового сплава ВТ-20. Сварка выполнена электронно-лучевым методом. Под сварной шов установлено подкладное кольцо сечением 2×0,6 мм, ограничивающее выход электронного луча на внутреннюю поверхность. Исходя из требуемых прочностных характеристик оболочки, СШ должен быть проварен на полную глубину с допусаемым внедрением в подкладное кольцо, но без выхода на внутреннюю поверхность.

### ВОЛНОВОЙ АНАЛИЗ

В УЗК листов, труб и оболочек наиболее эффективно используются волны Лэмба. Значительный научный и практический интерес к проведению неразрушающего контроля качества изделий с использованием данного типа волн демонстрирует большое количество публикаций, посвященных как вопросам возбуждения и распространения волн Лэмба, так и практическим задачам УЗК с их использованием [1—81]. Из работ по этой теме, опубликованных в России, следует выделить ставшие уже классическими труды [1—8], диссертационные работы [9, 10], а также публикации [11—18], в которых представлен обзор большого количества источников, посвященных данной проблеме. Из зарубежных публикаций, посвященных использованию волн Лэмба в неразрушающем контроле качества тонкостенных изделий, в перечне [38—80] представлена только небольшая

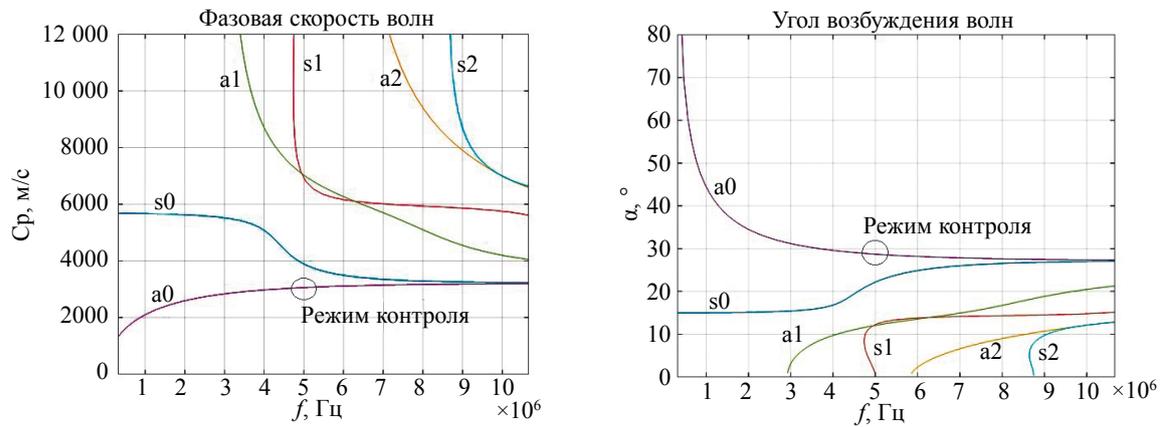


Рис. 1. Зависимости параметров волн Лэмба от частоты в сплаве ВТ-20 толщиной 0,6 мм.

подборка работ, из числа опубликованных за последний год (полные тексты публикаций [38—60], а также сборник [81] находятся в открытом доступе).

Характеристики распространения волн Лэмба в исследуемом материале описываются с использованием дисперсионного анализа [2, 33—41, 60—64]. Для титанового сплава ВТ-20 толщиной 0,6 мм зависимости основных параметров волн Лэмба имеют вид, представленный на рис. 1. Из графиков рис. 1 видно, что моды, выше нулевых, распространяются при частотах от 3 МГц и более. При этом на частотах более 7 МГц зависимости углов возбуждения нулевых мод сближаются с зависимостями углов возбуждения волн высших мод. В этой связи, для обеспечения хорошей чувствительности и недопущения влияния на результат УЗК ненулевых мод (слияния сигналов) выбрана частота преобразователя (ПЭП) 5 МГц. Информативная мода волны Лэмба, на которой выполняется УЗК, и угол возбуждения для материала оболочки определены с помощью фазированного антенного сканирования [31]. В результате анализа выбрана мода  $a_0$  и угол возбуждения  $28^\circ$ .

## СИСТЕМА УЗК

Как известно [7], многие сплавы при сварке имеют склонность к образованию слипаний. К таким сплавам относятся и титановые. С целью исключения влияния слипаний на достоверность УЗК в конструкцию СШ введена [41] проточка размером  $0,13^{+0,025} \times 0,13^{+0,025}$  мм. Схема разделки шва с проточкой приведена на рис. 2. Проточка является физическим индикатором проплавления корня СШ. Если проплавления не произошло, то проточка служит хорошим отражателем ультразвуковых волн.

Схема системы УЗК приведена на рис. 3, 4. Контроль выполняется в иммерсионной ванне. Сварной шов оболочки расположен горизонтально, оболочка лежит на опоре, которая вращается

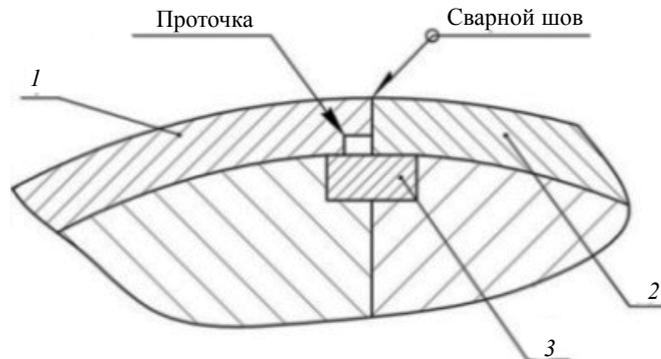


Рис. 2. Схема разделки шва:  
1, 2 — свариваемые оболочки; 3 — подкладное кольцо.

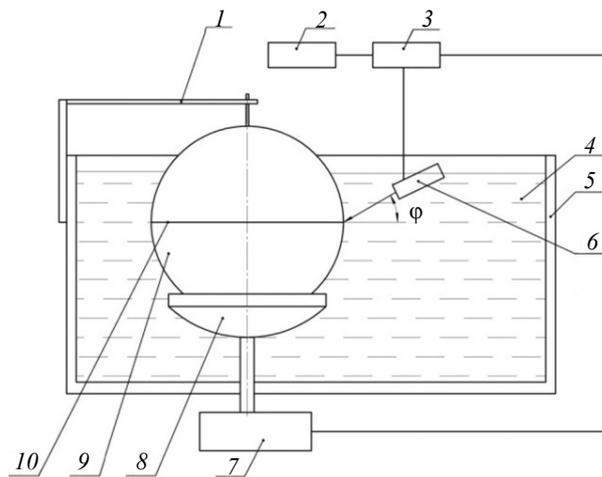


Рис. 3. Схема системы УЗК (поперечное прозвучивание):

1 — кронштейн; 2 — компьютер; 3 — дефектоскоп; 4 — иммерсионная жидкость; 5 — ванна; 6 — ПЭП; 7 — двигатель; 8 — опора; 9 — оболочка; 10 — СШ.

двигателем вокруг вертикальной оси, ультразвуковой пучок ПЭП направлен поперек (рис. 3) либо вдоль (рис. 4) сварного шва с углом падения  $\varphi$  ( $\Delta X$  и  $\Delta Y$  — величины перемещения ПЭП для создания необходимого угла ввода УЗ волн).

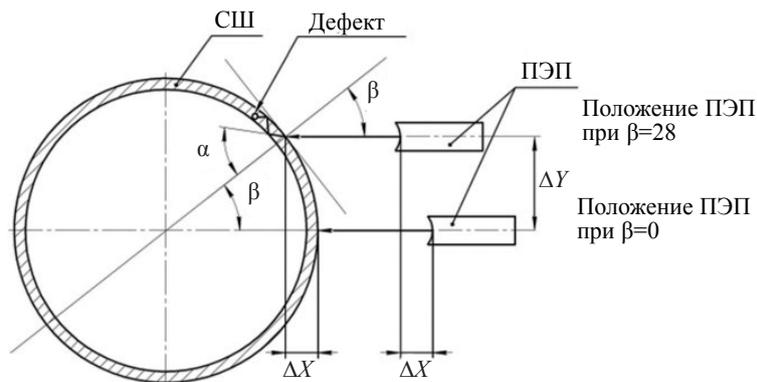


Рис. 4. Схема системы УЗК (продольное прозвучивание).

Настройка положения ПЭП относительно контролируемого изделия выполняется с помощью механического манипулятора. Манипулятор позволяет перемещать ПЭП в трех направлениях, изменять угол наклона в вертикальной плоскости. При поперечном прозвучивании используется ПЭП со сферической фокусировкой, при продольном — с цилиндрической при ориентации фокусной линии поперек шва. Поперечное прозвучивание позволяет выявлять непровары СШ и трещины, ориентированные преимущественно вдоль сварного шва, продольное — поры и трещины, ориентированные преимущественно поперек сварного шва.

Перед выполнением УЗК выполняется настройка чувствительности дефектоскопа и установка геометрического положения ПЭП. Для этого используются испытательные образцы, изготовленные по КД контролируемых изделий. СШ испытательных образцов выполнены на различных режимах сварки, обеспечивающих локальные непровары. Для настройки чувствительности УЗК на сварном шве испытательных образцов выполнены калибровочные отверстия со сферическим дном диаметром 1 мм, глубиной 0,4 мм, залитые эпоксидным компаундом. Настройка геометрического положения ПЭП при поперечном прозвучивании выполняется по максимуму эхо-сигнала от непровара (проточки). При продольном прозвучивании настройка положения ПЭП выполняется по максимуму эхо-сигнала от отверстия. Настройка дефектоскопов по калибровочным отверстиям используется достаточно широко и рассмотрена, например, в [82, 83].

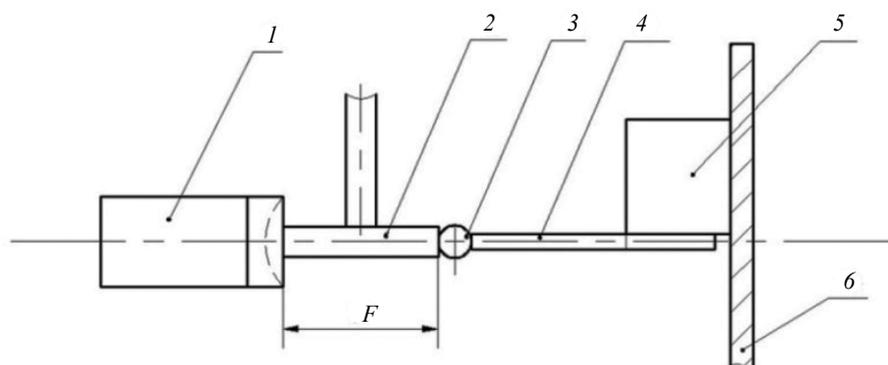


Рис. 5. Схема настройки ПЭП по шарiku:

1 — ПЭП; 2 — шаблон; 3 — шарик; 4 — ферромагнитная проволока; 5 — постоянный магнит; 6 — стенка ванны.

Уровень эхо-сигнала от калибровочных отверстий при первичной аттестации и периодическом освидетельствовании испытательных образцов оценивается сравнением эхо-сигналов от отверстия и от стандартного отражателя. В качестве стандартного отражателя используется стальной шарик диаметром 1 мм [84]. Шарик (поз. 3 рис. 5) крепится к проволоке поз. 4 за счет намагничивания либо при помощи пайки или сварки. Шаблон поз. 2 используется при предварительной установке положения ПЭП относительно шарика ( $F$  — фокусное расстояние ПЭП). Окончательная юстировка выполняется по максимуму эхо-сигнала от шарика последовательными перемещениями ПЭП в трех плоскостях.

Контроль СШ оболочки выполняется с помощью дефектоскопа Р163-Л8, имеющего расширенные возможности работы с волнами Лэмба. В частности, в программное обеспечение прибора включена функция анализа сигналов волн одновременно по времени и частоте (вейвлет-анализ). Это позволяет детализировать частотно-скоростные зависимости мод для правильного подбора фильтров. Прецизионная фильтрация сигналов осуществляется по частоте с шагом 1 МГц и по времени с шагом 10 нс.

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТРОЛЯ

Возможности УЗК оценивались путем сканирования СШ, выполненных на разных режимах сварки (имеющих различную глубину провара). Результаты ультразвукового сканирования сопоставляли с данными металлографического анализа СШ. Участки шва с непроваром разламывали вдоль, на проваренных участках делали поперечные шлифы. Фотографии шлифов характерных дефектов приведены на рис. 6.



Рис. 6. Фотографии шлифов дефектов СШ:

а — поперечный шлиф, пора диаметром 0,1 мм; б — продольный разлом, непровар 0,3 мм; в — поперечный шлиф, качественный СШ.

На рис. 7 показана дефектограмма СШ с различными режимами сварки, полученная при поперечном прозвучивании. Уровень УЗ сигнала на дефектограмме в зонах непровара (режимы сварки: 0 мА; 1,5 мА) значительно превышает уровень сигнала в зонах провара. Сигнал от калибровочного отверстия на дефектограмме не виден, поскольку при настройке на максимум сигнала от непровара, отверстие вышло из зоны распространения УЗ пучка. Дефектограмма СШ при продольном прозвучивании показана на рис. 8. На дефектограмме выделяются всплески сигнала от калибровочного отверстия и поры диаметром 0,3 мм. В правой части дефектограммы наблю-

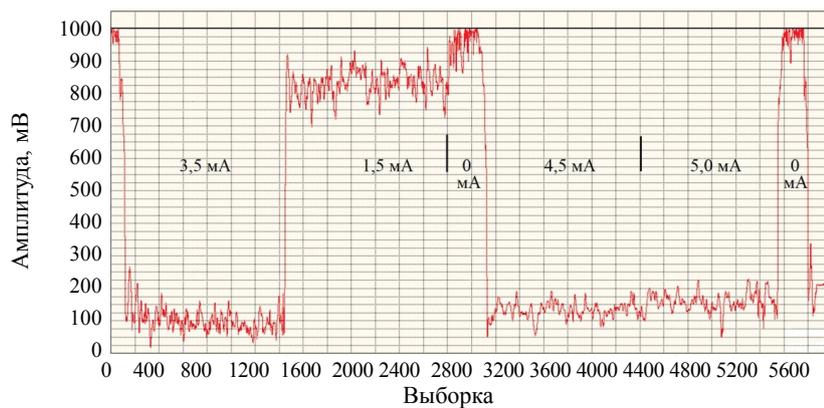


Рис. 7. Дефектограмма СШ при поперечном прозвучивании.

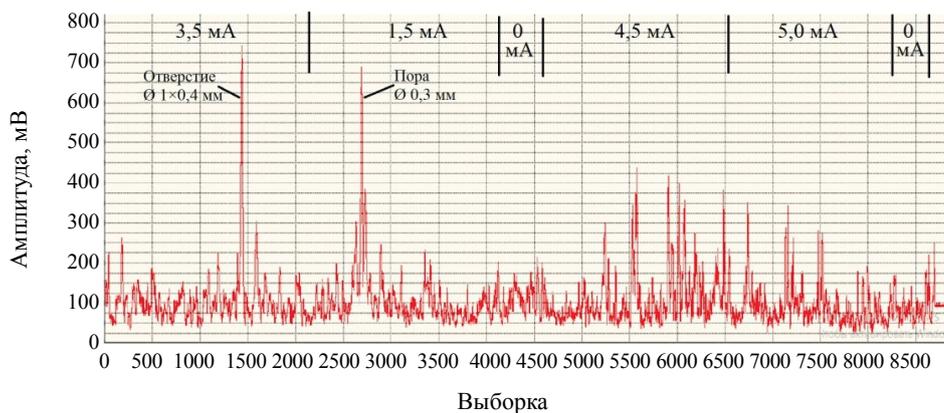


Рис. 8. Дефектограмма СШ при продольном прозвучивании.

дается серия всплесков от скопления пор меньшего диаметра, а также шум от поверхности (чешуйчатости) СШ.

Метрологическая оценка чувствительности методики УЗК показала, что она позволяет при продольном и поперечном сканировании СШ выявлять с достоверностью не хуже 0,95 участки с непроваренной проточкой протяженностью от 0,3 мм и поры диаметром от 0,3 мм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показали эффективность применения проточки в качестве индикатора непровара при УЗК сплавов, склонных к слипанию. Проточка размером  $0,13^{+0,025} \times 0,13^{+0,025}$  мм уверенно выявляется волной Лэмба а0 с помощью сферически сфокусированного преобразователя на частоте 5 МГц. Высокая информативность сигнала волн достигнута с применением вейвлет-анализа и прецизионных цифровых фильтров с малым шагом — 1 МГц по частоте и 10 нс по времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Издательство иностранной литературы, 1957. 726 с.
2. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухорукий А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.
5. Кайно Г. Акустические волны. М.: Мир, 1990. 656 с.
6. Крауткремер И., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. М.: Металлургия, 1991. 340 с.

7. Шербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 496 с.
8. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2008. 864 с.
9. Дерябин А.А. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2008. 113 с.
10. Лошицкий А.Р. Теоретические исследования распространения волн Лэмба в упругих пластинах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: ЗАО ЦНИИОМТП, 2001. 121 с.
11. Коробов А.И., Изосимова М.Ю. Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 5. С. 683—692.
12. Кузнецов С.В. Волны Лэмба в анизотропных пластинах (обзор) // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 1. С. 90—100.
13. Ильяшенко А.В., Кузнецов С.В. Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 3—21.
14. Перов Д.В., Ринкевич А.Б. Локализация отражателей в пластинах при ультразвуковом контроле волнами Лэмба // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 27—41.
15. Бурков М.В., Еремин А.В., Любутин П.С., Бяков А.В., Панин С.В. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для контроля состояния образцов алюминиевого сплава В96ц3Т12 // Дефектоскопия. 2017. № 12. С. 3—15.
16. Казаков В.В. Обнаружение и определение положения трещины в пластине нелинейно-модуляционным методом с использованием волн Лэмба // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 7. С. 555—565.
17. Бурков М.В., Любутин П.С., Бяков А.В. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для обнаружения малозаметных ударных повреждений углепластиков // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 3—15.
18. Авершьева А.В., Кузнецов С.В. Численное моделирование распространения волн Лэмба в изотропном слое // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2019. Т. 15. № 2. С. 14—23.
19. Бархатов В.А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 28—55.
20. Алешин Н.П., Дерябин А.А. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба // Контроль. Диагностика. 2008. № 2. С. 30—33.
21. Буркин С.П., Серебряков А.В., Марков А.Д., Серебряков А.В. Совершенствование техники ультразвукового контроля труб малого диаметра // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 12. С. 45—49.
22. Дерябин А.А., Ремизов А.Л., Прилуцкий М.А. Твердотельная модель дифракции волн Лэмба при наличии трещиноподобных дефектов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 11-1. С. 98—106.
23. Дерябин А.А., Ремизов А.Л., Прилуцкий М.А. Твердотельная модель дифракции волн Лэмба при наличии объемных дефектов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-1. С. 77—82.
24. Бурков М.В., Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Еремин А.В. Применение ультразвукового метода с использованием волн Лэмба для контроля состояния алюминиевых сплавов. Ч. 1. Статические механические испытания // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 6-2. С. 25—30.
25. Бурков М.В., Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Еремин А.В. Применение ультразвукового метода с использованием волн Лэмба для контроля состояния алюминиевых сплавов. Ч. 2. Циклические механические испытания // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 6-2. С. 31—35.
26. Копытов Д.В., Кузнецов М.Н., Бабенков М.В., Гуревич Д.В. Опыт применения ультразвукового сканирования с помощью волн Лэмба при контроле днищ резервуаров // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 12. С. 4—6.
27. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 3—11.
28. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информационные параметры волн Лэмба // Сталь. 2016. № 10. С. 75—79.
29. Евдокимов А.А. Распределение и движение корней дисперсионного уравнения для волн Лэмба в комплексной плоскости // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. №3. С. 30—37.

30. Нурбхай М., Диксит А., Мисра Р.К. Моделирование методом конечных элементов распространения волн Лэмба в 3D-пластинах и латунных трубах для обнаружения повреждений // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 81.

31. Исхужин Р.Р., Атавин В.Г. Определение оптимального угла возбуждения волн Лэмба с применением фазированной антенной решетки / XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. 364 с.: ил.

32. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Golubev E.V. Thickness Gauging of Thin Metalware with Ultrasound Excited by Laser Nanopulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 3. P. 147—150. [Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Голубев Е.В. Измерение толщины тонких металлоизделий с помощью ультразвука, возбуждаемого лазерными наноимпульсами // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 3—6.]

33. Зе-Ю Дон, Хай-Тао Ван, Сиань-Мин Ян, Синь Ли, Джун Шу, Мэн Хао Цзян. Исследование по оценке толщины корабельных палубных балок методом на основе волн Лэмба // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 10—20.

34. Григорьевский В.И., Козлов А.И., Плесский В.П., Терешков В.П. Расчет дисперсионных кривых мод Лэмба в пластинах ниобата лития YZ-среза // Акустический журнал. 1985. Т. 37. № 1. С. 42—44.

35. Бархатов В.А. Решение одномерной обратной акустической задачи с учетом дисперсии скорости звука и частотно-зависимого затухания волн // Дефектоскопия. 2009. № 1. С. 40—53.

36. Терентьев Д.А., Попков Ю.С. Определение параметров дисперсионных кривых волн Лэмба при помощи преобразования Хафа спектрограммы АЭ-сигнала // Дефектоскопия. 2014. № 1. С. 25—36.

37. Захаров Д.Д. Параметрический анализ комплексных дисперсионных кривых изгибных волн Лэмба для слоистых пластин в низкочастотном диапазоне // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 4. С. 395—410.

38. Hu Y., Zhu Y., Tu X., Lu J., Li F. Dispersion curve analysis method for Lamb wave mode separation // Structural Health Monitoring. 2020. 19(5). P. 1590—1601. <https://doi.org/10.1177/1475921719890590>

39. Zima B., Kedra R. Numerical study of concrete mesostructure effect on lamb wave propagation // Materials. 2020. 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112570>

40. Zhang Y., Qian Z., Wang B. Modes control of lamb wave in plates using meander-line electromagnetic acoustic transducers // Applied Sciences (Switzerland). 2020. 10 (10). <https://doi.org/10.3390/app10103491>

41. Iskhuzhin R. R., Borisov V. N., Atavin V. G., Uzkiikh A. A. Khafizova K. K. Ultrasonic testing of thin-walled titanium weld joint with adhesion detector // Journal of Physics: Conference Series. V. 1636. The XXII Russian National Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics «Transformation of Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in the Era of Digitalization. Society Security in a Changing World» RNCNDTTD (2020) 3—5 March 2020, Moscow, Russian Federation. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1636/1/012004>

42. Gao F., Wang L., Hua J., Lin J., Mal A. Application of Lamb wave and its coda waves to disbond detection in an aeronautical honeycomb composite sandwich // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. V. 146. P. 107063. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107063>

43. He J., Huo H., Guan X., Yang J. A Lamb wave quantification model for inclined cracks with experimental validation // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.02.010>

44. Hua J., Cao X., Yi Y., Lin J. Time-frequency damage index of Broadband Lamb wave for corrosion inspection // Journal of Sound and Vibration. V. 464. P. 114985. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114985>

45. Zhang Z., Pan H., Wang X., Lin Z. Machine learning-enriched lamb wave approaches for automated damage detection // Sensors (Switzerland). 2020. 20 (6). P. 1790. <https://doi.org/10.3390/s20061790>

46. Zhu W.G., Li Y.F., Guan L.Q., Wan X.L., Yu H.Y., Liu X.Z. Micro-crack detection of nonlinear Lamb wave propagation in three-dimensional plates with mixed-frequency excitation // Chinese Physics B. 29 (1). P. 014302. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab5931>

47. Jiao P., Egbe K.-J.I., Xie Y., Matin Nazar A., & Alavi A.H. Piezoelectric Sensing Techniques in Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review // Sensors (Switzerland). 2020. 20 (13). P. 3730. <https://doi.org/10.3390/s20133730>

48. Rébillat M., Mechbal N. Damage localization in geometrically complex aeronautic structures using canonical polyadic decomposition of Lamb wave difference signal tensors // Structural Health Monitoring. 2020. 19 (1). P. 305—321. <https://doi.org/10.1177/1475921719843453>

49. Wan T., Chang J., Zeng X., Li Y. Damage identification and scanning imaging of glass fiber reinforced polymer composite plates based on empirical mode decomposition and correlation coefficient. Fuhe Cailiao Xuebao // Acta Materiae Compositae Sinica. 2020. 37 (8). P. 1921—1931. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191031.003>

50. Fromme P. Guided wave sensitivity prediction for part and through-thickness crack-like defects // Structural Health Monitoring. 2020. 19 (3). P. 953—963. <https://doi.org/10.1177/1475921719892205>

51. Liu B., Liu T., Zhao J., Hang D. Frequency Aliasing-Based Spatial-Wavenumber Filter for Online Damage Monitoring // Shock and Vibration. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8856241>

52. Xiao W., Yu L., Joseph R., Giurgiutiu V. Fatigue-crack detection and monitoring through the scattered-wave two-dimensional cross-correlation imaging method using piezoelectric transducers // Sensors (Switzerland). 2020. 20 (11). P. 3035. <https://doi.org/10.3390/s20113035>

53. *Hu C., Yang B., Xuan F. Z., Yan J., Xiang Y.* Damage orientation and depth effect on the guided wave propagation behavior in 30CrMo steel curved plates // *Sensors (Switzerland)* 2020. 20 (3). P. 849. <https://doi.org/10.3390/s20030849>
54. *Chen B., Wang C., Wang P., Zheng S., Sun W.* Research on Fatigue Damage in High-Strength Steel (FV520B) Using Nonlinear Ultrasonic Testing // *Shock and Vibration*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8847704>
55. *Ewald V., Groves R., Benedictus R.* Integrative approach for transducer positioning optimization for ultrasonic structural health monitoring for the detection of deterministic and probabilistic damage location // *Structural Health Monitoring*. 2020. <https://doi.org/10.1177/1475921720933172>
56. *Serey V., Quaegebeur N., Renier M., Micheau P., Masson P., Castaings M.* Selective generation of ultrasonic guided waves for damage detection in rectangular bars // *Structural Health Monitoring*. 2020. <https://doi.org/10.1177/1475921720947407>
57. *Nicassio F., Carrino S., Scarselli G.* Non-linear Lamb Waves for Locating Defects in Single-Lap Joints // *Frontiers in Built Environment*. 2020. 6 (45). <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00045>
58. *Dafydd I., Sharif Khodaei Z.* Analysis of barely visible impact damage severity with ultrasonic guided Lamb waves // *Structural Health Monitoring*. 2020. 19 (4). P. 1104—1122. <https://doi.org/10.1177/1475921719878850>
59. *Li J., Sharif Khodaei Z., Aliabadi M. H.* Boundary element modelling of ultrasonic Lamb waves for structural health monitoring // *Smart Materials and Structures*. 2020. 29 (10). P. 105030. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aba6ce>
60. *Liu Y., He A., Liu J., Mao Y., Liu X.* Location of micro-cracks in plates using time reversed nonlinear Lamb waves // *Chinese Physics B*. 2020. 29 (5). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab81f7>
61. *Xu C., Yang Z., Qiao B., Chen X.* A parameter estimation based sparse representation approach for mode separation and dispersion compensation of Lamb waves in isotropic plate // *Smart Materials and Structures* 2020. 29 (3). P. 035020. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ab6ce7>
62. *Chen X., Ni L.* Mode separation for multimode Lamb waves overlapped in time and frequency domains by using fractional differential. *Shengxue Xuebao* // *Acta Acustica*. 2020. 45 (2). P. 205—214. <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180561>
63. *He C., Ren Z., Lyu, Y., Gao J., Wang S., Song G.* Reflection/transmission characteristics based on Legendre orthogonal polynomial method. *Beijing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao* // *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2020. 46 (7). P. 1258—1266. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0434>
64. *Attar L., Leduc D., Ech Cherif El Kettani M., Predoi M. V., Galy J., Pareige P.* Detection of the degraded interface in dissymmetrical glued structures using Lamb waves // *NDT and E International*. 2020. V. 111. P. 102213. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102213>
65. *Ismail N., Hafizi Z.M., Nizwan C.K.E., Ali S.* Interactions of Lamb Waves with Defects in a Thin Metallic Plate Using the Finite Element Method / In: Zakaria M., Abdul Majeed A., Hassan M. (eds.) *Advances in Mechatronics, Manufacturing, and Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7309-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7309-5_19)
66. *Tie Y., Zhang Q., Hou Y., Li C.* 2020. Impact damage assessment in orthotropic CFRP laminates using nonlinear Lamb wave: Experimental and numerical investigations // *Composite Structures*. 2020. V. 236. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111869>
67. *Chen H., Zhang G., Fan D., Fang L., Huang L.* Nonlinear Lamb wave analysis for microdefect identification in mechanical structural health assessment. *Measurement* // *Journal of the International Measurement Confederation*. 2020. V. 164. P. 108026. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108026>
68. *Zhou K., Xu X., Wu Z.* Damage detection with single mode lamb wave based on piezoelectric transducers // *Yadian Yu Shengguang/Piezoelectrics and Acoustooptics*. 2020. 42 (1). P. 38—41. <https://doi.org/10.11977/j.issn.1004-2474.2020.01.010>
69. *Haidar M. F., Joseph R., Giurgiutiu V., Poddar B.* An efficient analytical global–local (AGL) analysis of the Lamb wave scattering problem for detecting a horizontal crack in a stiffened plate // *Acta Mechanica*. 2020. 231 (2). P. 577—596. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02555-z>
70. *Liu H., Zhang Y.* Deep learning based crack damage detection technique for thin plate structures using guided lamb wave signals // *Smart Materials and Structures*. 2020. 29 (1). P. 015032. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab58d6>
71. *Borate P., Wang G., Wang Y.* Data-Driven Structural Health Monitoring Approach Using Guided Lamb Wave Responses // *Journal of Aerospace Engineering*. 2020. 33 (4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001145)
72. *Jia H., Liu H., Zhang Z., Dai F., Liu Y., Leng J.* A baseline-free approach of locating defect based on mode conversion and the reciprocity principle of Lamb waves // *Ultrasonics*. 2020. V. 102. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106063>
73. *Tai S., Kotobuki F., Wang L., Mal A.* Modeling Ultrasonic Elastic Waves in Fiber-Metal Laminate Structures in Presence of Sources and Defects // *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*. 2020. 3 (4). <https://doi.org/10.1115/1.4046946>

74. Bahador M. M., Zaimbashi A., Rahgozar R. Three-stage Lamb-wave-based damage localization algorithm in plate-like structures for structural health monitoring applications // *Signal Processing*. 2020. V. 168. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107360>
75. Wang X., Xiang Y., Zhu W. J., Ding T. T., Li H. Y. Damage assessment in Q690 high strength structural steel using nonlinear Lamb waves // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117384>
76. Purcell F.A., Eaton M., Pearson M.R., Pullin R. Non-destructive evaluation of isotropic plate structures by means of mode filtering in the frequency-wavenumber domain // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. V. 142. P. 106801. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2020.106801>
77. Li J., Lu Y., Lee Y. F. Debonding detection in CFRP-reinforced steel structures using anti-symmetrical guided waves // *Composite Structures*. 2020. V. 253. P. 112813. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112813>
78. Lee Y.F., Lu Y., Guan R. Nonlinear guided waves for fatigue crack evaluation in steel joints with digital image correlation validation // *Smart Materials and Structures*. 2020. 29 (3). P. 035031. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab6fe7>
79. Alnuaimi H., Amjad U., Russo P., Lopresto V., Kundu T. Monitoring damage in composite plates from crack initiation to macro-crack propagation combining linear and nonlinear ultrasonic techniques // *Structural Health Monitoring*. 2020. <https://doi.org/10.1177/1475921720922922>
80. Weiland J., Hesser D. F., Xiong W., Schiebahn A., Markert B., Reisgen U. Structural health monitoring of an adhesively bonded CFRP aircraft fuselage by ultrasonic Lamb Waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G // Journal of Aerospace Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1177/0954410020950511>
81. Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites, *Research Topics in Aerospace*, R. Lammering et al. (eds.) / Springer International Publishing AG. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49715-0>
82. Могильнер Л.Ю. Применение цилиндрического отражателя для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле // *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 27—36.
83. Mogilner L.Yu., Smorodinskii Ya.G. Ultrasonic Flaw Detection: Adjustment and Calibration of Equipment Using Samples with Cylindrical Drilling // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 9. P. 630—637. [Могильнер Л.Ю., Смородинский Я.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: настройка и проверка оборудования по образцам с цилиндрическим сверлением // *Дефектоскопия*. 2018. № 9. С. 14—20.]
84. ГОСТ 3722—2014. Подшипники качения. Шарики стальные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

# ДИАГНОСТИКА УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МОНОЛИТНЫХ И СОТОВЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ЛЭМБА

© 2021 г. М. В. Бурков<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Еремин<sup>1,2,\*\*</sup>, А. В. Бяков<sup>1</sup>,  
П. С. Любутин<sup>1</sup>, С. В. Панин<sup>1,2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055 Томск, пр. Академический, 2/4

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, 634030 Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: \*burkovispm@mail.ru; \*\*ave@ispm.ru; \*\*\*svp@ispm.ru

Поступила в редакцию 26.11.2020; после доработки 15.12.2020

Принята к публикации 25.12.2020

Представлены результаты использования методики на основе ультразвуковых волн Лэмба для обнаружения ударных повреждений углепластиков и определения степени их критичности. В качестве основы выступает сеть наклеенных на поверхность пьезопреобразователей, которая работает в переменном режиме, позволяя поочередно менять функцию преобразователей (источник/приемник) для регистрации отклика сети в результате прохождения тестового сигнала. Анализ результатов мониторинга осуществляется посредством сравнения трех параметров: изменение амплитуды ( $dA$ ), изменение энергии ( $dP$ ) и нормированный коэффициент корреляции ( $NCC$ ) сигналов в базовом неповрежденном и текущем поврежденном состояниях. Испытания монолитных углепластиков показывают, что точность обнаружения повреждения составляет 5—15 мм, в то время как рассчитанный индекс поврежденности линейно зависит от приложенной энергии удара. Для сотовых углепластиков  $NCC$  не дает точных результатов, однако другие параметры позволяют идентифицировать повреждения с погрешностью 5—20 мм и отражают данные о степени повреждения.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, мониторинг состояния, ультразвуковой контроль, волны Лэмба, ударные повреждения, углепластики.

**DOI:** 10.31857/S0130308221020044

## ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающий контроль — это область науки и техники, которая крайне важна для безопасной эксплуатации во многих отраслях промышленности. Но обеспечение безопасности с помощью неразрушающего контроля, часто требует вывода объекта контроля из эксплуатации и приносит экономические потери из-за простоев. Поэтому, в отраслях, где требуется надежная оценка целостности конструкции, большое значение приобретает концепция встроенного мониторинга состояния — SHM [1—4]. Разработка таких систем в авиакосмической отрасли — серьезная научная и инженерная задача, которая получила дополнительный импульс после создания самолетов с широким использованием композитов (Boeing 787 и Airbus A350XWB) в основных несущих конструкциях: крыльях, фюзеляже, оперении и др. Самолет при эксплуатации испытывает большое количество внешних ударных воздействий: мусор при разгоне по ВПП, град, удары птиц, низкое качество или неправильное обслуживание. Использование композитов показало, что такие удары приводят к образованию дефектов, подавляющее большинство которых классифицируются как малозаметные ударные повреждения (barely-visible impact damage — BVID) и не приводят к необходимости экстренной остановки эксплуатации. В углепластике они представляют собой сложные внутренние структурные дефекты, сочетающие расслоение, разрыв и вырыв волокон, а также растрескивание матрицы. Однако далее из-за эксплуатационной нагрузки и воздействия окружающей среды такие повреждения могут увеличиваться до больших размеров, усложняя ремонт или даже становясь угрозой для несущей способности конструкции. Таким образом, системы мониторинга, которые встроены в конструкцию и своевременно предоставляют данные о возникновении повреждений, имеют большое значение в том числе и в авиакосмической сфере.

Ученые и инженеры исследуют различные физические принципы, которые можно использовать в качестве основы для создания систем SHM: вибрации [5—7], ультразвуковые волны [8], термографию [9, 10], вихревые токи [11, 12], электромагнетизм [13] и др. В случае авиакосмической отрасли задача разработки SHM усложняется из-за жестких ограничений веса самолета: установленные датчики, провода и электроника могут свести на нет преимущества применения SHM [14, 15]. При этом взаимопротивоположные требования по минимизации веса и высокой безопасности способствуют использованию самых высокотехнологичных решений. Например, в аэрокосмической сфере рассматривается акустическая эмиссия [16—20], оптоволоконные датчики деформации [21—23] и другие методы, которые могут использоваться в системах монито-

ринга. Искусственные нейронные сети активно изучаются для обработки данных и обеспечения эффективного принятия решения. В последнее время все большее количество работ посвящается исследованию ультразвуковых волн Лэмба [24, 25]. Из-за низкого затухания эти волны могут преодолевать большие расстояния, что чрезвычайно важно в авиастроении, где площадь обшивки из углепластика может быть очень большой. УЗ волны Лэмба широко изучаются для обнаружения ударных повреждений композитов [26, 27]; исследуются оптимальные сети преобразователей [28—30]. Однако физический механизм распространения волн Лэмба довольно сложен [31, 32], так как зависит от многих факторов: свойств материала, геометрии объекта контроля, геометрии преобразователя и частоты. В тоже время при непосредственном контроле состояния конструкции в процессе эксплуатации необходимо также учитывать стабильность адгезионного слоя и ухудшение его свойств [33, 34], температурные отклонения [35, 36], возможный отказ датчиков [37] и т. д., так как это будет существенно сказываться на качестве получаемых данных и надежности контроля.

Предлагаемая в данной работе методика контроля ударных повреждений была разработана авторами ранее и применена на образце сотового композита [38, 39]. Была проведена отработка алгоритма с использованием имитаторов повреждений, а также при выполнении последовательных многократных ударов по одной панели.

Представленная статья является результатом исследования методики на иных материалах и с измененной процедурой проведения контроля. Целью данной работы являлось исследование алгоритмов обнаружения ударных повреждений различной энергии в монолитных и сотовых углепластиков с использованием метода на основе волн Лэмба.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью тестирования УЗ методики для обнаружения малозаметных ударных повреждений использовались образцы двух типов. Первый тип представляет собой монолитный углепластик со следующей укладкой:  $[90_G/(0/-45/90/+45/0)]_3S$ . Образцы были изготовлены из однонаправленных углеродных препрегов с использованием вакуумного формования и формования в автоклаве (на внешних поверхностях углепластика был нанесен защитный слой из стекловолокна, обозначенный буквой «G»). Общая толщина 32-слойного углепластика составляет 5,2 мм. Размер образца  $300 \times 300 \text{ мм}^2$ . Эти образцы будут далее обозначаться буквой «М».

Второй образец представляет собой трехслойный сэндвич с алюминиевым сотовым наполнителем и обшивками из углепластика со следующей укладкой:  $[90_G/0/-45/90/+45/0]_3S$ . Каждая 12-слойная обшивка имеет толщину около 1,7 мм, а общая толщина образца составляет 18,2 мм. Размер —  $300 \times 300 \text{ мм}^2$ . В дальнейшем образцы будут обозначены как «С».

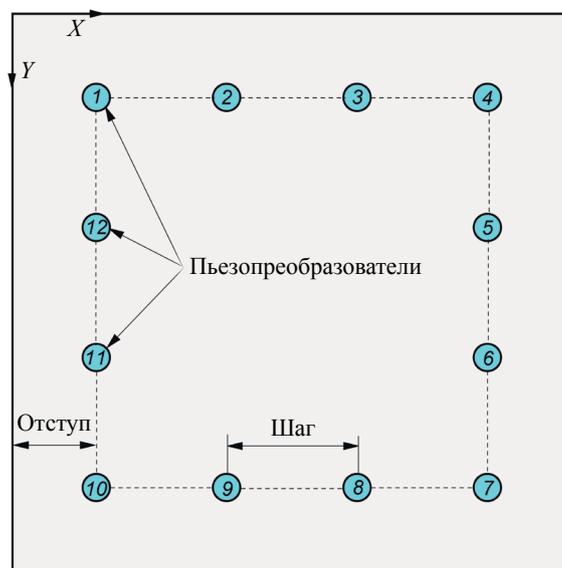


Рис. 1. Эскиз образца с сетью пьезопреобразователей (PZT).

Каждый образец был оснащен двумя сетями пьезопреобразователей (на передней поверхности, подвергнутой удару, и на обратной поверхности), каждый из которых мог выступать в качестве генератора или приемника. Сеть имела размеры  $4 \times 4$  со смещением 45 мм от границы образца и шагом 70 мм. Эскиз, изображающий сеть PZT, показан на рис. 1. В качестве преобразователей используются датчики Audiowell AW1E12G-190EFL1Z с диаметром 9 мм и толщиной 0,19 мм керамического слоя, нанесенного на стальную подложку. Использование двух одинаковых сетей PZT на обеих поверхностях позволяет оценить возможность обнаружения повреждений внешней поверхности конструкции с помощью системы, установленной внутри и защищенной от воздействия окружающей среды. Это очень важно для сотового углепластика, который имеет более высокое затухание ультразвуковых волн, проходящих от одной оболочки к другой через алюминиевую сотовую сердцевину. Для приклеивания преобразователей к поверхности образцов углепластика использовался эпоксидный клей 3M DP490.

В качестве тестового сигнала использована 5-цикловая синусоида, модулированная с помощью окна Хеннинга. Частотное распределение такого сигнала позволяют получить существенно меньшую дисперсию волны в процессе распространения по сравнению с обычным синусоидальным или ступенчатым сигналом. Это облегчает интерпретацию полученных результатов, так как при малой дисперсии легче разделять составляющие зарегистрированных сигналов: например, прямое прохождение волны и отражения от границ. В качестве источника сигналов и регистратора используются генератор сигналов произвольной формы AWG-4105 и 4-канальный USB-осциллограф Handyscope HS4 соответственно. AWG-4105 позволяет генерировать сигналы с амплитудой 10 В, чего достаточно для экспериментальной проверки ультразвуковой техники на образцах углепластика размером  $300 \times 300$  мм<sup>2</sup>. Однако величина принимаемого сигнала для сотового образца была недостаточной, поэтому перед осциллографом использовался высококачественный усилитель.

В ходе предварительных испытаний пар «генератор—приемник», наклеенных на поверхность образцов углепластика, были выбраны частоты 100 и 300 кГц. По литературным данным дисперсионных кривых волн Лэмба и моделирования распространения волн в программе LAMSS-Composites [40] было установлено, что частота 100 кГц соответствует моде A<sub>0</sub> с длиной волны 18 мм, а мода S<sub>0</sub> пренебрежимо мала. Тогда как на частоте 300 кГц S<sub>0</sub> генерируется намного лучше (датчик диаметром 9 мм сопоставим с половиной длины волны). Однако A<sub>0</sub> также генерируется, но имеет гораздо меньшую амплитуду. Конечно, длина волны моды A<sub>0</sub> на частоте 100 кГц довольно велика по сравнению с размером сформированных BVID, но ожидается, что волны Лэмба будут взаимодействовать с такими дефектами с повышенным затуханием. Это вызвано снижением жесткости материала и появлением новых границ раздела сред в области дефектов, таких как расслоение, растрескивание матрицы, разрыв волокон.

Необходимо отметить, что обзор литературы [41], а также тесты, проведенные авторами ранее, показывают, что разница в расчетных скоростях волн в направлениях 0 и 90 составляет 1—3 % и, следовательно, нет необходимости учитывать анизотропию при контроле композитов с квази-изотропной укладкой.

Для увеличения отношения  $S/N$  проводили осреднение 100 сигналов. Регистрация сигнала осциллографом HS4 запускалась триггерным сигналом от генератора, направляемого на первый канал осциллографа. Три оставшихся канала использовались для сбора данных. Каждое положение генератора (один из 12 датчиков) требует сбора данных с 11 датчиков, поэтому был разработан блок реле для последовательной регистрации данных со всех датчиков. Блок реле позволяет изменять положение генератора, что упрощает процедуру эксперимента. Всего в сети  $4 \times 4$  может быть зарегистрировано 132 сигнала для всех комбинаций пар «генератор—приемник». Использование двух частот и тестирование двух сторон приводит к получению набора из 528 сигналов при контроле одного образца.

Предлагаемая методика тестировалась на возможности определения местоположения и степени критичности ударных повреждений различных энергий. Образцы подвергали ударам в соответствии со стандартом ASTM D7136 с использованием методики падающего груза: ударный элемент весом 2 кг, имеющий полусферический ударный наконечник диаметром 16 мм. Энергия удара составляла 10, 15 и 20 Дж для монолитных образцов, в то время как сотовые углепластики подвергались воздействию ударов с энергией 2 и 4 Дж.

Перед нанесением ударных повреждений производилась регистрация состояния образцов при помощи ультразвуковых данных для базового состояния образцов. После удара та же процедура проводилась для поврежденного состояния. Математическое сравнение этих сигналов позволяет обнаружить местоположение повреждения и приблизительно оценить его серьезность.

Численная оценка ультразвуковых сигналов для выявления изменений, происходящих из-за ударного повреждения углепластика, проводилась путем расчета информативных параметров (между сигналами для двух состояний — поврежденного и базового): разности максимумов огибающих, нормированного коэффициента корреляции и разности энергий ультразвуковых сигналов.

Вычисление огибающей принятого сигнала выполняется с использованием преобразования Гильберта в частотной области. На первом этапе вычисляется  $n$ -точечное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) сигнала длины  $N$ , и значения спектра  $X(m)$ , соответствующие отрицательной частоте, обнуляются. Значения  $X(0)$  и  $X(N/2)$  делятся на 2. Затем выполняется обратное  $N$ -точечное ДПФ. Сигнал имеет действительную и мнимую части. Значения огибающих определяются как абсолютные значения полученных сигналов. Разница максимумов огибающих  $dA$  рассчитывается следующим образом:

$$dA = \frac{A_{\text{исх}} - A_{\text{пов}}}{A_{\text{исх}}}, \quad (1)$$

где  $A_{\text{исх}}$  — это максимум огибающей для сигнала базового состояния, а  $A_{\text{пов}}$  — максимум огибающей для сигнала поврежденного состояния.

Нормированный коэффициент корреляции получается по следующей формуле:

$$NCC = 1 - \left| \frac{\sum x_{\text{исх}} x_{\text{пов}}}{\sqrt{\sum x_{\text{исх}}^2 \sum x_{\text{пов}}^2}} \right|, \quad (2)$$

где  $x_{\text{исх}}$  и  $x_{\text{пов}}$  — амплитуды сигналов базового и поврежденного состояний соответственно.

Для получения спектра мощности выполняется ДПФ и значения спектра вычисляются по выражению:

$$Pow(i) = 10 \lg \sqrt{X^2(2i) + X^2(2i+1)}, \quad (3)$$

где  $X$  — значения спектра Фурье. Затем для каждого сигнала рассчитывается энергия в диапазоне  $0,4f$ :

$$P = \sum_{-0,4f}^{0,4f} Pow(i), \quad (4)$$

где  $f$  — точка, соответствующая центральной частоте сигнала. Затем для двух сигналов вычисляется разность  $dP$ :

$$dP = \frac{P_{\text{исх}} - P_{\text{пов}}}{P_{\text{исх}}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{исх}}$  — это максимум огибающей сигнала базового состояния, а  $P_{\text{пов}}$  — максимум огибающей сигнала поврежденного состояния.

После проведения всех испытаний база данных для каждой тестируемой панели содержит следующую информацию: расположение (координаты) датчиков PZT, набор зарегистрированных сигналов для всех пар «генератор/приемник» и информативные параметры, рассчитанные путем сравнения исходных данных и данных, полученных для поврежденного состояния. Затем с помощью разработанного программного обеспечения данные были обработаны и проанализированы с целью определения места и степени критичности ударного повреждения. Был использован следующий алгоритм обработки:

1) траектории «генератор—приемник» сортируются по убыванию значений  $dA$ ,  $dP$  или  $NCC$  в предположении более высокого затухания из-за наличия повреждений;

2) в сортированном списке выбираются первые  $N$  траекторий (в данной статье для сравнения выбраны 10 и 20 путей);

3) для всех траекторий попарно рассчитываются координаты их точек пересечения;

4) согласно уравнениям (6) и (7) рассчитываются координаты повреждения и его критичность.

Координаты ударных повреждений рассчитываются по формуле:

$$r = \frac{\sum r_i w_i}{\sum w_i}, \quad (6)$$

где  $r_i$  — координаты  $i$ -й точки пересечения траекторий,  $w_i$  — значения выбранных информативных параметров. Степень повреждения оценивается с помощью безразмерного индекса поврежденности ( $DI$ ):

$$DI = \frac{\sum w_i}{n}, \tag{7}$$

где  $w_i$  — значения выбранных информативных параметров,  $n$  — количество траекторий. Чем выше  $DI$ , тем серьезнее повреждение. И координаты повреждения, и  $DI$  могут быть получены с использованием каждого информативного параметра ( $dA$  или  $dP$  или  $NCC$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В разделе представлены экспериментальные результаты, полученные при проведении экспериментов. В табл. 1 сведены данные по энергии и координате удара для исследованных образцов. Для описания схемы работы экспериментальной методики ниже приведены подробные результаты контроля образца M2/20. На рис. 2 изображена сеть PZT 4×4 с заданным в нижнем углу генератором: показаны возможные траектории волн и разности максимумов огибающих между базовым и поврежденным состояниями. Этот пример соответствует  $dA$ , равному 0,41, то есть падению амплитуды на 41 % для пары «генератор—приемник» 10→5 образца M2/20.

Таблица 1

Образцы и параметры удара

Образец	Энергия удара, Дж	X, мм	Y, мм
M1/10	10	180	180
M2/20	20	180	180
M3/10	10	150	220
M4/15	15	150	220
M5/10	10	220	220
M6/15	15	220	220
C1/2	2	180	180
C2/4	4	180	180
C3/2	2	150	220
C4/4	4	150	220
C5/2	2	220	220
C6/4	4	220	220

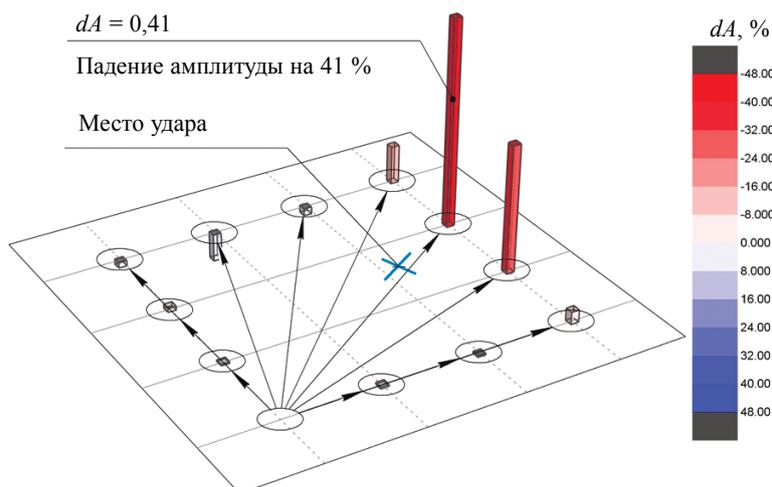


Рис. 2. Пример распределения  $dA$  для образца M2/20с заданной позицией генератора.

Видно, что соседние датчики 4 и 6 показывают снижение амплитуды на 12 и 23 % соответственно. Изменение сигналов при наличии повреждения для других датчиков достаточно мало. Примеры формы тестового сигнала для исходного состояния с соответствующей огибающей для образца М2/20 показаны на верхнем графике на рис. 3. Нижний график описывает огибающие как для базового, так и для поврежденного состояния, а разница между максимумами огибающих представлена графически.

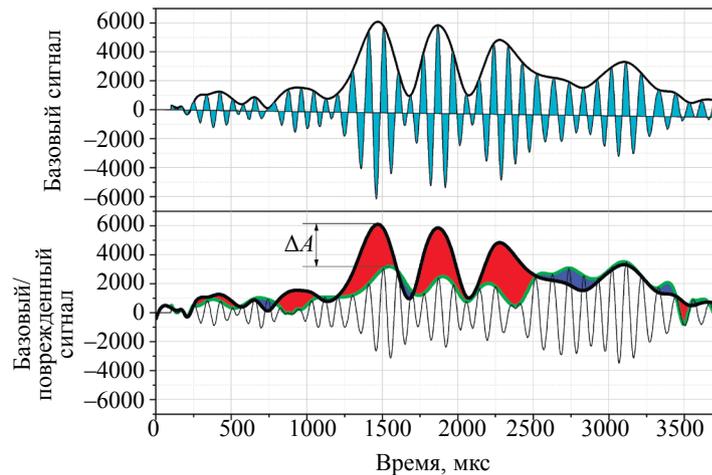


Рис. 3. Форма принимаемого сигнала (верхний график) и графическое представление разности огибающих в базовом и поврежденном состояниях.

На рис. 4 и 5 показаны примеры обнаружения повреждений образцов М3/10 и М4/15, подвергшихся воздействию ударами 10 и 15 Дж соответственно. Каждая цветная точка соответствует прогнозу местоположения повреждения, определенного алгоритмом по формуле (6). Весь массив точек рассчитан для каждой комбинации частоты испытаний, стороны образца углепластика, количества расчетных траекторий и информативного параметра (красный для  $NCC$ ; зеленый для  $dA$ ; синий для  $dP$ ). Таким образом для каждого информативного параметра существует  $2^3=8$  точек прогнозирования местоположения повреждения. Эти точки используются для получения результирующих координат  $X$  и  $Y$ , которые отображаются в виде окружностей с крестом соответствующего цвета.

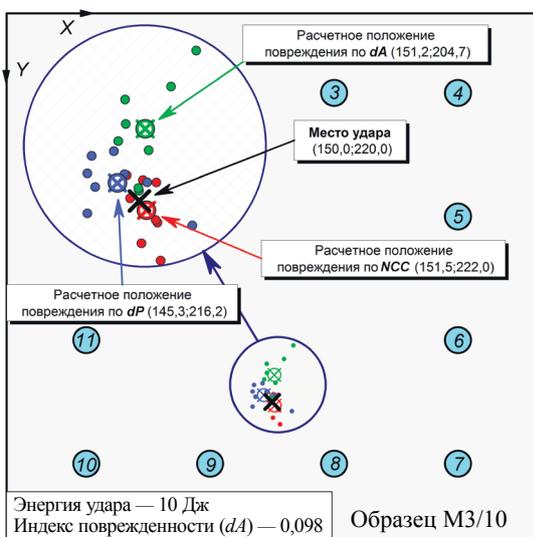


Рис. 4. Результаты экспериментов по обнаружению ударных повреждений образца М3 после удара с энергией 10 Дж.

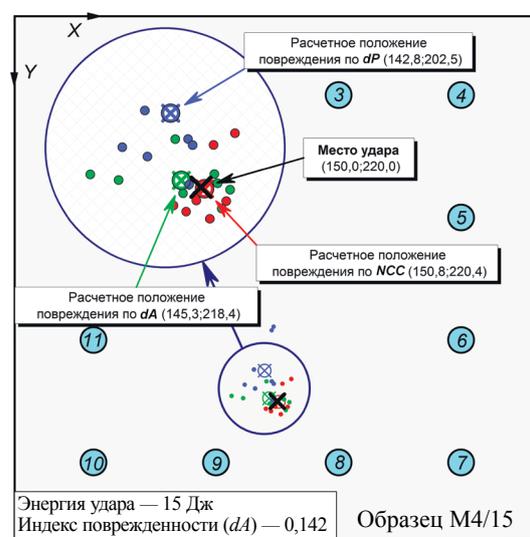


Рис. 5. Результаты экспериментов по обнаружению ударных повреждений образца М4 после удара с энергией 15 Дж.

Количественные результаты для всех монолитных образцов приведены в табл. 2. Видно, что методика позволяет определять место повреждения с погрешностью 5—15 мм. Мониторинг передней стороны (поверхность удара) и задней стороны (противоположная сторона удара) дает аналогичные результаты в отношении прогнозируемого места повреждения. Более того, разброс  $\Delta_{avg}$  (расстояние от места удара до точки, рассчитываемой по методике) для всех используемых параметров практически одинаков, что позволяет сделать вывод, что они могут быть использованы для определения местоположения повреждений. В последнем столбце таблицы показаны индексы поврежденности, рассчитанные по уравнению (7) и усредненные для каждого информативного параметра. Эти  $DI$  имеют разные диапазоны вариации.  $DI_{dA}$  — самый простой для анализа индекс, изменяющийся от 0 до 1, где 0 означает абсолютно неповрежденное состояние, полученное в результате сравнения исходных и поврежденных ультразвуковых данных, в которых отсутствует изменение амплитуд, в то время как 1 получается, если все поврежденные сигналы будут нулевыми. Каждое число от 0 до 1 описывает среднее падение амплитуды сигналов, используемых для определения места повреждения. Аналогично интерпретируется индекс  $DI_{dP}$ , за исключением того, что вместо амплитуды вычисляется и сравнивается энергия сигналов. Оба эти параметра предназначены для обнаружения более высокого затухания волн Лэмба при наличии повреждений.  $DI_{NCC}$  также варьируется в диапазоне от 0 до 1, но демонстрирует иное поведение, поскольку корреляция может изменяться по разным причинам, например, по фазовому сдвигу. Значение 0 данного индекса означает абсолютно неповрежденное состояние, а 1 — поврежденное, но зависимость в этом диапазоне сильно нелинейна. Так  $DI_{NCC}$  для повреждений, полученных от ударов 15 и 20 Дж, достигает 0,8—0,9, но полученные  $BVID$  довольно малы. Таким образом, можно сделать вывод, что  $NCC$  будет иметь очень низкую классификационную способность для более крупных повреждений.

Таблица 2

Результаты испытаний монолитных образцов

Образец	$X, \text{ мм};$ $Y, \text{ мм}$	Параметр	$X_{avg}, \text{ мм}$	$Y_{avg}, \text{ мм}$	$\Delta X_{avg}, \text{ мм}$	$\Delta Y_{avg}, \text{ мм}$	$\Delta_{avg}, \text{ мм}$	$DI$
M1/10	180; 180	$NCC$	176,8	185,7	3,2	-5,6	6,5	0,4
		$dA$	165,3	180,3	14,7	-0,3	14,6	0,092
		$dP$	171,9	177,1	8,1	2,9	8,6	0,000461
M2/20	180; 180	$NCC$	173,4	193,6	6,5	-13,7	15,1	0,82
		$dA$	171,3	185,5	8,7	-5,5	10,3	0,212
		$dP$	164,6	190,9	15,4	-10,1	18,9	0,001210
M3/10	150; 220	$NCC$	151,5	222,0	-1,5	-2,0	2,5	0,59
		$dA$	151,2	204,7	-1,2	15,3	15,4	0,098
		$dP$	145,3	216,2	4,7	3,8	6,0	0,000408
M4/15	150; 220	$NCC$	150,8	220,4	-0,8	-0,4	0,9	0,88
		$dA$	145,3	218,4	4,7	1,6	4,9	0,142
		$dP$	142,8	202,5	7,2	17,5	18,9	0,000613
M5/10	220; 220	$NCC$	216,1	217,0	3,9	2,9	4,9	0,51
		$dA$	217,7	211,5	2,3	8,5	8,8	0,080
		$dP$	209,4	210,4	10,6	9,6	14,3	0,000479
M6/15	220; 220	$NCC$	212,8	218,6	7,2	1,4	7,3	0,82
		$dA$	216,4	224,9	3,6	-4,9	6,1	0,129
		$dP$	214,1	221,0	5,9	-1,0	6,0	0,000830

На рис. 6 представлены значения  $DI_{dA}$  для всех монолитных образцов. Данные аппроксимируются с использованием линейной функции, что дает хорошую линейную зависимость индекса повреждения от энергии удара.

Далее был проведен ультразвуковой контроль всех сотовых образцов. Процедура подготовки и испытаний сотовых образцов была абсолютно такой же, как и для монолитных, но результаты показали некоторые различия.

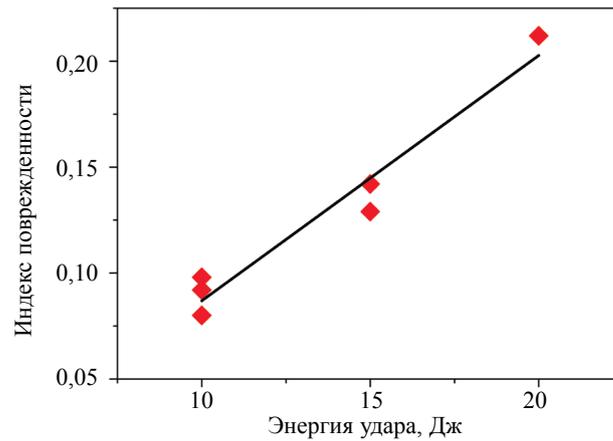


Рис. 6. Зависимость индекса поврежденности от энергии удара для монолитных образцов.

Во-первых, было обнаружено, что процедура определения места повреждения с использованием параметра  $NCC$  дает недостоверные результаты для любого образца данного типа. Расчет координаты повреждения для каждой комбинации частоты, стороны образца и количества волновых путей дает набор точек с высоким разбросом, которые после осреднения привели к тому, что  $X$  и  $Y$  находятся очень близко к центру образца (150; 150). Вышесказанное можно увидеть на рис. 7 и 8. Для обоих образцов  $C1/2$  и  $C2/4$ , а также для оставшихся  $C3—C6$  разброс красных точек параметра  $NCC$  велик, а расчетная координата повреждения находится почти в центре.

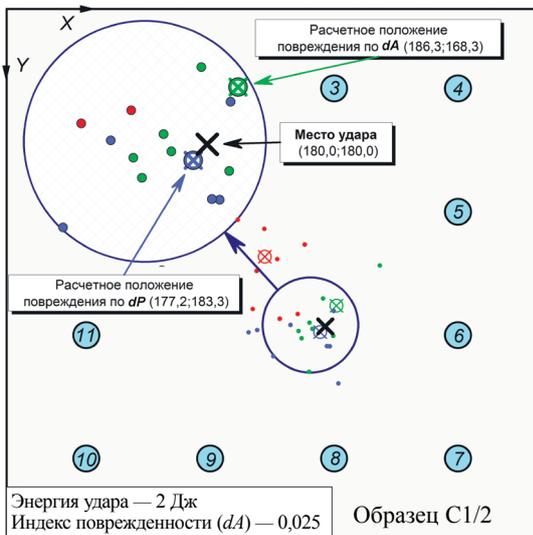


Рис. 7. Результаты экспериментов по обнаружению ударных повреждений образца  $C1$  после удара с энергией 2 Дж.

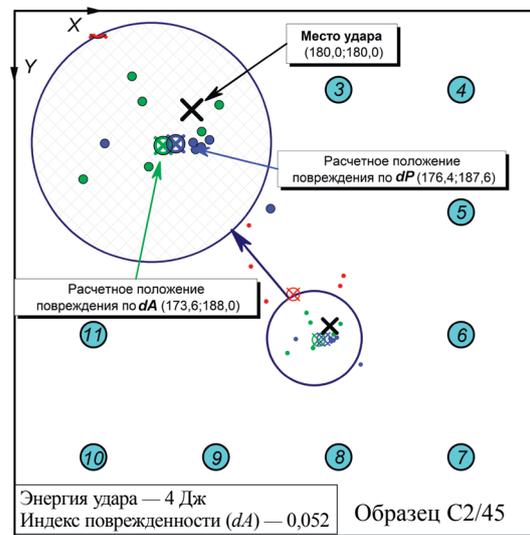


Рис. 8. Результаты экспериментов по обнаружению ударных повреждений образца  $C2$  после удара с энергией 4 Дж.

Во-вторых, тестирование сотовых образцов показало, что расчетные координаты повреждений, полученные сетью на обратной стороне, демонстрируют большой разброс информативных параметров  $dA$  и  $dP$ . Это можно наблюдать практически на всех образцах типа  $C$  и следует сделать вывод, что обнаружение повреждений на стороне, противоположной месту удара невозможно при использовании такой методики. Подробные результаты большого разброса показаны в табл. 3, в то время как для монолитных такие данные не представлялись из-за схожести результатов локации с помощью сетей на лицевой и обратной сторонах.

Таким образом, для расчета усредненных координат  $X$ ,  $Y$  для параметров  $dA$  и  $dP$  использовались только сети PZT на лицевой стороне сотовых панелей. Все результаты сведены в табл. 4.

Таблица 3

Сравнение результатов определения повреждений на сотовых образцах с помощью сетей PZT на лицевой и обратной сторонах

Образец / Энергия удара, Дж	Параметр	Сторона	$\Delta_{avg}$ , мм
С6/4	$dA$	Лицевая	18,9
		Обратная	56,3
	$dP$	Лицевая	23,1
		Обратная	64,9

Таблица 4

Результаты испытаний сотовых образцов

Образец	$X$ , мм; $Y$ , мм	Параметр	$X_{avg}$ , мм	$Y_{avg}$ , мм	$\Delta X_{avg}$ , мм	$\Delta Y_{avg}$ , мм	$\Delta_{avg}$ , мм	$DI$
C1/2	180; 180	$NCC$	145,8	140,5	34,1	39,5	52,2	0,27
		$dA$	186,3	168,3	-6,3	11,7	13,3	0,025
		$dP$	177,2	183,3	2,8	-3,3	4,3	0,000178
C2/4	180; 180	$NCC$	159,1	162,0	20,9	18,0	27,6	0,31
		$dA$	173,6	188,0	6,4	-8,0	10,2	0,052
		$dP$	176,4	187,6	3,6	-7,6	8,4	0,000472
C3/2	150; 220	$NCC$	165,7	186,0	-15,7	34,1	37,5	0,18
		$dA$	151,2	200,5	-1,2	19,5	19,5	0,026
		$dP$	177,2	196,9	-27,2	23,1	35,7	0,000328
C4/4	150; 220	$NCC$	152,6	200,4	-2,6	19,6	19,8	0,29
		$dA$	161,2	219,6	-11,2	0,4	11,2	0,074
		$dP$	149,5	197,0	0,5	23,0	23,0	0,000432
C5/2	220; 220	$NCC$	192,3	190,8	27,7	29,2	40,3	0,2
		$dA$	206,7	206,3	13,3	13,7	19,0	0,038
		$dP$	209,1	210,6	10,9	9,4	14,4	0,000368
C6/4	220; 220	$NCC$	189,9	188,5	30,1	31,5	43,6	0,33
		$dA$	207,1	207,2	12,9	12,8	18,1	0,056
		$dP$	206,0	205,8	14,0	14,2	19,9	0,000592

Видно, что ошибка предсказания места повреждения для  $dA$  варьируется в пределах 10—20 мм, тогда как  $dP$  имеет более высокий разброс  $\Delta_{avg}$ : 4—35 мм.

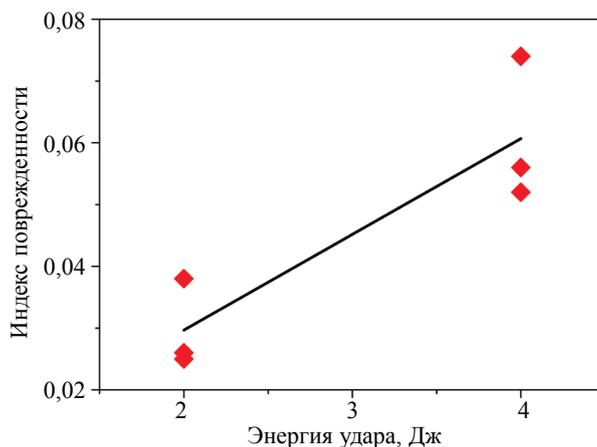


Рис. 9. Зависимость индекса поврежденности от энергии удара для сотовых образцов.

Были рассчитаны индексы повреждений (рис. 9) для различных параметров, показывающие чувствительность и классификационную способность. Разброс  $DI_{dA}$  выше, чем для монолитов, но видна прямая связь между индексом поврежденности и энергией удара.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была исследована эффективность экспериментальной методики с использованием подхода на основе волн Лэмба для обнаружения малозаметных ударных повреждений углепластиков. Сеть пьезопреобразователей приклеивалась к поверхности и использовалась для генерации волн Лэмба и приема прошедших через панель сигналов.

Тестирование монолитных углепластиков показывает, что все используемые параметры (а именно  $dA$ ,  $dP$  или  $NCC$ ) позволяют определить место повреждения с погрешностью 5—15 мм. Расчетный индекс повреждений  $DI$  обеспечивает линейную зависимость от энергии удара. При этом датчики могут располагаться как на лицевой, так и на задней стороне, что не существенно сказывается на точности. При этом использование параметра  $NCC$  возможно для локализации повреждений, однако корректное определение степени критичности дефекта по данному параметру затруднено.

Испытания сотовых образцов дают достаточную точность прогноза места повреждения в диапазоне 5—20 мм, не смотря на то, что разброс несколько выше, чем для монолитов. Обнаружение повреждений сетью PZT на стороне, противоположной стороне удара, является более сложным, а точность намного ниже из-за большой толщины и наличия алюминиевых сот, поэтому волны Лэмба не чувствительны к повреждениям на противоположной стороне. Индекс поврежденности позволяет классифицировать степень критичности дефекта. Для сотовых образцов невозможно использовать один из информативных параметров ( $NCC$ ) для анализа из-за фазового сдвига принимаемого сигнала и его влияния на вычисляемое значение  $NCC$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0010.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *García Márquez F.P., Peco Chacón A.M.* A review of non-destructive testing on wind turbines blades // *Renew. Energy*. 2020. V. 161. P. 998—1010.
2. *Schubel P.J., Crossley R.J., Boateng E.K.G., Hutchinson J.R.* Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades // *Renew. Energy*. 2013. V. 51. P. 113—123.
3. *Qing X., Li W., Wang Y., Sun H.* Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications // *Sensors (Switzerland)*. 2019. V. 19. I. 3. P. 1—27.
4. *Annamdas V.G.M., Bhalla S., Soh C.K.* Applications of structural health monitoring technology in Asia // *Struct. Heal. Monit.* 2017. V. 16. I. 3. P. 324—346.
5. *Jamadar N.I., Kivade S.B., Dhande K.K., Pedada S.* Vibration based damage inspection in composite structures - A critical review // *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.* 2014. V. 3. P. 201—208.
6. *Lakhdar M., Mohammed D., Boudjemaa L., Rabia A., Bachir M.* Damages detection in a composite structure by vibration analysis // *Energy Procedia*. 2013. V. 36. P. 888—897.
7. *Kernicky T., Whelan M., Al-Shaer E.* Vibration-based damage detection with uncertainty quantification by structural identification using nonlinear constraint satisfaction with interval arithmetic // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1569—1589.
8. *Beskhyroun S., Wegner L.D., Sparling B.F.* Integral resonant control scheme for cancelling human-induced vibrations in light-weight pedestrian structures // *Struct. Control Heal. Monit.* 2011. V. 19. I. 1. C. 55—69.
9. *Talai S.M., Desai D.A., Heyns P.S.* Infrared thermography applied to the prediction of structural vibration behaviour // *Alexandria Eng. J.* 2019. V. 58. P. 603—610.
10. *Hwang S., An Y.K., Sohn H.* Continuous-wave line laser thermography for monitoring of rotating wind turbine blades // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1010—1021.
11. *Chen G., Zhang W., Zhang Z., Jin X., Pang W.* A new rosette-like eddy current array sensor with high sensitivity for fatigue defect around bolt hole in SHM // *NDT E Int.* 2018. V. 94. P. 70—78.
12. *Sodano H.A.* Development of an Automated Eddy Current Structural Health Monitoring Technique with an Extended Sensing Region for Corrosion Detection // *Struct. Heal. Monit. An Int. J.* 2007. V. 6. P. 111—119.
13. *Witos M., Zieja M., Fallahi N., Zurek Z., Kwasniewski J.* NDE and SHM of Critical Parts using Magnetic and Electromagnetic Methods // *Acta Phys. Pol. A*. 2018. V. 133. P. 697—700.
14. *Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures*. Elsevier. 2016.
15. *Wang Y., Qiu L., Luo Y., Ding R., Jiang F.* A piezoelectric sensor network with shared signal transmission wires for structural health monitoring of aircraft smart skin // *Mech. Syst. Signal Process.* 2020. V. 141. P. 106730.

16. Wildemann V., Spaskova E., Shilova A. Research of the Damage and Failure Processes of Composite Materials Based on Acoustic Emission Monitoring and Method of Digital Image Correlation // *Solid State Phenom.* 2015. V. 243. P. 163—170.
17. Barsuk V.E., Stepanova L.N., Kabanov S.I. Composite airplane Construction acoustic emission testing during static loading // *Kontrol'. Diagnostika.* 2018. No. 4. 14—19.
18. Stepanova L.N., Bataev V.A., Chernova V.V. Studying the failure of a CFRP sample under static loading by the acoustic-emission and fractography methods // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. V. 53. P. 422—429.
19. Zhou J., Mathews V.J., Adams D.O. Acoustic emissionbased impact location estimation on composite structures // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1652—1668.
20. Zhao W., Zhou W. Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber reinforced hybrid composites // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1686—1697.
21. Guemes A., Fernandez-Lopez A., Daz-Maroto P., Lozano A., Sierra-Perez J. Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors // *Sensors.* 2018. V. 18. P. 1094.
22. Bashkov O.V., Romashko R.V., Zaikov V.I., Panin S.V., Bezruk M.N., Khun K., Bashkov I.O. Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. V. 53. P. 415—421.
23. Kwon H., Park Y., Kim J. H., Kim C. G. Embedded fiber Bragg grating sensor based wing load monitoring system for composite aircraft // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 1337—1351.
24. Weiland J., Hesser D.F., Xiong W., Schiebahn A., Markert B., Reisgen U. Structural health monitoring of an adhesively bonded CFRP aircraft fuselage by ultrasonic Lamb Waves // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G. J. Aerosp. Eng.* 2020. V. 234. I. 13. P. 2000—2010.
25. Ong W., Rajic N., Chiu W., Rosalie C. Lamb wave-based detection of a controlled disbond in a lap joint // *Struct. Heal. Monit.* 2018. V. 17. I. 3. P. 668—683.
26. Sherafat M.H., Guitel R., Quaegebeur N., Hubert P., Lessard L., Masson P. Structural health monitoring of a composite skin-stringer assembly using within-the-bond strategy of guided wave propagation // *Mater. Des.* 2016. V. 90. P. 787—794.
27. Taleb S., Rittmeier L., Sinapius M., Boubenider F., Schmidt D. Experimental Study of Lamb Waves Propagation inside an Impact Damage in the Size of the Used Wavelength // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2020. V. 56. I. 2. P. 141—150.
28. Lee B.C., Staszewski W.J. Sensor location studies for damage detection with Lamb waves // *Smart Mater. Struct.* 2007. V. 16. P. 399—408.
29. Tan Y., Zhang L. Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review // *Struct. Heal. Monit.* 2020. V. 19. I. 4. P. 1287—1308.
30. Ostachowicz W., Soman R., Malinowski P. Optimization of sensor placement for structural health monitoring: a review // *Struct. Heal. Monit.* 2019. V. 18. P. 963—988.
31. Nedospasov I.A., Mozhaev V.G., Kuznetsova I.E. Unusual energy properties of leaky backward Lamb waves in a submerged plate // *Ultrasonics.* 2017. V. 77. P. 95—99.
32. Park I., Jun Y., Lee U. Lamb wave mode decomposition for structural health monitoring // *Wave Motion.* 2014. V. 51. P. 335—347.
33. Attarian V.A., Cegla F.B., Cawley P. Long-term stability of guided wave structural health monitoring using distributed adhesively bonded piezoelectric transducers // *Struct. Heal. Monit.* 2014. V. 13. P. 265—280.
34. Schubert K.J., Brauner C., Herrmann A.S. Non-damage-related influences on Lamb wave-based structural health monitoring of carbon fiber-reinforced plastic structures // *Struct. Heal. Monit.* 2013. V. 13. P. 158—176.
35. Wandowski T., Malinowski P.H., Ostachowicz W.M. Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation // *Compos. Struct.* 2016. V. 151. P. 99—107.
36. Dodson J.C., Inman D.J. Thermal sensitivity of Lamb waves for structural health monitoring applications // *Ultrasonics.* 2013. V. 53. P. 677—685.
37. Kullaa J. Distinguishing between sensor fault, structural damage, and environmental or operational effects in structural health monitoring // *Mech. Syst. Signal Process.* 2011. V. 25. P. 2976—2989.
38. Burkov Mikhail, Lyubutin Pavel, Byakov Anton. Experimental application of Lamb wave technique for testing of CRFP // *AIP Conference Proceedings* 2051, 020043 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5083286>
39. Burkov M.V., Lyubutin P.S., Byakov A.V. Lamb Wave Ultrasonic Detection of Barely Visible Impact Damages of CFRP // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2019. V. 55. No. 2. P. 89—101.
40. Lamss-composites software. <http://www.me.sc.edu/research/lamss/html/software.html> (Доступ: 18 Ноября 2020).
41. Zhongqing Su, Lin Ye. Identification of Damage Using Lamb Waves From Fundamentals to Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛЯРНОСТИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНОК В СООТВЕТСТВИИ С ISO 11699-1

© 2021 г. Н.А. Михайлова<sup>1,\*</sup>, А.А. Демидов<sup>1,\*\*</sup> В.Ю. Чертищев<sup>1,\*\*\*</sup>, Н.В. Осияненко<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ВИАМ», Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17

E-mail: \*natsavv@inbox.ru; \*\*lagazz@yandex.ru; \*\*\*chertishchevv@mail.ru; \*\*\*\*kour.21@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.07.2020; после доработки 09.11.2020

Принята к публикации 10.11.2020

Одно из важных свойств промышленных радиографических пленок, определяющих четкость получаемого изображения, — гранулярность. В технических условиях на любую промышленную радиографическую пленку производитель обязан дать информацию о гранулярности, помимо других характеристик: чувствительности к излучению, контрастности, а фирмы, осуществляющие испытания радиографических пленок, должны проводить ее оценку. Этого требует международный стандарт ISO 11699-1:2008. Величина гранулярности (среди прочих характеристик) определяет принадлежность радиографической пленки к определенному классу, а, следовательно, возможность ее использования для рентгеновского или гамма-контроля тех или иных объектов. Для оценки гранулярности необходимо специфическое оборудование и соблюдение технологии этого процесса, регламентированного ISO 11699-1:2008. В статье приведена информация об оценке гранулярности посредством разработанного стенда с макетами оптической системы и системы сбора данных в автоматическом и ручном режимах. Разработанный стенд был использован для оценки гранулярности радиографической пленки D5 (Agfa). Полученные экспериментальные данные в пределах допустимого разброса совпадают с данными, указанными в сертификате соответствия международным стандартам.

*Ключевые слова:* рентгеновский неразрушающий контроль, радиографическая пленка, оптическая плотность, гранулярность, чувствительность к излучению, микроденситометрия.

DOI: 10.31857/S0130308221020056

### ВВЕДЕНИЕ

Безопасная эксплуатация авиационной и космической техники обусловлена высоким качеством материалов, деталей и узлов, ее содержащих [1].

Немаловажную роль в повышении качества летательных аппаратов на стадии производстве играют неразрушающие методы контроля (НК) [2, 3]. Из всех видов НК, применяемых на предприятиях, рентгеновский неразрушающий контроль с регистрацией результатов контроля на радиографическую пленку занимает одно из первых мест, поэтому его средства и технология должны абсолютно соответствовать регламенту нормативных документов.

С другой стороны, Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии планируется в ближайшие годы введение межгосударственных стандартов по радиационному неразрушающему контролю, в частности ISO 11699-1:2008; ISO 11699-2:2018 в качестве национальных стандартов Российской Федерации. В связи с предстоящим введением новой системы стандартов весьма актуальна инициатива ВИАМ в разработке и создании средств и нормативной документации по испытанию радиографических пленок, обеспечивающих абсолютную объективную оценку их параметров.

Согласно ISO 11699-1:2008, по своим свойствам промышленные радиографические пленки разделены на шесть классов. Для особо ответственных объектов, к которым относится авиационная техника, необходимо использовать радиографические пленки классов С1—С4. Для них характерен высокий контраст и высокая разрешающая способность. Принадлежность радиографических пленок к тому или иному классу осуществляет по регламенту [4] Берлинский институт аттестации материалов (ВАМ) с выдачей соответствующего заключения (сертификата). ФГУП «ВИАМ» много лет проводит испытания радиографических пленок по своей методике, которая определяет перечисленные свойства косвенным образом, сравнивая их с так называемой арбитражной пленкой, класс которой определен. Недостаток такой методики очевиден: невозможность оценить свойства испытуемой пленки, необходимые для классификации пленочной системы согласно [4], а причина — отсутствие технических средств для проведения испытаний по регламенту [4]. Поэтому сейчас наше предприятие проводит разработку техники, обеспечивающей проведение испытаний в соответствии с ISO 11699-1:2008. Успешные результаты разработки и позволят, используя базу ВИАМ, создать национальный центр аттестации материалов. В аспекте проблемы импортозамещения решение этой задачи приобретает значительный практический выигрш [5].

Имеются попытки расширить возможности лабораторий по производительности за счет применения других комплексов. В работе [6] предлагается сканировать пленку в серийных пленочных сканерах для фотопленок и оценивать среднеквадратичную гранулярность по косвенному признаку скорректированного стандартного отклонения пикселей. Производительность может быть существенно повышена, однако ошибка может достигать 6 %, что недопустимо для лабораторных систем. В работе [7] предлагается применять оптимизированную съемку обычной цифровой камерой подсвеченной пленки. Несмотря на оптимистичные результаты, данный метод так же предлагается авторами как попытка лишь частичного замещения функционала микроденситометров. К тому же подобная схема не в полной мере выполняет требования ISO 11699 «Контроль неразрушающий. Рентгенографические пленки для промышленной радиографии. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии» в части оптической резкости, как подсветки, так и съемки контрольной площадки на пленке диаметром  $100 \pm 5$  мкм.

В статье приведены результаты по оценке одного из свойств радиографической пленки — ее гранулярности [8—10].

Гранулярностью  $\sigma_s$  называют стохастические колебания оптической плотности радиографического снимка, полученного при равномерном экспонировании эмульсионного слоя радиографической пленки, и фиксируемые микроденситометром. Иногда неравномерность оптической плотности равномерно экспонированного слоя настолько велика, что воспринимается визуально зрительной системой оператора. В этом случае ее называют зернистостью. Причинами гранулярности являются: во-первых, статистические колебания количества микрокристаллов бромида серебра на единицу площади пленки; во-вторых, квантовые флуктуации излучения; в-третьих, образование клубков микрокристаллов по длине свободного пробега фото- и комптоновских электронов. Установлено, что гранулярность растет быстро с ростом энергии излучения до 500 кэВ. Далее рост гранулярности незначителен. Радиографическая пленка является детектором, преобразующим радиационное изображение объекта контроля в оптическое. Следовательно, гранулярность — собственный шум детектора. В литературных источниках [11—13] гранулярностью называют среднеквадратическое отклонение оптической плотности, которая определяется соотношением:

$$\sigma_s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i - S_{cp})^2 \right]^{1/2},$$

где  $S_i$  —  $i$ -е значение оптической плотности из массива  $n$  измерений;  $S_{cp}$  — среднее значение оптической плотности.

Гранулярность пленки определенного класса зависит от оптической плотности и площади измерительного отверстия; согласно правилу Селвина среднеквадратичное отклонение плотности обратно пропорционально квадратному корню из площади измерительной диафрагмы или щели:

$\sigma_s = \frac{\Theta}{\sqrt{F}}$ , где  $F$  — площадь измерительного отверстия, мкм<sup>2</sup>; величина  $\Theta$  названа коэффициентом Селвина [14].

Для измерения гранулярности необходимо проводить измерения оптической плотности с малым размером диафрагмы (посредством микроденситометра).

Эти исследования проводились для свето-фотоматериалов, имеющих односторонний эмульсионный слой. Микроденситометры, которые измеряют оптическую плотность свето-фотоматериалов, имеют ограниченный диапазон измерения оптических плотностей до 1,2 Б. Радиографические снимки промышленных объектов по требованиям действующих отечественных и зарубежных стандартов должны иметь оптическую плотность в пределах от 1,5 Б до 4,0 Б.

Была поставлена задача, провести измерение гранулярности радиографических снимков, максимально приближенное к тому, как это проводят по ISO 11699:2008.

## Разработка методики измерения гранулярности

### *Адаптация технических средств*

В качестве средства измерения оптической плотности использовали денситометр DD5005 с диапазоном измерения оптической плотности 0—5,0 Б и точностью измерения 0,01 Б. Размер светочувствительного элемента датчика денситометра: круглый диаметром 2,0 мм. Денситометры такого типа измеряют интегральную оптическую плотность на площади рентгенограммы, захваченной апертурой датчика (рис. 1).

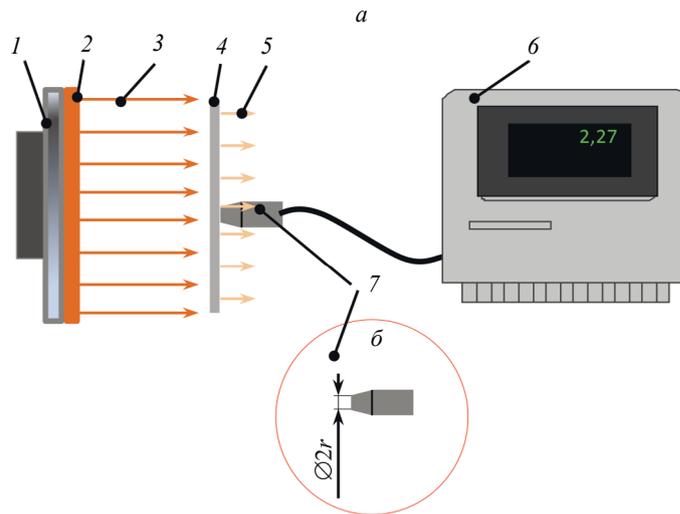


Рис. 1. Схема измерения оптической плотности радиографических снимков (а):

1 — негатоскоп с экраном 2; 3 — световой поток от экрана негатоскопа  $\Phi_0$ ; 4 — радиографический снимок с оптической плотностью  $S$ ; 5 — световой поток  $\Phi$ , ослабленный радиографическим снимком; 6 — денситометр с датчиком 7; б — датчик денситометра с диаметром апертуры  $2r$ .

**Примечание 1.** Интегральная оптическая плотность  $S$ , Б — степень потемнения радиографического снимка, измеряемая денситометром в проходящем свете. В ISO 11699:2008 такая оптическая плотность называется диффузной.

Радиографическая пленка экспонируется проникающими фотонами рентгеновского и гамма-излучения, поэтому для усиления изображения эмульсия нанесена с двух сторон. Оценка гранулярности должна включать оба эмульсионных слоя. Радиографические снимки, выполненные по требованию [4], должны иметь оптическую плотность не менее 2,0 Б над вуалью. Для того, чтобы зарегистрировать колебания оптической плотности, необходимо ее измерение на очень маленьком участке радиографического снимка. Размер апертуры микроденситометра не должен превышать определенной величины. По требованиям ISO 11699:2008 диаметр круглой измерительной диафрагмы микроденситометра должен составлять  $(100 \pm 5)$  мкм. Если диафрагма прямоугольная, то ее размер должен быть  $88,6 \times 88,6$  мкм. В этом случае она имеет такую же площадь, как и круглая диаметром 100 мкм.

Лабораторией неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» для проведения оценки пленочных систем для промышленной радиографии в соответствии с ISO 11699 был разработан, спроектирован и создан автоматизированный микроденситометр. Поскольку комплекс необходим непосредственно для оценки пленочных систем, то применение «альтернативных» схем было недопустимым, однако были предприняты существенные усилия для полной автоматизации комплекса с целью повышения его производительности. Основой комплекса является спаренная регулируемая оптическая система высокой жесткости с подсветкой точки на пленке диаметром  $100 \pm 5$  мкм с фокусом в центр толщины пленки и обеспечением резкости по всей толщине пленки до 200 мкм. Съемка данной точки так же производится оптической системой с обеспечением аналогичных требований по резкости. Однако для повышения производительности комплекс был полностью автоматизирован. Аналоговые данные с фотозлектрического датчика оцифровываются 24-битным аналогово-цифровым преобразователем для обеспечения диапазона измерений от 0 до более чем 6 Б. Цифровые данные промышленным контроллером пересчитываются в Б, переводятся в пакетные данные и передаются в персональный компьютер с записью измеренных значений напрямую в таблицу программы MS Excel в режиме реального времени. Перемещение пленки производится автоматизированным высокоточным приводом с шагом 100 мкм (в соответствии с требованиями ISO 11699). Получение одного набора данных из 1160 точек занимает менее 10 мин (с учетом специально заданных пауз для стабилизации положения пленки после каждого шага в 100 мкм). Поскольку данные записываются сразу в MS Excel, расчет всех величин необходимых для отнесения пленочной системы к какому-либо классу так же производится автоматически по завершении сканирования пленки.

Примечание 2. Дифференциальная оптическая плотность  $S_d$ , Б — степень потемнения радиографического снимка, измеренная микроденситометром с диаметром апертуры не более 0,1 мм при строго нормальном его положении по отношению к поверхности радиографического снимка. В ISO 11699:2008 такая оптическая плотность называется оптической плотностью по нормали.

Гранулярность зависит от среднего значения интегральной оптической плотности, поэтому для измерения гранулярности были использованы радиографические снимки, полученные при разных режимах, и имеющие интегральную оптическую плотность, равную от 1,5 до 2,8 Б, включая плотность вуали и подложки (триацетатной основы, на которую наносят двухсторонний эмульсионный слой). Измерения проводили по пяти точкам.

Как правило, для оценки значений интегральной оптической плотности  $S$  используется регрессионный анализ, целью которого является разработка статистической модели, позволяющей прогнозировать ее значения по величинам дифференциальной оптической плотности  $S_d$  [16]. В результате построения регрессионной кривой были установлены коэффициенты линейной регрессии (рис. 2).

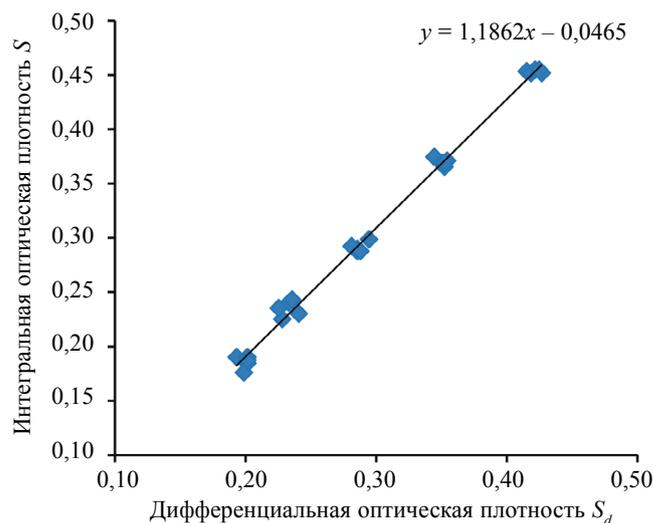


Рис. 2. Определение коэффициентов линейной регрессии.

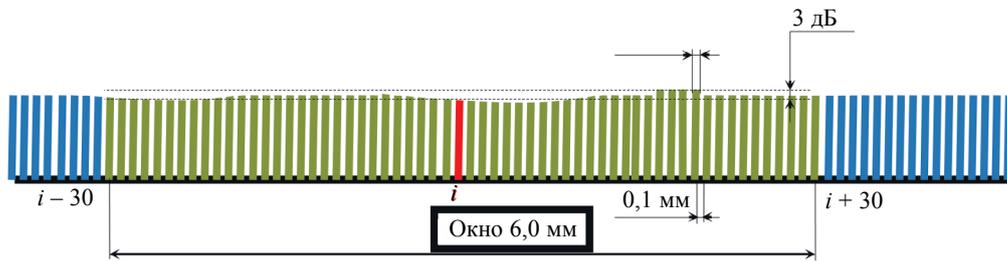
### Сканирование рентгенограммы и получение массива точек

На рентгенограмме со средней оптической плотностью  $2,0 + S_0$  Б выбрали линию сканирования длиной 116 мм и получили массив данных дифференциальной оптической плотности, сканируя рентгенограмму посредством микроденситометра с круглой апертурой  $\varnothing 100$  мкм. Этот массив данных был преобразован в массив из 1160 значений интегральной оптической плотности (используя коэффициенты преобразования линейной регрессии)  $\{S_{i\text{ meas}}\}$ .

Проведена фильтрация массива  $\{S_{i\text{ meas}}\}$  с помощью фильтра верхних частот, пространственная частота среза составила  $0,1 \frac{\text{пар линий}}{\text{мм}}$ . Цель фильтрации заключается в том, чтобы убрать колебания оптической плотности, вызванные плавными изменениями толщины подложки, эмульсии и пр. Пространственная частота таких колебаний низкая и составляет не более  $0,1 \frac{\text{пар линий}}{\text{мм}}$ , а их оптическая плотность колеблется в пределах 0,33 Б (3 дБ).

Фильтрация осуществлена математически для каждой точки  $S_i$  массива  $\{S_{i\text{ meas}}\}$ . Пусть  $S_i$  оптическая плотность произвольной  $i$ -ой точки на линии сканирования общей длиной 116 мм (рис. 3).

$\Delta S_{i\text{ f}} = S_i - \frac{1}{61} \sum_{i=30}^{i+30} S_{i\mp 30}$  — результат работы фильтра для  $i$ -й точки, тогда отфильтрованное значение оптической плотности  $i$ -й точки определится вычитанием из измеренного в результате сканирования значения  $S_i$  величины  $\Delta S_{i\text{ f}}$ , сглаженной в результате фильтрации:

Рис. 3. Фильтрация  $i$ -й точки из массива  $\{S_{meas}\}$ .

$$S_{if} = S_i - \Delta S_{if}.$$

Фильтрацию проводили последовательно для каждой точки на линии 116 мм. Для  $(i+1)$ -й точки фильтр смещается на шаг 0,1 мм. Таким образом,  $S_{if}$  — результат свертки (конволюции)  $S_i$  и  $\Delta S_{if}$ . Во избежание повторения работы фильтра первые (30) и последние (30) были исключены из массива  $\{S_{meas}\}$ , в результате массив  $\{S_f\}$  состоит из 1100 значений  $S_{if}$  на длине участка 110 мм.

После проведения фильтрации участок длиной 110 мм был разделен на отрезки каждый длиной 1,9 мм с двадцатью значениями оптической плотности, через 0,1 мм. Расстояние между участками должно быть 0,1 мм.

Для проведения расчетов гранулярности участков должно быть не менее 55. Расчет  $\sigma_{S_n}$  для  $n$ -го участка:

$$\overline{S_{f_n}} = \frac{1}{20} (S_{f_{n_1}} + S_{f_{n_2}} + \dots + S_{f_{n_i}} + \dots + S_{f_{n_{20}}}) \text{ — средняя оптическая плотность на } n\text{-м участке;}$$

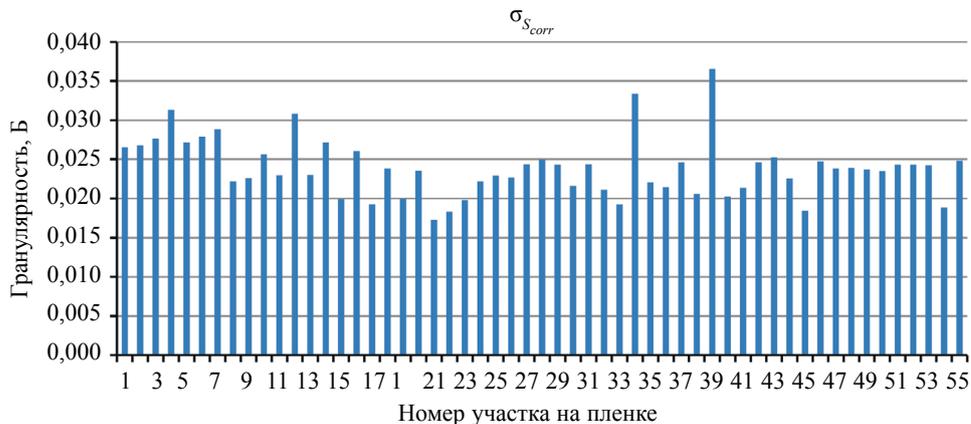
$$\sigma_{S_n} = \sqrt{\frac{1}{20-1} \sum_{i=1}^{20} (S_{f_{n_i}} - \overline{S_{f_n}})^2} \text{ — гранулярность на } n\text{-м участке.}$$

$$\text{Для всех значений } \sigma_S \text{ проведена коррекция: } \sigma_{S_n \text{ corr}} = \sigma_{S_n} \cdot \sqrt{\frac{2}{S_n}}.$$

Чтобы получить характеристику гранулярности, не зависящую от величины диафрагмы, в полученное значение  $\sigma_{S_n \text{ corr}}$  внесли поправку, при которой рассчитанное значение гранулярности для круглой диафрагмы примет вид:

$$\sigma_{S_n A} = \sigma_{S_n \text{ corr}} \cdot \frac{d_A}{100},$$

где  $d_A$  — диаметр круглой диафрагмы, мкм (рис. 4).

Рис. 4. 55 участков длиной 1,9 мм с двадцатью значениями  $S_{f_{n_i}}$ .

Все полученные и откорректированные значения  $\sigma_S$  расположили в порядке возрастания ее величины (см. рис. 1). Если участков 55, то в 28-м участке  $\sigma_S$  имеет среднее медианное значение:

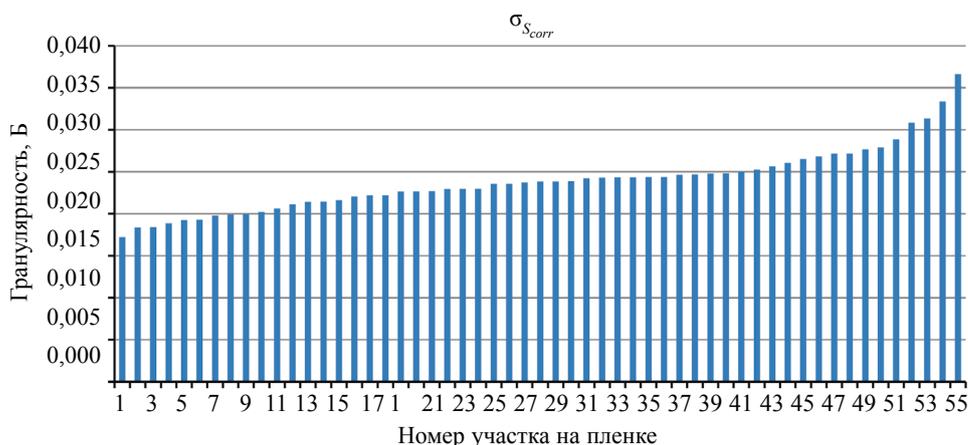


Рис. 5. Определение медианного значения гранулярности  $\sigma_s$ .

$\sigma_{S_{28}} = \sigma_{S_{med}}$ . Чтобы получить несмещенную оценку  $\sigma_s$ , необходимо медианное значение  $\sigma_{S_{med}}$  умножить на 1,0179. Это условие справедливо для  $n \geq 20$ .

В рассматриваемом случае  $n = 55$  (рис. 5).

Для полученного массива значений  $S_p$  справедлив закон распределения  $\chi$ -квадрат, поскольку каждое значение  $S_p$ , из которых вычисляли  $\sigma_s$ , представляет собой нормально распределенную величину [17, 18].

**Примечание 3.** Для распределения  $\chi$ -квадрат характерно, если  $k$  — число последовательных наблюдений в пределах группы  $C$ , а критическим значением распределения  $\chi$ -квадрат является  $\alpha = 0,5$ , то при  $k - 1$ -степеней свободы для оценки  $\sigma_D$  его медианное значение  $\sigma_{S_{med}}$  умножают на  $\sqrt{(k - 1) / C}$ , где  $C = \sigma_{S_{med}}$ .

В случае 20 и более наблюдений медианное значение  $\sigma_{S_{med}}$  для статистической коррективы умножают на 1,0179.

**Примечание 4.** Увеличение числа участков и значений случайной величины дает более точный результат. Важно не изменить длину группы, равную 1,9 мм (плюс 0,1 мм расстояния между группами), и статистическую поправку, если используется значение поправки, равное 1,0179.

Распределение данных сканирования по участкам, определение  $\sigma_s$  на каждом участке и процедура определения среднего (медианного) значения  $\sigma_s$  имеют собственный фильтрующий эффект, который эквивалентен описанному выше низкочастотному фильтру, основанному на получении данных в результате сканирования

Следовательно, если применяется медианная процедура, нет необходимости фильтрации шумов с высокими пространственными частотами. При этом погрешность в определении гранулярности не превышает  $\pm 1,5 \%$ .

Чтобы оценить среднее значение гранулярности, необходимо выполнить не менее шести измерений на различных образцах. При этом отклонения полученного среднего значения гранулярности на 95 %-м доверительном интервале должно быть не более  $\pm 10 \%$ . В результате экспериментов, полученное значение гранулярности для образцов радиографической пленки D5 (Agfa) соответствует значению, заявленному в ее сертификате.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытание радиографических пленок в соответствии с ISO 11699:2008 регламентирует определение их гранулярности, осуществление которой представляет сложную процедуру, связанную со специфическими экспериментами, математическими расчетами и статистической обработкой полученных данных. Для выполнения этого регламента был собран стенд, содержащий:

оптическую систему, которая обеспечивает измерение дифференциальной оптической плотности рентгенограммы;

преобразователь локальных данных дифференциальной оптической плотности в конечном счете в цифровой сигнал;

устройство перемещения с шагом 0,1 мм;  
сбор данных в автоматическом режиме.

Проведены экспериментальные исследования по определению гранулярности радиографической пленки D5 (Agfa). Последовательность и содержание проведенных экспериментов точно соответствует требованиям ISO 11699:2008. Результаты экспериментов показали соответствие значения гранулярности, заявленного в сертификате на пленку D5, и аналогичным значением гранулярности, полученным в результате эксперимента.

В перспективе на базе разработанного стенда возможно создание стационарной установки для испытания радиографических пленок фирмы Agfa и других производителей.

Авторский коллектив выражает благодарность сотруднику ФГУП «ВИАМ» лаборатории «Неразрушающие методы контроля (НМК)» начальнику сектора М.А. Далину за неоценимую помощь в создании испытательного стенда и настройке его макетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Ключевая проблема — материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения — основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16—21.
4. ISO 11699-1:2008 Контроль неразрушающий. Рентгенографические пленки для промышленной радиографии. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии. ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. 9 с.
5. Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А., Крупнина О.А. Сенситометр для технических радиографических пленок // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3. С. 88—94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-88-94
6. Hosobuchi Y., Ohnuma K. Measurement of root mean square granularity of X-ray films using a commercial film scanner // Optical review. 2001. V. 8. No. 4. P. 301—304.
7. Eckel S., Zscherpel U., Huthwaite P., Paul N., Schumm A. Radiographic film system classification and noise characterisation by a camera-based digitisation procedure // NDT & E International. 2020. V. 111. No. article 102241.
8. Косарина Е.И., Генералов А.С., Демидов А.А. Проблемы в государственной системе стандартизации РФ в области радиационного неразрушающего контроля // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. № 11. С. 86—92. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-86-92
9. Демидов А.А., Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Турбин Е.М. Сертификация радиографических пленок / Сб. докл. X Всеросс. конф. «ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли». М.: ФГУП «ВИАМ», 2018. С. 56—64.
10. Гнедин М.М., Шаблов С.В. Радиографический контроль. Требования по выбору радиографической пленки // В мире неразрушающего контроля. 2019. № 2. С. 14—18.
11. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Степанов А.В. Радиационные методы неразрушающего контроля / Курс лекций. СПб.: Свен, 2019. 288 с.
12. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1999. 104 с.
13. Штань А.С., Румянцев С.В., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам контроля. М.: Атомиздат, 1983. 210 с.
14. Selwyn E.W.H. Phot. Journ. 1939. V. 79. P. 513.
15. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс, 2007. 912 с.
16. Калман Р., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 354 с.
17. Мусеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Учебн. пос. изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 488 с.

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИАПАТИТА ИЗ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗУБОВ

© 2021 г. Фатемех Мирджалили<sup>1,\*</sup>, Алиреза Навабазам<sup>2</sup>, Нина Саманизаде<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Исламский университет Азад, Мейбод, Иран

<sup>2</sup>Университет медицинских наук Шахида Садуги, Йезд, Иран

\*E-mail: Fm.mirjalili@gmail.com

Поступила в редакцию 04.07.2020; после доработки 11.09.2020

Принята к публикации 11.09.2020

Гидроксиапатит — наиболее важный биокерамический материал благодаря своей структуре и химическому составу, схожий с материалом костей и зубов. В этом исследовании наночастицы гидроксиапатита получали из естественных зубов в два этапа. Первоначально наночастицы ГА получались из всего зуба, на втором этапе зуб был разделен на дентин и корень, и наночастицы ГА были получены из обеих частей зубов в отдельности. Сначала только что удаленные человеческие зубы (весь зуб, дентин и корень) были кальцинированы при температуре 850 °С, а затем были исследованы влияние времени перемешивания, влияние поверхностно-активного вещества и влияние различных температур. Результаты РД подтвердили наличие фазы гидроксиапатита во всех образцах. Фосфатные связывающие группы  $\text{PO}_4^{3-}$  при 1470  $\text{cm}^{-1}$  и 669  $\text{cm}^{-1}$  были подтверждены результатами фурье-ИКС FTIR. Результаты АЭСЭМ показали, что наночастицы гидроксиапатита с размерами в диапазоне 29—46 нм при времени перемешивания 36 ч с добавлением ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества при 850 °С были получены без агломератов и с хорошей дисперсии.

*Ключевые слова:* естественные зубы, гидроксиапатит, ЦТАБ, фосфатная полоса.

DOI: 10.31857/S0130308221020068

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день инженерия биоматериалов представляют собой быстро развивающуюся междисциплинарную область на стыке инженерии, науки и здравоохранения; ее результаты в отношении вопросов, связанных со здоровьем человека, также очевидны и признаны во всем мире. Основная доля рынка среди всех продуктов из биоматериалов принадлежит ортопедическим биоматериалам [1], таким как материалы на основе гидроксиапатита (ГА). Имея химическую формулу  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , ГА является основным минеральным компонентом костей [2] и зубов [3]. Таким образом, ГА очень часто используется в материалах имплантатов, особенно в ортопедической хирургии костей [2] и имплантации других твердых тканей [3], например, в стоматологической и эстетической хирургии. ГА — наиболее часто используемый биоактивный материал для создания биомиметических имплантатов нового поколения, что указывает на хорошую биоактивность и биосовместимость [4, 5]. Потребность в ГА имеет место из-за замены  $\text{Ca}^{2+}$ , а также из-за того, что он может быть использован в качестве материала для заживления разрывов кости в ортопедии [7, 8]. Аллотрансплантаты (это имплантаты, взятые из организма особи и трансплантированные особи того же вида [9]) и ксенотрансплантаты (имплантаты, пересаживаемые от одной особи к особи другого вида, например, бычья кость) также являются альтернативой, но эти трансплантаты могут сопровождаться различными потенциальными инфекциями [10]. С другой стороны, синтезированный ГА является еще одной возможной основой, но они не содержат микроэлементов (например, стронция), которые имеют решающее значение. В настоящее время для этой цели используются природные материалы для создания фосфатов кальция с помощью синтеза, включая высокотемпературное прокалывание [10] или путем применения различных процессов химического превращения карбоната кальция [11].

ГА-биокерамика может быть получена синтетическим или естественным путем. Синтезированные ГА заслуживают доверия, но их производство обычно сложное, требует много времени и затратно. Натуральная биокерамика, хоть и имеет естественное происхождение, возможно, может являться переносчиком некоторых нежелательных серьезных заболеваний, таких как вирус иммунодефицита человека (ВИЧ) или губчатая энцефалопатия крупного рогатого скота (ГЭКРС) [10, 12].

Несмотря на то, что ГА считается стабильным в биологических жидкостях, поскольку он демонстрирует самую низкую растворимость из фосфатно-кальциевых материалов в очень узком диапазоне  $\text{pH} > 7,3$ , многочисленные исследования подтвердили микроструктурную деградацию

материалов *in vitro* и *in vivo*. Были описаны различные случаи, при которых ГА подвергается деградации. Также бывает, что образуется мало механических взаимосвязей биологических тканей с имплантированным ГА [13].

Аналогичным образом механические свойства, такие как межфазная прочность кости и ГА и вязкость разрушения самого ГА, могут быть резко уменьшены. В некоторых случаях упоминалось, что частицы, отделившиеся от имплантатов ГА, могут вызывать локальное воспаление или трение третьего тела [14].

Следовательно, требуется биокерамика на основе ГА с лучшей устойчивостью к расслоению / деградации. С этой точки зрения, интерес вызвал фосфат кальция, содержащийся в человеческих зубах, которые очень стабильны в биологической среде. В течение многих лет получаемые биологическим путем фосфаты кальция вызвали интерес из-за их низкой стоимости производства и состава аналогичного человеческой кости. В частности, несколько видов фосфатов кальция, полученных непосредственно из бычьей кости, были применены в качестве материалов для замены костного трансплантата [15].

В последние годы ГА, получаемый из зубов, рассматривается как новый биоматериал. Dong и др. сообщили о естественном получении ГА из зубов человека и доказали улучшение механических свойств ГА, полученного из зубов, при добавлении биостекла [16]. Более того, результаты исследования *in vivo*, проведенного Ola et al., указывали на потенциал ГА, полученного из зубов, в качестве безопасного биоматериала для костной трансплантации [17,18].

Данное исследование направлено на синтез и определение характеристик гидроксиапатита из недавно удаленных человеческих зубов (целые зубы, дентин и корень). Новизной этого исследования являются изучение влияния времени перемешивания, поверхностно-активного вещества и различных температур, а также изучение морфологических и микроструктурных свойств наночастиц ГА из всего зуба, дентина и корня.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Зубы в количестве приблизительно 100 штук поливали водой, используя при этом щетку, далее их сушили при комнатной температуре. После этого зубы прокаливали при 850 °C в течение 1 ч со скоростью нагрева 5 °C/мин на воздухе. Было обнаружено, что при этой температуре органические компоненты полностью выгорают, и только неорганическая фаза фосфата кальция из дентина и эмалевых материалов остается. На этом этапе мы не отделяли дентин от эмали (как разные источники фосфата кальция). Затем прокаленные зубы были физически измельчены, помещены в этанол и затем размолоты в шаровой мельнице в течение 12 ч. Затем 2 г измельченного в шаровой мельнице зубного порошка в 100 мл раствора этанола в течение 30 мин интенсивно перемешивали при 25 °C (первый раствор). Готовился раствор 1,43 г  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  в 50 см<sup>3</sup> этанола и медленно добавляли каплями к первому раствору, чтобы получить соотношение Ca/P равному 1,67. Раствор аммиака использовался в качестве агента для доведения pH до 11. Раствор перемешивали в течение 24 ч, сушили при 110 °C в течение 8 ч и спекали при 850 °C в течение 2 ч. На втором этапе, после приготовления второго раствора, его перемешивали в течение разного времени (2, 12, 24, 36) при pH 11 и сушили в печи при 110 °C в течение 24 ч, прокаливали при 850 °C в течение 2 ч. В следующей части для улучшения свойств был введено поверхностно-активное вещество (ЦТАБ, Merck, Германия). После подготовки первого и второго раствора ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества добавляли ко второму раствору и медленно добавляли по каплям к первому раствору. Конечный раствор перемешивали в течение 36 ч. После фильтрации материалы промывали дистиллированной водой и сушили при 110 °C в течение 24 ч и, наконец, прокаливали при 850 °C в течение 2 ч. Таким образом, проверено влияние различных температур (750, 850, 1050 °C) на получение наночастиц ГА.

На втором этапе дентин очень легко отделялся от корня зуба из-за значительной разницы в содержании воды. Полученный дентин измельчали, а порошок просеивали. Составная часть содержала частицы размером от 100 до 150 нм. Порошки выдерживали пару дней в атмосферных условиях для поглощения влаги. Дентин прокаливали при 850 °C в течение 1 ч со скоростью нагрева 5 °C/мин на воздухе и измельчали вместе, помещали в этанол и затем измельчали в шаровой мельнице в течение 12 ч. Затем 2 г порошка дентина, измельченного на шаровой мельнице, смешивали с 100 мл раствора этанола в течение 30 мин и перемешивали при 25 °C (первый раствор). Готовили раствор 1,43 г  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  в 50 см<sup>3</sup> этанола (раствор 2), чтобы получить соотношение Ca/P 1,67. Раствор аммиака был использован в качестве агента для доведения pH до 11. После приготовления двух растворов ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества добавляли ко второму

раствору и по каплям добавляли первый раствор. Конечный раствор перемешивали в течение 36 ч, фильтровали и сушили при 110 °С в течение 24 ч и прокаливали при 850 °С за 2 ч.

В последней части корень зуба прокаливали при 800 °С в течение 1 ч со скоростью нагрева 5 °С/мин на воздухе. Затем 2 г порошка корня измельчали на шариковой мельнице в 100 мл раствора этанола и перемешивали в течение 30 мин при 25 °С. После приготовления раствора к нему добавляли ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества и перемешивали в течение 36 ч, фильтровали, сушили при 110 °С в течение 24 ч и прокаливали при 850 °С в течение 2 ч. Определение фаз проводилось методом рентгеновской дифракции (РД) с помощью PW1800, компании Philips, используя излучение Cu K $\alpha$ , пропускаемое через никелевый фильтр, в диапазоне углов  $2\theta = 10\text{--}60^\circ$  со скоростью сканирования 5° в минуту. Инфракрасный спектрометр с преобразованием Фурье (фурье-ИКС) от Perkin Elmer Spectrum серии 100 использовали с универсальным методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Микроструктуры порошков идентифицировались методом автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии (АЭСЭМ) (Philips—Zeiss—Германия).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Результаты РД для нанокристаллического гидроксиапатита из природных зубов

Пик РД для порошка гидроксиапатита проиллюстрирован на рис. 1. Прямая базовая линия и острые пики дифрактограммы на рис. 1 подтверждают, что образцы были хорошо кристаллизованы. РД-диаграмма показывает, что образцы, в основном, состоят из ГА в соответствии со стандартным значением (JCPDS09-432). С другой стороны, в образцах присутствовала другая кристаллическая фаза трикальцийфосфата (ТКФ) (JCPDS09-169).

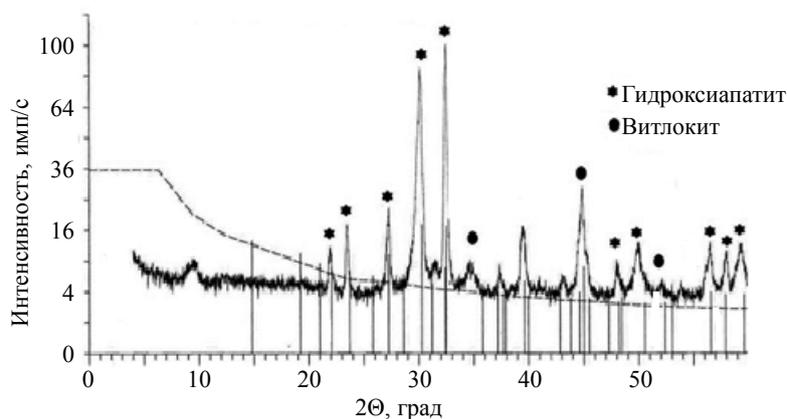


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов.

Дифрактограммы гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов при разном времени перемешивания 12, 24 и 36 ч, показаны на рис. 2. Острые пики на дифрактограммах при разном времени перемешивания (12, 24, 36) соответствуют фазе ГА как основной фазе, согласованной с картой Объединенного комитета по порошковым дифракционным стандартам (JCPDS) PDF № JCPDS09-0432.

На рис. 3 показана дифрактограмма фторапатита, синтезированного из естественных зубов с использованием ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества. Пики на дифрактограмме показали, что основными фазами во всех образцах были фторапатиты согласно карте JCPDS PDF № 00-003-0736. В случае гидроксиапатита возможно замещение такими элементами, как K, Na, Mg, Pb, Cd, Ba и Sr вместо кальция, B, Cr, Ge, Si, S, As и CO<sub>3</sub> вместо фосфора и Br, Cl, F, BO<sub>2</sub>, CO<sub>3</sub> вместо гидроксильной группы [19—21]. Вступающие группы могут вводиться в систему произвольно или случайно во время обработки ГА [22—25]. Вступающие группы, которые случайно попадают в систему, включают фторид, хлор, магний, углерод, стронций, алюминий, лантан и железо. Когда фтор, введенный в структуру апатита из-за его более высокой электроотрицатель-

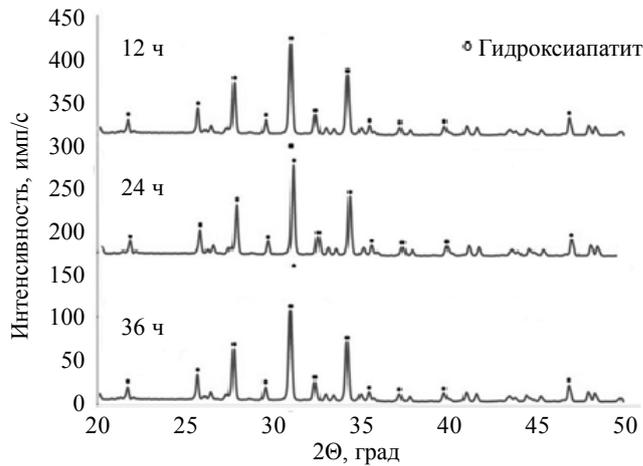


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов при разном времени перемешивания.

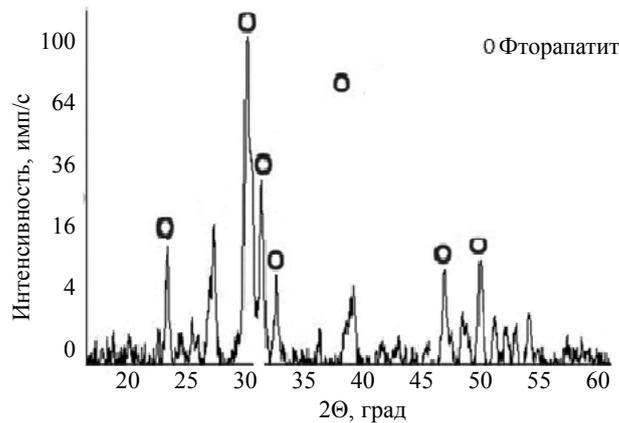


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма фторапатита, синтезированного из естественных зубов с использованием поверхностно-активного вещества.

ности, находится ближе к сторонам параллелограмма покрытого кальцием треугольника, это создает более прочную связь и, следовательно, более стабильную структуру. В этом случае его химическая стабильность повышается, а растворимость понижается [23, 26].

Дифрактограммы фторапатита, синтезированного из естественных зубов с использованием ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества при различных температурах показаны на рис. 4.

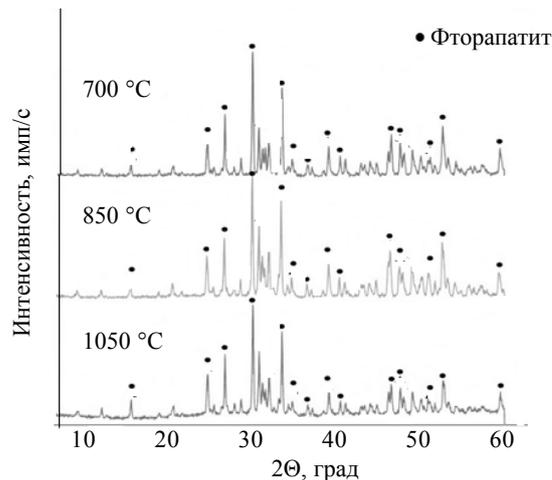


Рис. 4. Дифрактограммы фторапатита, синтезированного из естественных зубов при различных температурах.

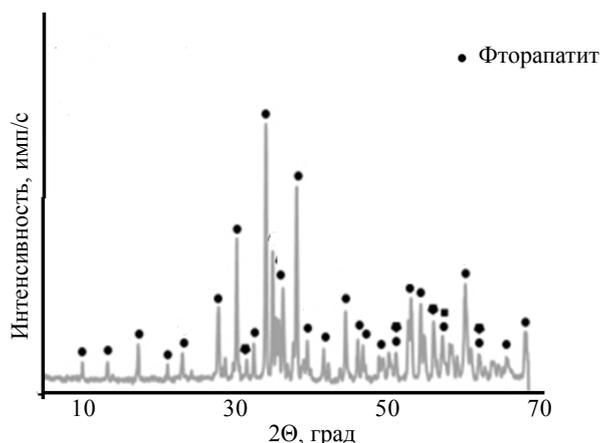


Рис. 5. Рентгеновская дифрактограмма фтороапатита, синтезированного из дентина.

Дифрактограммы показывают, что фазы всех образцов при разных температурах были фазами фтороапатита. Кроме того, между ними не наблюдали значительной разницы, что указывает на то, что увеличение температуры не влияет на фазовую структуру конечного образца. На втором этапе дентин очень легко отделялся от корня зуба и проверялся отдельно. Пик дифрактограммы порошка дентина с поверхностно-активным веществом после 36-часового перемешивания проиллюстрирован на рис. 5. На дифрактограмме на рис. 5 показано, что образцы в основном представляют собой ГА по JCPDS No. 00-003-0736.

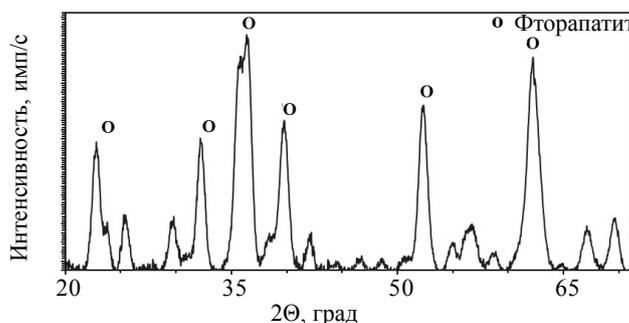


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма фтороапатита, синтезированного из корня зуба.

На рис. 6 показана дифрактограмма корня зуба. На дифрактограмме показано, что доминирующей фазой были фазы ГА согласно карте JCPDS PDF No. 00-003-0736.

### 3.2. Результаты фурье-ИКС для нанокристаллического порошка гидроксиапатита из естественных зубов

Фурье-ИКС-спектры гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов, показывающие поглощение при  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ , приведены на рис. 7. Фурье-ИКС показывает наличие фосфатных ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) связей при  $471$  и  $604\text{ см}^{-1}$  и  $717\text{--}730\text{ см}^{-1}$ , связанных с  $\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$ , и связей  $\text{HPO}_4^{2-}$  при  $599\text{ см}^{-1}$ , которые связаны с ГА [25—27]. Связи гидроксильной группы (ОН) при  $3500\text{ см}^{-1}$  и полоса Р—Н при  $1997\text{ см}^{-1}$  относятся к ГА [28—30].

Фурье-ИКС-спектры гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов при разном времени перемешивания показаны на рис. 8.

Полосы поглощения в областях примерно  $599\text{ см}^{-1}$  связаны с деформациями кристаллической решетки гидроксиапатита. Пики при волновых числах  $604$  и  $3433\text{ см}^{-1}$  являются следствием растяжения гидроксильных ионов в кристаллической гидроксиапатитовой решетке [31—33]. Пики при  $1043$  и  $1084\text{ см}^{-1}$  являются следствием растяжения фосфатной группы в кристаллической гидроксиапатитовой решетке [34—36].

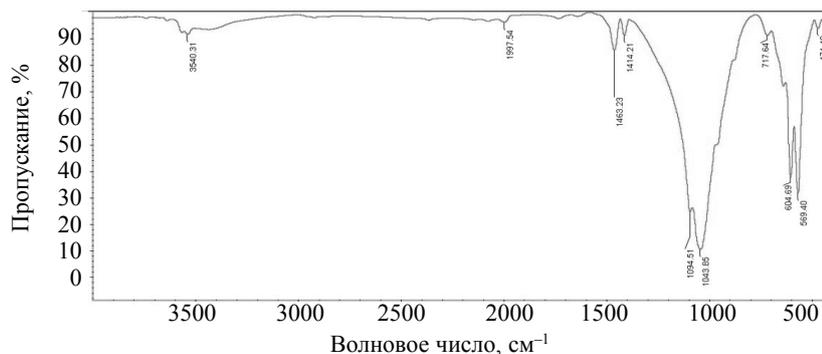


Рис. 7. Кривая фурье-ИКС гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов.

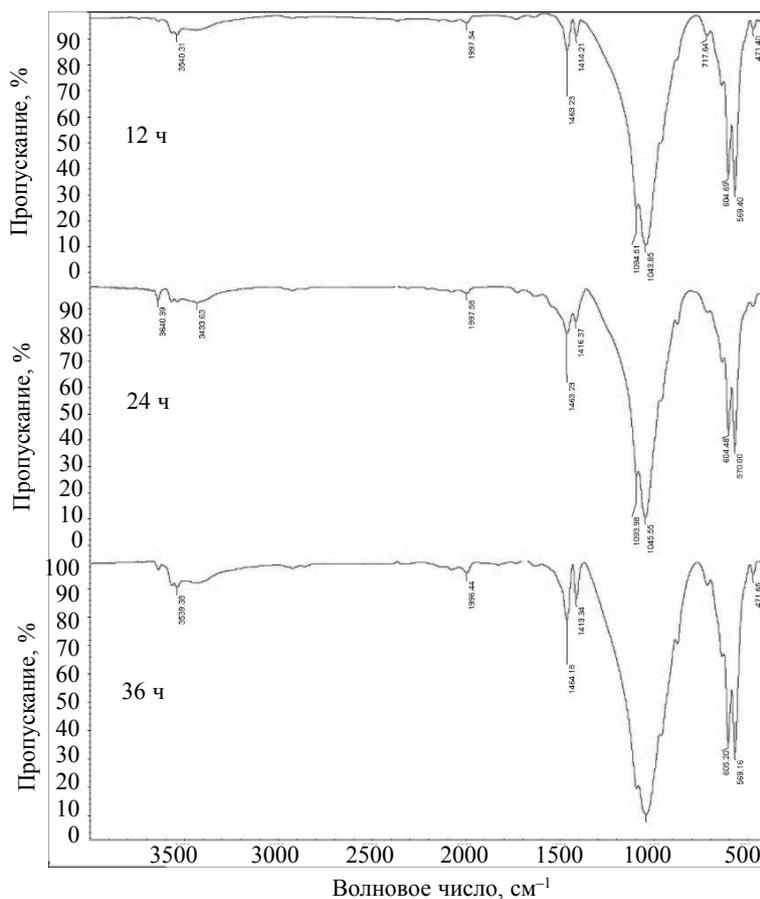


Рис. 8. Фурье-ИКС-кривые гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов при разном времени перемешивания.

Кроме того, между ними не наблюдалось значительной разницы, это указывает на то, что различное время перемешивания не влияет на структуру связей в конечном образце.

На рис. 9 представлен фурье-ИКС-спектр синтезированных наночастиц фторапатита. Соответствующий фурье-ИКС-спектр содержит все колебания от  $\nu_4$  до  $\nu_1$ , относящиеся к фосфатной группе в структуре апатита [16]. Также были два связанных пика 564 и 603  $\text{см}^{-1}$ , принадлежащих к группе колебаний  $\nu_4$  [17]. Представленный пик в 741  $\text{см}^{-1}$  представляет собой гидроксильную цепочку, которая была обнаружена в этой структуре, насыщенной фтором [21]. Пики с волновыми числами 3700  $\text{см}^{-1}$  были связаны с O—H-группами. Центральный пик 873  $\text{см}^{-1}$  вместе с полосой 1640  $\text{см}^{-1}$  с краями на 1413 и 1465  $\text{см}^{-1}$  были отнесены к структурным карбонатным группам ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) [19]. Присутствие этой группы отражает биодоступность фторапатита.

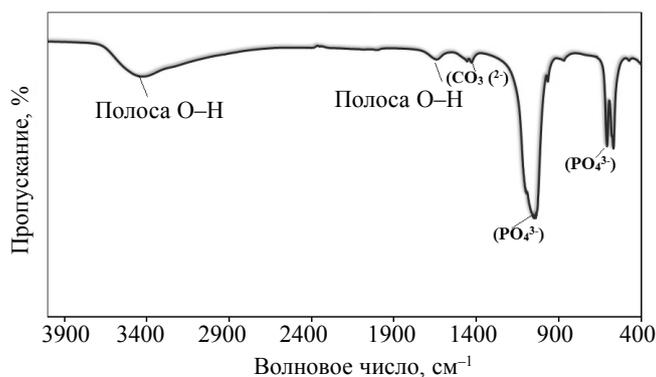


Рис. 9. Фурье-ИКС-кривые фторапатита, синтезированного из естественных зубов с использованием поверхностно-активного вещества.

Фурье-ИКС-спектры фторапатита, синтезированного из дентина и корня зуба, показывающие поглощение при  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ , показаны на рис. 10 и 11. Колебания  $\nu_4\text{-}\nu_1$  относятся с фосфатной группой в структуре апатита [16]. Фурье-ИКС-спектры показывают наличие фосфатных ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) связей при  $570$  и  $604\text{ см}^{-1}$ , связанных с решеткой фторапатита [35]. Пики с волновыми числами  $3440$ ,  $3640\text{ см}^{-1}$  были связаны с  $\text{O-H}$ -группами [34, 36].

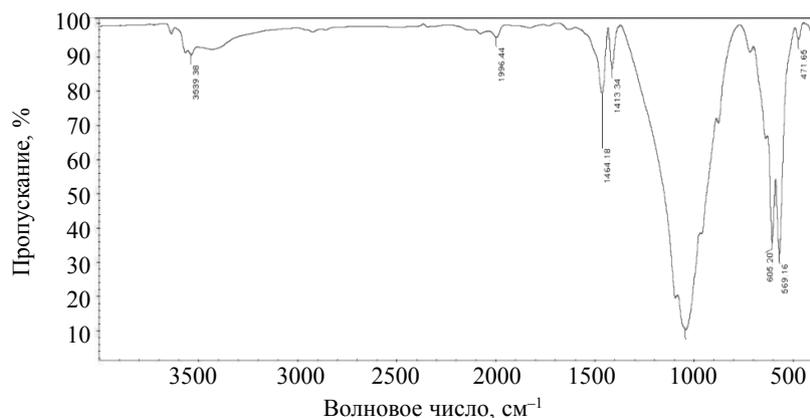


Рис. 10. Фурье-ИКС-кривые фторапатита, синтезированного из дентина.

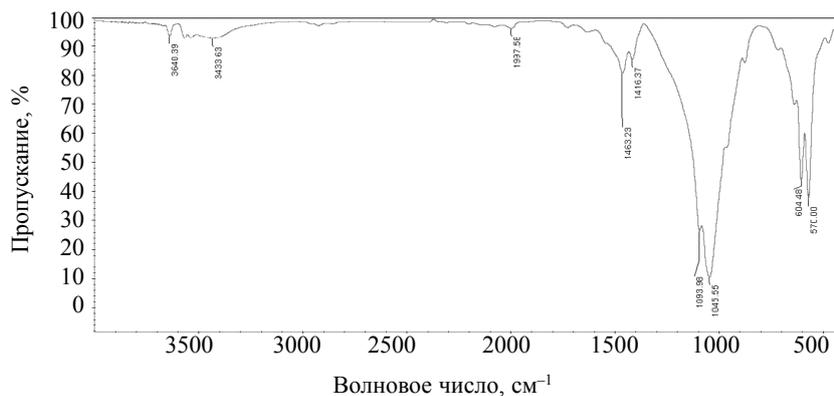


Рис. 11. Фурье-ИКС-кривые фторапатита, синтезированного из корня зуба.

Представленный пик при  $750\text{ см}^{-1}$  является гидроксильной цепочкой, обнаруженной в этой структуре, насыщенной фтором [22].

### 3.3. Морфологические свойства нанокристаллического гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов

На рис. 12*а—в* показаны АЭСЭМ-изображения гидроксиапатита, синтезированного из естественных зубов с использованием ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества и времени перемешивания 36 ч после прокаливания при различных температурах.

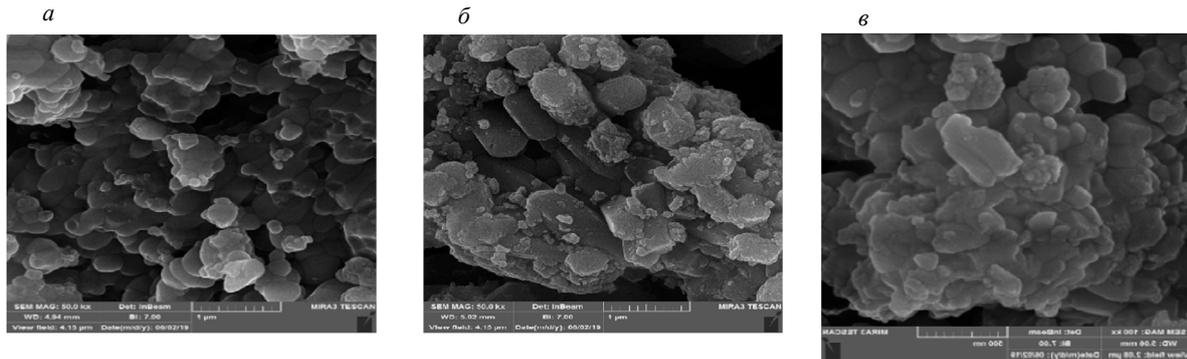


Рис. 12. АЭСЭМ-изображение образцов: 750 °C (*а*); 850 °C (*б*); 1050°C (*в*).

Как показывают изображения, во всех образцах наблюдалась хорошая дисперсия. У образца на рис. 12*а* размеры частиц лежали в диапазоне 12—42 нм, частицы имели правильную форму и образовывали агломераты, а у образца на рис. 12*б* диапазон размеров частиц был в пределах 20—50 нм, частицы имели правильную геометрическую форму без образования агломератов, и у образца на рис. 12*в* размеры частиц были примерно 30—60 нм, кластер частицы обладал хорошей дисперсией и малым количеством агломератов. Следовательно, при повышении температуры размер частиц увеличивался. Синтезированный порошок с агломерациями препятствовал росту зерна частиц при высоких температурах. На поверхности системы частиц можно было увидеть очень мелкозернистые сферические частицы. Следовательно, был сделан вывод, что лучшим был образец на рис. 12*б* с мелкими частицами сферической формы и без агломератов.

АЭСЭМ-изображения дентина и корня после прокаливания при 850 °C показаны на рис. 13.

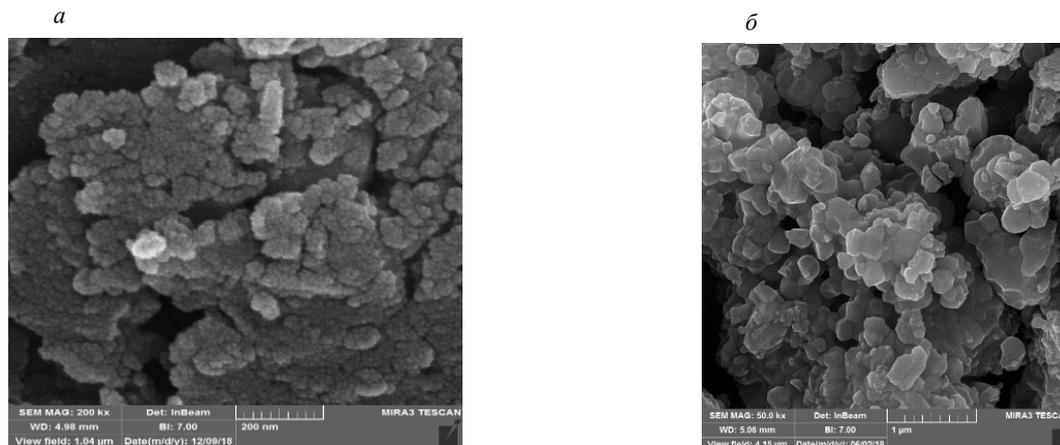


Рис. 13. АЭСЭМ-изображение образцов из дентина (*а*); из корня (*б*).

Что касается рис. 13, диапазон размеров частиц дентина составлял около 19—35 нм, частицы имели сферическую форму, хорошую дисперсию и малую степень агломерации. Более того, в образце из корня форма частиц была полностью сферической без агломератов, диапазон размеров частиц находился в пределах 29—46 нм.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании наночастицы гидроксиапатита были подготовлены в два этапа из естественных зубов. На первом этапе использовались зубы полностью, а на втором этапе для приготовления наночастиц гидроксиапатита дентин и корень использовались по отдельности. Затем было исследовано влияние времени перемешивания, поверхностно-активных веществ и температуры на полученные наночастицы гидроксиапатита. Рентгеновские дифрактограммы всех образцов показали, что образцы в основном состоят из фазы ГА в соответствии со стандартным значением (JCPDS09-432), а с увеличением времени перемешивания (12, 24, 36 ч между ними не наблюдалось значительной разницы в содержании фазы ГА. Это указывает на то, что время перемешивания не влияет на кристаллическую структуру конечного образца. Характеристические пики на дифрактограмме образца с ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества показали, что основными фазами была фаза фторапатита (по карте JCPDS PDF 00-003-0736) с гексагональной кристаллической структурой. Также в результате фурье-ИКС полосы с волновым числом 669 и 1470  $\text{см}^{-1}$  принадлежали к группе фосфатных полос ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

На основе АЭСЭМ-изображений был сделан вывод, что лучший образец с мелкими частицами и сферической формой без агломератов был получен при времени перемешивания 36 ч с ЦТАБ в качестве поверхностно-активного вещества при 850 °С. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gunduz O., Sahin Y.M., Agathopoulos S., Ben-Nissan B., Oktar. F. A New Method for Fabrication of Nano hydroxyapatite and TCP from the Sea Snail Cerithium Vulgatum // Journal of Nanomaterials. 2014. V. 2014. P. 1—6.
2. Jamiu K.O., Danyuo Y., Abdulazeez Baruwa D., Akeem A.A. Synthesis and characterization of hydroxyapatite from bovine bone for production of dental implants // Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials. 2019. V. 1. P. 1—7.
3. Ivanova T.I., Frank-Kamenetskaya O.V., Kol'tsov A.B., Ugolkov V.L. Crystal Structure of Calcium-Deficient Carbonated Hydroxyapatite, Thermal Decomposition // Journal of Solid State Chemistry. 2001. V. 160. P. 340—349.
4. Kalita S.J., Bhardwaj A., Bhatt H.A. Nanocrystalline Calcium Phosphate Ceramics in Biomedical Engineering // Materials Science and Engineering C. 2007. V. 27. P. 441—449.
5. Murugan R., Ramakrishna S. Development of Nanocomposites for Bone Grafting // Composites Science and Technology. 2005. V. 65. P. 2385—2406.
6. Riman R.E., Suchanek W.L., Byrappa K., Chen C.W., Oakes C. Solution Synthesis of Hydroxyapatite Designer Particulates // Solid State Ionics. 2002. V. 151. P. 393—402.
7. Benaqqa C., Chevalier J., Saa daoui M., Fantozzi G. Slow Crack Growth Behaviour of Hydroxyapatite Ceramics // Biomaterials. 2005. V. 26. P. 6106—6112.
8. Orlovskii V.P., Komlev V.S., Barinov S.M. Hydroxyapatite and Hydroxyapatite-Based Ceramics // Inorganic Materials. 2002. V. 38. P. 973—984.
9. Pasteris J.D. Lack of OH in Nanocrystalline Apatite as a Function of Atomic Order: Implications for Bone and Biomaterials // Biomaterials. 2004. V. 25. P. 229—38.
10. Dorozhkina E.I., Dorozhkina S.V. Mechanism of Solid-State Transformation of a Calcium-Deficient Hydroxyapatite (CDHA) into Biphasic Calcium Phosphate (BCP) at Elevated Temperatures // Chem. Mater. 2002. V. 14. P. 4267—4272.
11. Vallet-Regi M., Gonza'lez-Calbet J.M. Calcium Phosphates as Substitution of Bone Tissues // Progress in Solid State Chemistry. 2004. V. 32. P. 1—31.
12. Sugiyama S., Ichii T., Matsumoto H., Hayashi H. Effect of Calcination and Sieving of Calcium Hydroxyapatite on Ion-Exchangeability with Lead Cation in the Presence and Absence of HCl // Advances in Environmental Research. 2002. V. 62. P. 285—289.
13. Zhang H.G., Zhu Q., Wang Y. Morphologically Controlled Synthesis of Hydroxyapatite with Partial Substitution of Fluorine // Chem. Mater. 2005. V. 17. P. 5824—5830.
14. Kannan S., Rebelo A., Ferreira J.M.F. Novel Synthesis and Structural Characterization of Fluorine and Chlorine Co-Substituted Hydroxyapatites // Journal of Inorganic Biochemistry. 2006. V. 100. P. 1692—1697.
15. Medvecky L., Stulajterov'a R., Parila'k L., Trpc'evska J., Barinov S.M. Influence of Manganese on Stability and Particle Growth of Hydroxyapatite in Simulated Body Fluid // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2006. V. 281. P. 221—229.
16. Dong S.S., Jong K.K. Dissolution of Human Teeth-Derived Hydroxyapatite // Annals of Biomedical Engineering. 2008. V. 36. No. 1. P. 132—140.

17. *Ola Saleh M.* Preparation of Hydroxyapatite from Natural Resources Literature Review // *GSI*. 2018. V. 6. P. 46—52.
18. *Kim T.G., Park B.* Synthesis and Growth Mechanisms of One-Dimensional Strontium Hydroxyapatite Nanostructures // *Inorg. Chem.* 2005. V. 44. P. 9895—9901.
19. *Bhatnagar V.M.* Refinement of the Synthetic Hydroxyapatite Cell Parameters // *Contr. Mineral. and Petrol.* 1969. V. 22. P. 375—378.
20. *Aoki H., Kato K., Ogiso M., Tabata T.* Studies on the Application of Apatite to Dental Materials // *J. Dent. Eng.* 1977. V. 18. P. 151—156.
21. *Monroe A.E., Ward V., Ward D.B., McMullen J.* New Calcium Phosphate Ceramic Material for Bone and Tooth Implants // *J. Dent. Res.* 1971. V. 50. P. 860—865.
22. *Manafi S.A., Mirjalili F., Reshadi R.* Synthesis and evaluation of the bioactivity of fluorapatite-45s5 bioactive glass nanocomposite // *Progress in Biomaterials.* 2019. V. 8. P. 77—89.
23. *Zhang H.G., Zhu Q.* Surfactant-Assisted Preparation of Fluoride-Substituted Hydroxyapatite Nanorods // *Mater. Letter.* 2005. V. 59. P. 3054—3058.
24. *Jones F.H.* Teeth and Bones: Application of Surface Science to Dental Materials and Related Biomaterials // *Surface science reports.* 2001. V. 42. P. 75—205.
25. *Jarcho M., Kay J.F., Gumaer K.L., Doremus R.H., Drobeck H.P.* Tissue, Cellular, and Subcellular Events at a Bone-Ceramic Hydroxyapatite Interface // *J. Bioeng.* 1977. V. 1. P. 79—92.
26. *Wang Y., Zhang S., Wei K., Zhao N., Chen J., Wang X.* Hydrothermal Synthesis of Hydroxyapatite Nanopowders Using Cationic Surfactant as a Template // *Materials Letters.* 2006. V. 6. P. 1486—1487.
27. *Sadasivan S., Khushalani D., Mann S.* Synthesis of Calcium Phosphate Nanofilaments in Reverse Micelles // *Chem. Mater.* 2005. V. 17. P. 2765—2770.
28. *Prelot B., Zemb T.* Calcium Phosphate Precipitation in Catanionic Templates // *Mater. Sci. Eng. C.* 2005. V. 25. P. 553—559.
29. *Wei K., Wang Y., Lai C., Ning C., Wu D., Wu G., Zhao N., Chen X., Ye J.* Synthesis and Characterization of Hydroxyapatite Nanobelts and Nanoparticles // *Materials Letters.* 2005. V. 59. P. 220—225.
30. *Zhang Y., Zhou L., Li D., Xue N., Xu X., Li J.* Oriented Nano-Structured Hydroxyapatite from the Template // *Chemical Physics Letters.* 2003. V. 376. P. 493—497.
31. *Zhang F., Zhou Z., Yang S., Mao L., Chen H., Yu X.* Hydrothermal Synthesis of Hydroxyapatite Nanorods in the Presence of Anionic Starburst Dendrimer // *Materials Letters.* 2005. V. 59. P. 1422—1425.
32. *Lin K., Chang J., Cheng R., Ruan M.* Hydrothermal Microemulsion Synthesis of Stoichiometric Single Crystal Hydroxyapatite Nanorods with Mono-Dispersion and Narrow-Size Distribution // *Materials Letters.* 2007. V. 61. P. 1683—1687.
33. *Liu Y., Hou D., Wang G.* A Simple Wet Chemical Synthesis and Characterization of Hydroxyapatite Nanorods // *Materials Chemistry and Physics.* 2004. V. 86. P. 69—73.
34. *Cao M., Wang Y., Guo C., Qi Y., Hu C.* Preparation of Ultrahigh-Aspect-Ratio Hydroxyapatite Nanofibers in Reverse Micelles under Hydrothermal Conditions // *Langmuir.* 2004. V. 20. P. 4784—4786.
35. *Pang Y.X., Bao X.* Influence of Temperature, Ripening Time and Calcination on the Morphology and Crystallinity of Hydroxyapatite Nanoparticles // *Journal of the European Ceramic Society.* 2003. V. 23. P. 1697—1704.
36. *Ye W., Wang X.X.* Ribbon-like and Rod-Like Hydroxyapatite Crystals Deposited on Titanium Surface with Electrochemical Method // *Materials Letters.* 2007. V. 17. P. 405—409.
37. *Nilesh R., Rutika B., Sudhindra B., Nilima T.* Comparative evaluation of Nano-Hydroxyapatite preparation and Calcium Sucrose Phosphate on microhardness of deciduous teeth after iron drop exposure — An in-vitro study // *J. Clin. Exp. Dent.* 2017. V. 9 (4). P. 579—583.
38. *Suat O., Mehmet Y.* Studies on Characterization of Bovine Hydroxyapatite/CaTiO<sub>3</sub> Biocomposites // *Advances in Materials Science and Engineering.* 2016. V. 2016. P. 1—8.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В НОРМАХ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ И РОССИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СТАРЕНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ, СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2021 г. В.М. Ушаков<sup>1,\*</sup>, С.Г. Евтушенко<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр АО «НПО «ЦНИИТМАШ»»,  
Россия 115088 Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4  
E-mail: \*VMUshakov@cniitmash.com; \*\*SGEvtushenko@cniitmash.com

Поступила в редакцию 03.11.2020; после доработки 17.11.2020  
Принята к публикации 15.12.2020

Представлен аналитический обзор норм безопасности международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и документов РФ в области управления ресурсом атомных станций. Показано значение неразрушающего контроля в системе управления старением конструкций, систем и элементов атомных станций. Отмечены проблемы управления старением, которые могут быть решены с помощью неразрушающего контроля. Отмечен системный подход обеспечения безопасности на всех жизненных этапах атомных станций: проектирование, конструирование, производство (изготовление), монтаж, эксплуатация (включая продление срока), реконструкция и вывод из эксплуатации.

*Ключевые слова:* атомная станция, безопасность, управление старением (ресурсом), неразрушающий контроль, конструкции, МАГАТЭ, системы и элементы атомных станций.

**DOI:** 10.31857/S013030822102007X

Безопасность атомных станций (зарубежных и на территории РФ) является приоритетной задачей на протяжении всего жизненного цикла от проектирования до вывода (включительно) из эксплуатации. МАГАТЭ (INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY — далее IAEA) разрабатывает серию норм по безопасности с начала 90-х годов прошлого века. Особое значение придается проблеме управления старением конструкций, систем и элементов АС. В документах [1—9] МАГАТЭ (IAEA) рассмотрены вопросы управления старением конструкций, систем и элементов (КСЭ). В данной статье изложены результаты анализа и сравнения требований документов МАГАТЭ (IAEA) по управлению старением и аналогичных документов РФ в части применения неразрушающего контроля в решении указанной проблемы. Прежде всего, необходимо оценить основные понятия. Согласно [1], имеет место физическое и моральное старение КСЭ. Физическое старение — это общий процесс постепенного ухудшения во времени физических характеристик КСЭ вследствие механизмов деградации. Моральное старение КСЭ определяется развитием знаний и техники и связанных с этим изменением требований, норм и стандартов. Управление старением — это координация мероприятий, связанных с пониманием, обнаружением, предотвращением и смягчением эффектов старения КСЭ АС.

Согласно документам РФ по управлению старением (управлению ресурсом):

механизмы старения — процессы, приводящие к необратимым изменениям свойств конструкционных материалов при эксплуатации;

деградация — негативные структурные изменения конструкционных материалов или самих конструкций оборудования под воздействием механических нагрузок, температуры и /или окружающей среды;

старение — это процесс накопления во времени изменений механических и/или физических характеристик конструкционных материалов оборудования и трубопроводов;

ресурс — суммарная наработка оборудования и трубопроводов от начала их эксплуатации до момента времени, при котором наступит необратимое нарушение установленных нормативными документами условий прочности или работоспособности;

управление ресурсом — комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на сохранение или уменьшение темпов выработки ресурса оборудования и трубопроводов в процессе их эксплуатации.

Управление старением действует в процессе ориентирования, технического обслуживания и понимания, надзора и испытаний (аттестация оборудования), эксплуатационного контроля и вывода из эксплуатации.

Нормы МАГАТЭ (IAEA) предписывают учет эффектов старения КСЭ, которые должны быть заключены на стадии проектирования АЭС. Одним из факторов обеспечения безопасности АЭС

является аттестация оборудования. В программе аттестации должны участвовать эффекты старения в течение ожидаемого срока службы узлов, важных для безопасности. Согласно [1], управление старением КСЭ в течение всего жизненного цикла АЭС (при проектировании, строительстве, вводе в эксплуатацию (в том числе продленной) и выводе из эксплуатации следует осуществлять с предвидением и прогнозированием (п. 3.1), опираясь на опыт других АЭС и отраслей промышленности, а также учитывая результаты полученных исследований и разработок (п. 3.3в). Управление старением предполагает выявление значительных эффектов старения и деградации металла с использованием контроля (в том числе неразрушающего) конструкций или элементов. В п. 4.36 документа [1] указано: «следует разработать и ввести перечень или базу данных результатов неразрушающего контроля при выявлении, определении характеристик и анализа тенденций деградации конструкций или элементов; база данных должна обеспечивать техническую базу для выводов и заключений для принятия решений по управлению старением». Для реализации процесса управления старением разрабатывается программа управления старением, в которой следует определить методы обнаружения (включая неразрушающие методы), мониторинга, предотвращения и смягчения последствий старения и механизмов деградации для каждой конструкции или элемента.

Для выполнения корректирующих действий в рамках управления старением следует установить критерии допустимости (нормы оценки) для контроля и мониторинга эффектов старения (п. 5.47 в документе [1]). Нормы оценки неразрушающего контроля согласно Российским документам задаются в правилах контроля, в технических условиях, стандартах, конструкторской документации или иных аналогичных документах на стадии проектирования (конструирования) оборудования, трубопроводов или иных элементов АЭС. В документе МАГАТЭ [2] описаны меры по реализации безопасности АЭС при проектировании. Управление старением (п. 31 в [2]) по управлению старением закладывается при проектировании и является обязательным на всех стадиях жизненного цикла АЭС.

В документе [3] указывается, что МАГАТЭ (IAEA) начало осуществлять свою программу по нормам безопасности с 1958 года. Значение и необходимость строжайшего выполнения норм безопасности усилились после аварии на АЭС «Фукусима-дайти» (Япония). Был разработан План действий МАГАТЭ (IAEA) по ядерной безопасности, который был утвержден Советом управляющих и одобрен Генеральной конференцией МАГАТЭ (IAEA) в сентябре 2011 г. Комиссия по нормам безопасности одобрила предложение о пересмотре, внесении изменений действующих Норм безопасности. Нормы МАГАТЭ (IAEA) представляют собой новую редакцию с учетом изменений, внесённых в ранее действующие нормы № NS-R-2 (выпущенных в 2003 г.). В [3] изложены обязанности эксплуатирующей организации АЭС (главная ответственность эксплуатирующей организации (ЭО) — это безопасность АЭС). Безопасность включает анализ совокупных последствий эффектов старения с учетом действующих национальных и международных норм (п.4.44 в [3]). Управление старением осуществляется на основе программы управления старением (ПУС). Нормы [3] рекомендуют использовать системный подход в разработке, реализации и непрерывном совершенствовании ПУС. В качестве части ПУС проводятся оценка и анализ температурных и радиационных условий, эффектов коррозии и других ухудшений параметров, влияющих на долговременную надежность оборудования или конструкций АЭС (п. 4.51 в [3]). В рамках реализации ПУС может быть использован неразрушающий контроль.

В руководстве по безопасности [4] описаны процедуры по техническому обслуживанию, надзору и инспекции (ТОНИИ) при эксплуатации АЭС. ТОНИИ предполагает получение исходных данных для конструкций, элементов и компонентов до эксплуатации АЭС как основу для сравнения при последующих проверках во время эксплуатации. Данное положение касается и неразрушающего контроля, т.к. НК является частью программы ТОНИИ. В программе рекомендуется использование новых подходов в деятельности ТОНИИ, в т.ч. применение неразрушающих испытаний (см. п. 3.4): «выборочный контроль и оценка результатов программы ТОНИИ (...включая неразрушающие испытания...), рассмотрение предложений о новых подходах к деятельности ТОНИИ (т.е. ориентированное на надежность техобслуживание...или новые методы неразрушающих испытаний)». Данное положение соответствует общей концепции норм безопасности МАГАТЭ (IAEA), которая предполагает поиск новых решений с целью повышения безопасности и базируется на опыте эксплуатации АЭС и результатов научных исследований, в том числе и в области неразрушающего контроля конструкций, систем и компонентов АЭС. В документе [4] (п. 10.17 и 10.18) отмечена необходимость применения визуального и измерительного контроля (включая телевизионного), капиллярного, магнитопорошкового, вихретокового, ультразвукового, радиографического, а также электроконтактного метода. Следует подчеркнуть, что согласно документам РФ, действующим в системе оценки соответствия в области использования атомной энергии, электроконтактный метод не относится к мето-

дам неразрушающего контроля, обязательным к применению для оборудования и трубопроводов АЭС России. Метод электроконтактной потенциометрии получил развитие в РФ (см., например, [19, 20]), поэтому становится актуальным вопрос возможности внесения указанного метода в список методов неразрушающего контроля, обязательных к применению на АЭС. В п. 10.35 норм безопасности [4] МАГАТЭ (IAEA) указывается на необходимость дополнительного обследования выявленных дефектов, превышающих критерии приемки, другими неразрушающими методами и методиками для установления характера дефектов (размер, форма и ориентация). В настоящее время бурное развитие получили ультразвуковые методы оценки типа (вида) дефектов, их размера, ориентации, основанные на применении фазированных решеток, дифракционно-временной метод (TOFD—time-of-flight-diffraction) и др. К сожалению, в нормативных документах России [15—16] или других по управлению старением (управлению ресурсом АЭС) нет рекомендации, аналогичной данному п. 10.35 [4] или документу [5]. Отсутствует, например, нормативный документ по применению TOFD-метода, хотя за рубежом такой документ действует с 1993 г., впервые разработанный в Британии [21] и введенный в документы серии EN.

В документе [6] рассмотрены 14 фактов безопасности АЭС, среди которых 4-й – управление старением. Указанные факторы должны учитываться при периодическом анализе безопасности (ПАБ). Исходные данные металла оборудования, его основные характеристики, параметры и результаты НК рекомендуется ввести в базовые документы при ПАБ. Базовые документы должны быть подготовлены к моменту ввода АЭС в эксплуатацию (до загрузки топлива). Программа управления старением должна обеспечить своевременное обнаружение и прогноз деградации в результате старения. При этом «следует проверить, достигается ли эффективный контроль в деградации вследствие старения за счет систематического управления старением...» (п. 5.50). В этом процессе, безусловно, имеется место для неразрушающего контроля (см. п. 4.36 документа [1]).

В нормах безопасности [7] дана классификация конструкции, систем и компонентов атомных электростанций с точки зрения их влияния на безопасность. Испытания и контроль при изготовлении КСК должны гарантировать, что КСК не имеет дефектов, способных привести к разрушению или ускорению старения. При эксплуатации КСК важных для безопасности на основе программы управления старением при систематическом подходе и на основе комплексных мероприятий, в т.ч. с использованием неразрушающего контроля, должны выполняться требования документов IAEA, структурированных согласно рис. 1 [7]. Опыт применения руководства по безопасности [5] по управлению старением АЭС обобщен и использован при разработке документа [1], введенного взамен [5] в 2018 г.

В справочнике МАГАТЭ [8] представлена терминология по безопасности АЭС. Библиографические списки в документах МАГАТЭ показывают, что МАГАТЭ регулярно выпускает документы серии «Безопасность АЭС», начиная с 1992 г.

Обобщенный международный опыт управления старением (IGBLL) на основе указанных документов показан в [9], в котором есть сборник проверенных на практике программ управления старением (ПУС), разработанных и внедренных в странах-членах IAEA на реакторных энергетических установках аналогичных ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) в России. Публикация [9] содержит общий образец анализа управления старением, сборник проверенных ПУС, сборник типовых анализов ограниченного во времени старения. Подчеркивается, что ПУС охватывает не только оборудование АЭС, но и механические, электрические и контрольно-измерительные элементы. Приводятся примеры соответствующих таблиц. Делается упор на системное управление старением, что означает обеспечение необходимых функций безопасности в течение всего срока эксплуатации АЭС и вывода из эксплуатации.

Программа управления старения охватывает конкретные механизмы старения (коррозию, коррозионное растрескивание под напряжением, термическое и радиационное старение). ПУС используется для конкретной конструкции, элемента или компонента АЭС. Эффективная ПУС включает техническое обслуживание, эксплуатационный контроль, испытания и надзор.

В публикации [9] указывается на различный подход ПУС в различных странах-членах IAEA, деятельность которых регламентируется национальными и международными нормами по безопасности АЭС.

В некоторых государствах-членах IAEA, таких как США, управление старением сосредоточено на пассивных КСЭ. В других странах управление старением охватывает активные и пассивные КСЭ, но в любом случае необходим обмен опытом эксплуатации и результатам научных исследований и разработок, направленных на обеспечение безопасности АЭС.

Также как и нормы IAEA, документы РФ [10—14] по управлению старением направлены на обеспечение безопасности. В документах РФ вместо термина «управление старением» исполь-

зуется — «управление ресурсом АЭС», а вместо «конструкции, системы, элементы (компоненты)» — «оборудование, трубопровода или элементы АЭС». В федеральных нормах и правилах [10] (п. 8) в частности указывается, что «управление ресурсом должно основываться на:

- а) соблюдении федеральных норм и правил;
- б) поддержании оборудования и трубопроводов АС в исправном состоянии ... путем выявления повреждений ...;
- в) установлении механизмов образования и развития дефектов ...;
- г) выявлении доминирующих механизмов старения, деградации и повреждений оборудования и трубопроводов ...;
- д) постоянном совершенствовании мониторинга процессов старения, деградации и повреждений» и другие.

Для реализации требований п. 8 документа [10], а в правилах [15] так же, как в нормах МАГАТЭ по безопасности [1—9], управление ресурсом закладывают при проектировании (конструировании) оборудования и трубопроводов реакторных установок АС, в т. ч. и требования по неразрушающему контролю. При производстве (изготовлении) и монтаже оборудования и трубопроводов в обязательном порядке они подлежат неразрушающему контролю согласно системы оценки соответствия в области использования атомной энергии. Правила контроля содержат сведения для осуществления неразрушающего контроля основного металла, сварных соединений, наплавов и др., а именно: объем и методы неразрушающего контроля, нормы оценки качества по результатам неразрушающего контроля (см. например, [16]).

Требования и содержание программы управления старением согласно [10] в целом соответствует аналогичным требованиям документов МАГАТЭ (IAEA) (см., например, п. 11—13, 20—22 в [10]). Из документа [10] также следует, что эксплуатационные неразрушающий контроль на АС является составной частью программы управления ресурсом АС. Типовые и рабочие программы эксплуатационного неразрушающего контроля (ЭНК) должны соответствовать программе управления ресурсом. Результаты научных исследований (п. 20 в [10]) по неразрушающему контролю вполне могут быть использованы для «проведения мониторинга прогнозирования деградации оборудования и трубопроводов...», чтобы «обеспечить выявление механизмов деградации на ранней стадии их проявления...» (см. п. 33 в [10]).

В руководстве по безопасности [11] представлены критерии оценки технического состояния при управлении ресурсам оборудования и трубопроводов атомных станций. Подчеркивается, что «выявление доминирующих (определяющих) механизмов старения, деградации и повреждений оборудования и трубопроводов» является неотъемлемой частью программы управления ресурсом. В документе [11] аналогично нормам по безопасности IAEA система управления старением (ресурсом) рекомендуется при проектировании, конструировании, производстве (изготовлении), сооружении (включая монтаж, наладку, ввод в эксплуатацию, реконструкцию, ремонт), эксплуатации и выводе из эксплуатации. В приложении 4 документа [11] дан примерный перечень параметров для определения ресурсных характеристик, а в приложении 5 — примерный перечень критериев оценки ресурса оборудования и трубопроводов АС, работающих под давлением. Неразрушающий контроль может быть использован для оценки «качественного изменения структуры металла, приводящего к появлению новых механизмов его деградации...», п. 9 приложения 4 (или 5) в [11]. Общую и локальную толщину стенки (п. 2 и 3 приложения 5) оценивают с применением УЗ толщинометрии. Рекомендуется определить «качественные изменения структуры металла» (п. 10, приложение 5). Обзор, представленный в статье [17], показал, что для указанной цели допустимо применение неразрушающих методов контроля (акустических, электромагнитных, электрических). Такой подход позволит реализовать рекомендации [11] по мониторингу ресурсных характеристик оборудования и трубопроводов АС (см. приложение 5, п.10 и 11[11]).

Общую и локальную толщину стенок оборудования трубопроводов АС измеряют при проведении планово-предупредительных работ. В практике УЗ толщинометрии отмечают существенные трудности. Имеются случаи невозможности выполнения измерений толщины из-за отсутствия донного эхосигнала от внутренней поверхности объекта контроля, т.к. величина сигнала зависит от толщины отложений и отражающих свойств этих отложений.

Определение коррозионного (эрозионного - коррозионного) износа стенки объекта контроля становится затруднительным или невозможным. Решения указанной задачи изложена в методике [18]. Однако статистические данные по эффективности применения технологии фазированных решеток по измерению профиля контролируемой внутренней поверхности отсутствуют.

В ГОСТе [12] указывается, что управление старением основывается на «установлении механизмов образования и роста дефектов, способных привести к разрушению или отказу элементов,

выявлении доминирующих (определяющих) механизмов старения, деградации и проведении элементов и др. (п. 5.3). В изучении указанных процессов может быть успешно использован неразрушающий контроль. В п. 5.5 [12]: «способы мониторинга направлены на сдерживание деградации элементов в рамках контроля технического состояния» на основе «выявления деградации элементов посредством входного и эксплуатационного контроля, посредством технического освидетельствования, проверок, испытаний, ... вибрационного контроля и технического диагностирования». Таким образом, существующая на АС и успешно действующая система входного, эксплуатационного контроля, технического диагностирования является составной частью управления ресурсом (старения) элементов блока АС. При этом «рабочие программы эксплуатационного неразрушающего контроля ... должны учитывать требования программы управления старением» (п. 8.10 в [12]).

В руководствах по безопасности [13, 14] рассмотрены вопросы мониторинга ресурсных характеристик применительно к арматуре и насосам АС. В приложении 6 документа [13] даны рекомендуемые методы мониторинга ресурсных характеристик арматуры. Для определения общей и локальной толщины стенки корпуса или других элементов арматуры рекомендуется УЗ толщинометрия, визуальный и измерительный контроль. Это прямое применение методов неразрушающего контроля. Косвенным образом неразрушающий контроль может быть использован в качестве экспериментального метода оценки накопительного усталостного повреждения металла, качественных изменений структуры металла, приводящих к его деградации и ускоренному исчерпанию ресурса арматуры, а также необратимых изменений технических характеристик арматуры вследствие отложений, износа элементов арматуры (см. 4, 10 и 13 приложения 6 в [13]).

Аналогичный подход в части применения неразрушающего контроля в процессе мониторинга ресурсных характеристик возможен и для насосов атомных станций (см. п. 1, 2, 10 и 15 приложения 6 руководства [14]).

Оценивая содержание документов IAEA [1—9] и РФ [10—16], в целом можно утверждать, что в них прослеживается системный подход управления старением, составной частью которой является применение НК на всех этапах жизненного цикла АС: проектирование, конструирование, производство, ввод в эксплуатацию, эксплуатация и вывод из эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Безопасность атомных станций является приоритетной задачей. Управления старением, которому уделяется особое внимание, есть один из важнейших элементов — факторов безопасности.

2. Системный подход в реализации управлением старением прослеживается и в нормах безопасности МАГАТЭ, и в документах РФ (Россия является полноправным членом стран, входящих в МАГАТЭ).

3. Согласно нормам безопасности МАГАТЭ (IAEA) и документам РФ неразрушающий контроль включен в систему управления старением (ресурсам) АС на всех этапах: проектирование (конструирование), монтаж, эксплуатация, реконструкция (модернизация) и вывод из эксплуатации.

4. Эффективно действующую в атомной энергетике систему обеспечения безопасности (включая управление старением АС) предлагается распространить при поддержке Правительства РФ на все отрасли промышленности России, в которых эксплуатируются потенциально-опасные объекты (нефте- и газопроводы, теплоэнергетическое оборудование тепловых и гидроэлектростанций, резервуары и сосуды, работающие под давлением и многое другое). Например, в работе [22] показано необходимость применения НК на магистральных газонефтепроводах из-за большого количества аварий.

5. В документах МАГАТЭ и РФ прослеживается тенденция расширения функций НК от классического подхода по обнаружению, оценке допустимости несплошностей (дефектов) по результатам НК к применению НК для мониторинга процессов деградации, старения металла оборудования, трубопроводов и иных элементов АС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA, Ageing Management and Development of a programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide Series No. SSG-48, Vienna, 2018.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety of Nuclear Power Plants: Desingu, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.

3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Maintenance, Surveillance and in-service inspection in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.6, IAEA, Vienna, 2002.
5. IAEA, Aging Management for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.12, Vienna, 2009.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-25, IAEA, Vienna, 2016.
7. IAEA, Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Guide Series No. SSG-30, IAEA, Vienna, 2014.
8. IAEA, Terminology Used in Nuclear Safety and radiation protection, IAEA Safety Glossary, Vienna, 2019.
9. IAEA, Aging Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), Safety Reports Series, No. 82. Vienna, 2015.
10. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. НП-096-15/научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. М. 2015. 18 с.
11. Управление и методы мониторинга ресурсных характеристик работающих под давлением оборудования и трубопроводов атомных станций. РБ-132-17. М.: НТЦ ЯРБ, 2017. 23 с.
12. ГОСТ Р 58341.1—2019. Элемент блока атомной станции. Порядок управления ресурсом. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.
13. Ростехнадзор. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик арматуры атомных станций». М. 21 с.
14. Ростехнадзор. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик насосов атомных станций». РБ-131-17. М. 2017. 22 с.
15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок». НП-089-15. М. 2015.
16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже». НП-105-28. М. 2018.
17. Ушаков В.М., Евтушенко С.Г., Жуков А.Д., Юречко А.С. Неразрушающий контроль в управлении старением металла оборудования и трубопроводов атомных станций. Обзор // Контроль. Диагностика. 2020. № 5. С. 6—18. [Ushakov V.M., Evtushenko S.G., Zhukov A.D., Yurechko A.S. The Non-Destructive Testing for Aging Management of Equipment and Pipelines at Nuclear Power Plants. Review // Kontrol. Diagnostika (Testing. Diagnostics) 2020. V. 23. No 5. P. 6—18.]
18. АО «Концерн «Росэнергоатом». Сплошная ультразвуковая толщинометрия металла сварных соединений с применением фазированных решеток. Методика МТ 1.2.1.15.001.1087-2015. М. 2015.
19. Surin V. New potential for potentiometry // Nuclear Engineering International. 2018. 63 (765). P. 30—32.
20. Сурин В.И., Зорина Т.Н., Коротин А.Ф. Поверхностная потенциометрия материалов при длительных усталостных испытаниях / Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Т. 2. Нанопизика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 344.
21. Guide to Calibration and Setting up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection. Location and sizing of flows. BS 7706: 1993.
22. Алешин Н.П. Возможность методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций // Сварка и Диагностика. 2011. № 6. С. 44—47.

## МЕТОДИКА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. Ли Кайюй<sup>1,2</sup>, Цю Пэнчэн<sup>1</sup>, Ван Пин<sup>1,2</sup>, Лу Цзысян<sup>1</sup>, Чжан Чжэнда<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Колледж автоматики, Нанкинский университет авиации и астронавтики, Нанкин, 211100

<sup>2</sup>Ведущая лаборатория Министерства промышленности и информационных технологий по неразрушающему контролю и мониторингу на объектах высокоскоростного транспорта

\*E-mail: 1826581388@qq.com

Поступила в редакцию 31.08.2020; после доработки 30.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

В современной сталелитейной промышленности определение механических свойств ферромагнитных материалов основывается на разрушающих методах контроля, что значительно увеличивает стоимость производства. В данной статье предлагается метод оценки механических свойств ферромагнитных материалов, основанный на методах импульсных вихревых токов (ИВТ). Во-первых, стандартные характеристики сигнала ИВТ, такие как пики дифференциального сигнала и спектральные амплитуды, применяются для количественной оценки механических свойств. Во-вторых, метод, основанный на разложении на эмпирические моды и преобразовании Гильберта—Хуанга, используется для выделения маргинального спектрального пика и маргинальной спектральной энергии в качестве новых характеристик. Наконец, представлен алгоритм нейронной сети с обратным распространением (НОР) для количественной оценки параметров механических свойств. Результаты показывают, что сочетание как стандартных, так и новых функций подходит для оценки механических свойств. Метод обладает высокой точностью количественной оценки механических параметров.

*Ключевые слова:* импульсные вихревые токи, условный предел текучести, нейронная сеть с ОР, многопараметровость.

DOI: 10.31857/S0130308221020081

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнитные материалы (такие как сталь) широко используются на железной дороге, в авиакосмической промышленности и строительстве. Их механические свойства напрямую влияют на безопасность большого количества основного оборудования. В современной сталелитейной промышленности нельзя игнорировать метод неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов. Поскольку сигнал импульсного вихревого тока (ИВТ) содержит широкий спектр, который очень чувствителен к проводимости и проницаемости материала, методы ИВТ широко используются для обнаружения дефектов, определения толщины и обнаружения напряжений [1—3]. Тем не менее по-прежнему существует проблема расширения методов ИВТ для контроля механических свойств ферромагнитных материалов.

Что касается определения механических свойств, разрушающие испытания (такие как испытание на растяжение) по-прежнему являются основными методами, что значительно увеличит стоимость производства и приводит к большому количеству отходов производства. Более того, их нельзя встроить в производственную линию. Прогнозирование механических свойств, основанное на химическом анализе и микроструктурных наблюдениях, может служить ориентиром для процесса производства, но не стало точным методом контроля механических свойств [4—6]. В последние годы для проведения неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов использовались различные электромагнитные методы [7—9]. Немецкий институт Fraunhofer IZFP предложил метод ЗМА для испытания механических свойств [10—12]. Метод ЗМА сочетает в себе метод Баркгаузена, метод вихревых токов и измерение дифференциальной магнитной проницаемости, то есть 41 электромагнитный параметр, со ступенчатой регрессией механических свойств (условный предел текучести и прочность при растяжении). ЗМА, хоть и относительно продуманная методика, имеет несколько недостатков. Он дорогой, а также приводит к взаимным помехам нескольких электромагнитных сигналов. Кроме того, требуется много времени на калибровку датчика. Liu Xicheng предложил метод измерения твердости поверхности, растягивающего напряжения и глубины дефекта, в котором комбинируются измерения шумов Баркгаузена, тангенциального магнитного поля и петель гистерезиса [13]. He Cunfu предложил метод оценки механических свойств среднеуглеродистой стали. Используя в исследовании точеч-

ный электромагнитный датчик, автор делает вывод о том, что основная амплитуда линейно связана с твердостью образца [14]. Большинство существующих методов неразрушающего контроля механических свойств должны включать в себя различные электромагнитные методы и часто используют методы одночастотных вихревых токов вместо популярных методов ИВТ. По сравнению с одночастотным вихретоковым сигналом, сигнал ИВТ может выделять больше характеристик. Следовательно, существует большая перспектива использовать методы ИВТ для контроля механических свойств ферромагнитных материалов [15—17]. В данной работе предлагается метод оценки механических свойств ферромагнитных материалов на основе ИВТ. Во-первых, для приблизительной оценки механических свойств применяются традиционные характеристики сигнала ИВТ. Затем разложение на эмпирическое моды (РЭМ) и преобразование Гильберта—Хуанга (ПГХ) объединяются для анализа сигнала ИВТ. Мы извлекаем новые характеристики на основе АРЭМ—ПГХ, а затем анализируем и сравниваем эффективность новых и старых характеристик. Наконец, алгоритм НОР используется для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов. Эффективно достигается количественная оценка трех механических свойств (условный предел текучести, прочность при растяжении и удлинение).

## 2. МЕТОД

### 2.1. Принцип метода ИВТ

Сигнал ИВТ определяется по напряженностью магнитного поля и по распределению магнитного поля возле зонда, поэтому такие факторы, как амплитуда и частота сигнала возбуждения, проводимость и проницаемость исследуемого образца, различные типы дефекта и расстояние отрыва, влияющие на магнитное поле, будут влиять на сигнал ИВТ [18,19]. Если мы будем управлять частью влияющих факторов и оставлять их постоянными, можно выявить определенные параметры. Механические свойства ферромагнитных материалов в основном определяются микроструктурой, а изменения микроструктуры влияют на такие электромагнитные свойства, как проводимость и проницаемость материала [20], а затем влияют на сигнал ИВТ. Следовательно, управляя амплитудой, частотой, отрывом зонда и другими факторами, влияющими на сигнал, можно проанализировать взаимосвязь между сигналом ИВТ и механическими свойствами ферромагнитных материалов. Исходя из достаточного количества данных выборки, можно создать модель алгоритма нейронной сети, которая принимает сигнал ИВТ на вход, а на выход подавать механические свойства контролируемого образца.

### 2.2. Традиционные характеристики ИВТ-сигналов

В настоящее время существующие исследования по анализу ИВТ-сигналов проводятся в основном с двух точек зрения — во временной области и в частотной области [21—23]. Анализ во временной области в основном нацелен на определении изменения формы кривой отклика. Анализ в частотной области обычно основан на преобразовании Фурье. Традиционные характеристики, извлекаемые из сигнала ИВТ, включают как характеристики временной области, так и характеристики частотной области: пиковое напряжение, время пика и спектральная амплитуда. Эти характеристики отражают внутреннюю информацию об исследуемом образце, которая имеет высокую корреляцию с электромагнитными свойствами, такими как электрическая проводимость и магнитная проницаемость. В этой статье мы выбрали некоторые традиционные характеристики, которые более чувствительны к внутренним различиям контролируемых образцов. Традиционные характеристики временной области, определяемые в нашем эксперименте, включают пик дифференциального сигнала ( $PV_d$ ), пик первой производной ( $PV_i$ ) и единый период интеграции ( $F_g$ ). Традиционные характеристики частотной области включают основную гармонику  $\omega_1$ , третью гармонику  $\omega_3$  и пик спектральной плотности мощности  $P_{\max}$ .

### 2.3. Характеристики ИВТ-сигналов, определяемые по АРЭМ—ПГХ

Большинство существующих методов анализа, включая методы анализа во временной и частотной областях, основаны на предположении о стационарности сигнала. Поскольку сигнал ИВТ является нестационарным сигналом, использование только традиционных характеристик повлияет на точность анализа. Поэтому в этой статье метод анализа в частотно-временной области, который подходит для анализа нелинейных и нестационарных сигналов с возможностью

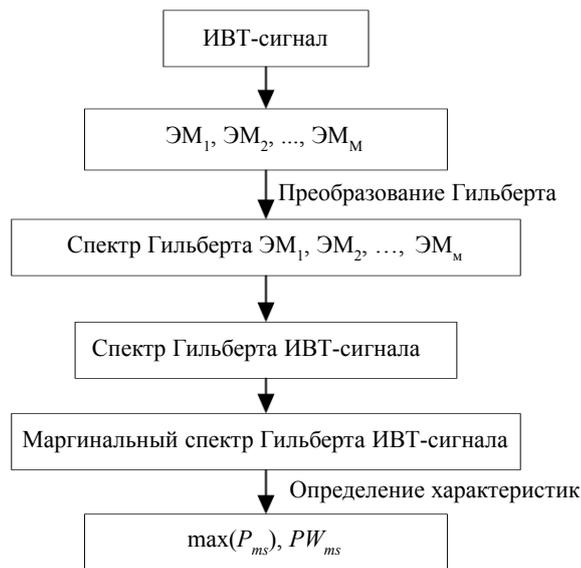


Рис. 1. Алгоритм метода АРЭМ—ПГХ.

самоадаптации, используется при анализе сигналов ИВТ и определении характеристик. Основываясь на этом, метод ансамблевого разложения на эмпирические моды (АРЭМ) и метод преобразования Гильберта—Хуанга (ПГХ) объединяются для получения новой характеристики частотно-временной области сигнала ИВТ. Во-первых, сигнал ИВТ раскладывается с помощью АРЭМ. Затем спектр Гильберта и его сигнал ИВТ вычисляются в соответствии с эмпирической модой (ЭМ), полученной путем разложения. Наконец, новый ИВТ-параметр определяется путем анализа маргинального спектра Гильберта. Алгоритм метода АРЭМ—ПГХ показан на рис. 1.

(1) С помощью АРЭМ разложить ИВ-сигнал, чтобы получить ряд эмпирических мод  $ЭМ_1, ЭМ_2, \dots, ЭМ_M$  и сумму остатков. Количество ЭМ определяется по формуле 1, где  $M$  — это количество ЭМ, а  $L$  — длина сигнала:

$$M = 2 \log(L) - 1. \quad (1)$$

(2) Провести преобразование Гильберта—Хуанга для каждой ЭМ, полученной при разложении в спектр Гильберта.

(3) Интегрируя спектр Гильберта каждой ЭМ, получить исходный сигнал, то есть спектр Гильберта ИВТ-сигнала, и затем проинтегрировать спектр Гильберта ИВТ-сигнала для получения маргинального спектра ИВТ-сигнала.

(4) Выделить пик и энергию маргинального спектра ИВТ-сигнала в качестве новых характеристик ( $\max(P_{ms}), PW_{ms}$ ).

Новые параметры получают из маргинального спектра ИВТ-сигнала. Выделенные параметры представляют собой маргинальный спектральный пик ( $\max(P_{ms})$ ) и маргинальную спектральную энергию ( $PW_{ms}$ ). Маргинальный спектр интегрируется для получения энергии маргинального спектра. Маргинальный спектр Гильберта ИВТ-сигнала показывает изменение амплитуд сигнала с частотой по всей полосе частот, которая имеет большее разрешение, чем амплитудно-частотный спектр, полученный преобразованием Фурье.

И маргинальный спектральный пик, и маргинальная спектральная энергия тесно связаны с ИВТ-сигналом и подвержены влиянию со стороны внутреннего состояния вещества. Следовательно, маргинальный спектральный пик ( $\max(P_{ms})$ ) и маргинальная спектральная энергия ( $PW_{ms}$ ) ИВТ-сигнала определяются как новые характеристики ИВТ-сигнала временной и частотной области

#### 2.4. Количественная оценка механических свойств на основе ОР-нейросети

ОР-нейросеть — это сеть с прямой связью, состоящая из входного слоя, выходного слоя и одного или нескольких скрытых слоев. Типичная четырехуровневая модель ОР-нейронной сети показана на рис. 2.

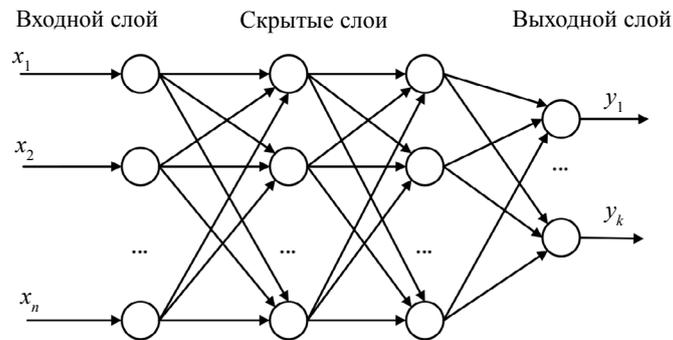


Рис. 2. Структура ОР-нейросети.

Основная особенность ОР-нейронной сети состоит в том, что сигнал распространяется вперед, а ошибка распространяется назад [24—25]. Основная идея всего алгоритма заключается в корректировке веса и порога сети путем вычисления ошибки между выходным слоем и ожидаемым значением, чтобы ошибка максимально соответствовала требованиям. В этой статье ОР-нейронная сеть используется для установления модели взаимосвязи между характеристиками сигнала ИВТ и параметрами механических свойств.

Основные этапы создания нейронной сети заключаются в следующем.

(1) Определить входные и выходные данные модели ОР-нейронной сети.

Выборки делятся на обучающую выборку и тестовую выборку. К каждому сигналу добавляются данные, которые представляет собой истинное значение механических свойств, соответствующих испытываемому образцу. Таким образом, каждый сигнал включает в себя три дополнительных параметра (условный предел текучести, прочность при растяжении и удлинение) и последовательность характеристик сигнала ИВТ. Входными данными модели являются наборы последовательностей характеристик сигнала ИВТ образца, как показано в формуле 2, где  $k_1, k_2, \dots, k_n$  представляют собой различные характеристики сигнала ИВТ. Выходные данные модели включают истинные значения механических свойств контролируемой детали, как показано в формуле 3.

$$X_i = [k_1, k_2, \dots, k_n]; \quad (2)$$

$$X_0 = [R_p, 0,2, R_m, A]. \quad (3)$$

(2) Разработать структуру и параметры модели ОР-нейронной сети.

Для повышения точности количественной оценки и скорости сходимости функции выбрана ОР-нейронная сеть с двумя скрытыми слоями, которая включает в себя входной слой, два скрытых слоя и выходной слой. Поскольку входными данными модели являются характеристики сигнала ИВТ, а выходными данными — три параметра механических свойств, количество узлов входного слоя устанавливается равным количеству характеристик, а количество узлов выходного слоя устанавливается равным трем.

(3) Выполнить обучение ОР-нейронной сети для получения модели нейросети.

Последовательность характеристик обучающей выборки принимается в качестве входных данных модели ОР-нейронной сети, а данные, упомянутые выше, принимается в качестве выходных данных модели. Обучение модели ОР-нейронной сети и веса с пороговыми значениями оптимизируются в соответствии с глобальной ошибкой каждой итерации. После длительного обучения, наконец, получается модель нейронной сети ВР, которая удовлетворяет требованиям к ошибкам.

Чтобы оценить достоверность установленной модели ОР-нейронной сети для количественной оценки механических свойств, в наш эксперимент была введена средняя относительная погрешность  $\delta_{ave}$ . Различные контролируемые образцы имеют разные результаты оценки и относительные погрешности. Средняя относительная погрешность  $\delta_{ave}$  отражает средний уровень относительной погрешности результатов оценивания всех протестированных выборок. Это выражается следующим образом:

$$\delta_i = \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{x_i} \times 100\%; \quad (4)$$

$$\delta_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad (5)$$

где  $\delta_i$  — относительная погрешность результата определения параметра образца;  $\hat{x}_i$  — рассчитываемое значение;  $x_i$  — реальное значение;  $n$  — общее количество контролируемых образцов.

### 3. ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

#### 3.1. Образцы

В этом эксперименте в качестве стандартных образцов для испытаний была выбрана партия пластин из низколегированной стали, изготовленная «Nanjing Iron and Steel Group» по индивидуальному заказу. Использовали десять пластин одинаковой формы, размера, толщины, но с разными механическими свойствами. Параметры механических свойств каждого испытуемого образца показаны в табл. 1. Эти стандартные образцы пронумерованы от 1 до 10 и не имеют поверхностных или внутренних повреждений. Условный предел текучести ( $R_p$ , 0,2), прочность при растяжении ( $R_m$ ) и относительное удлинение ( $A$ ) — три важных параметра механических свойств для оценки качества ферромагнитных объектов. В данной статье в основном оцениваются эти три механических свойства.

Таблица 1

Механические свойства образцов

Номер образца	$R_p$ , 0,2, МПа	$R_m$ , МПа	$A$ , %
1	163	286	46,40
2	182	304	46,10
3	257	370	39,40
4	277	376	38,10
5	318	385	35,70
6	254	356	42,10
7	383	457	31,80
8	471	599	23,20
9	397	645	26,20
10	486	815	11,60

#### 3.2. Экспериментальная установка

Как показано на рис. 3, система детектирования ИВТ состоит из преобразователя, генератора сигналов возбуждения, усилителя мощности, источника питания постоянного тока, контролируе-



Рис. 3. Установка ИВТ-контроля.

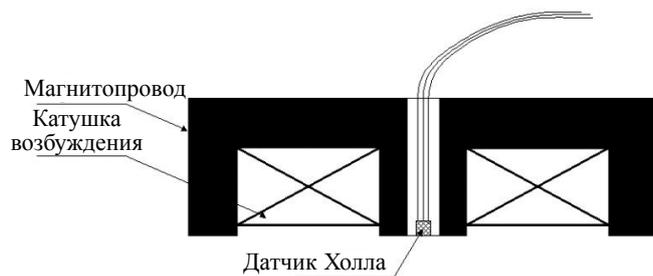


Рис. 4. Конструкция ИВТ-преобразователя.



Рис. 5. Внешний вид преобразователя.

мой детали, платы сбора данных, устройства трехмерного позиционирования и компьютера промышленного применения. Преобразователь состоит из трех частей: катушки возбуждения, магнитного датчика и магнитопровода. Конструкция преобразователя показана на рис. 4 и 5. Возбуждающий сигнал подается на катушку возбуждения после усиления на усилителе мощности. Конструкция катушки возбуждения напрямую влияет на чувствительность преобразователя. В процессе проектирования установки были протестированы и сопоставлены несколько наборов катушек возбуждения с разными диаметрами проводов и количеством витков, и в итоге была выбрана лучшая. Параметры выбранной катушки возбуждения приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Параметры катушки возбуждения

Параметр	Значение
Диаметр эмалированного провода	0.27 мм
Внутренний диаметр катушки	5 мм
Внешний диаметр катушки	8 мм
Высота катушки	7 мм
Число витков	400
Сопротивление	40 Ом
Индуктивность	48 мГн

В эксперименте выбранный возбуждающий сигнал представляет собой меандр с амплитудой 8 В, частотой 20 Гц и скважностью 50 %. Выходная мощность составляет около 2,2 Вт, частота дискретизации — 20 кГц, интервал дискретизации — 1 с.

В соответствии с схемой эксперимента каждая из отобранных десяти стальных пластин была подвергнута 20 измерениям в разных местах пластины (за исключением краев), было получено в общей сложности 200 комплектов сигналов. 20 сигналов от каждой стальной пластины были разделены на 19 обучающих наборов сигналов и один тестовый набор. Итого, всего было 190 обучающих наборов и 10 тестовых наборов.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 4.1. Анализ достоверности и сравнение характеристик ИВТ-сигналов

Как описано в разделах 2.2 и 2.3, каждый сигнал содержит шесть традиционных характеристик и две новых. Поэтому мы обучили 3 нейросети, первая из них в качестве входных данных использовала 6 традиционных характеристик, вторая — 2 новые, а третья — и те, и те, т.е. 8 параметров суммарно. ОР-нейронные сети были обучены с помощью 190 наборов обучающих выборок, затем они были использованы для тестирования 10 тестовых наборов и прогнозирования трех параметров механических свойств стальных листов: условного предела текучести  $R_p 0,2$ , прочности при растяжении  $R_m$  и удлинения  $A$ . Средняя относительная погрешность определения параметров механических свойств приведены в табл. 3.

Средняя относительная погрешность определения параметров механических свойств при использовании различных характеристик

Входные данные модели	Средняя относительная ошибка $\delta_{ave}$ , %		
	$R_p$ 0,2	$R_m$	$A$
Шесть традиционных характеристик	6,82	3,42	5,40
Две новых характеристики	5,70	3,22	2,51
Традиционные и новые характеристики	3,85	2,06	2,33

Следующие экспериментальные результаты можно получить из табл. 3.

(1) Когда в качестве входных данных использовались новые характеристики, средняя относительная ошибка для трех параметров была меньше, чем у традиционных характеристик, используемых в качестве входных данных.

(2) Когда в качестве входных данных использовались традиционные и новые характеристики вместе, результат контроля был наилучшим.

Результат эксперимента показывает, что для количественной оценки механических свойств две новые характеристик лучше шести традиционных функций, поскольку мы считаем, что новая характеристика содержит информацию о времени и частоте сигнала, что может точно отражать подробную информацию об ИВТ-сигнале. У традиционных характеристик нет этого преимущества, поэтому новые характеристики лучше для оценки. Когда традиционные характеристики объединяются с новыми характеристиками в качестве входных данных ОР-нейронной сети, средняя относительная ошибка для трех параметров механических свойств является наименьшей. Это связано с тем, что сочетание традиционных и новых характеристик является наиболее универсальным, так как, в таком случае, могут компенсироваться недостатки использования традиционных или только новых характеристик.

Поскольку сочетание традиционных и новых характеристик в качестве входных данных дает наилучшую оценку механических свойств, при обучении ОР-нейронной сети, которое выполняется ниже, использовались эти характеристики в совокупности.

#### 4.2. Количественная оценка механических свойств на основе ОР-нейросети

Восемь характеристик используются в качестве входных данных модели, а три параметра механических свойств используются в качестве выходных данных. После 200-кратного обучения получается оптимальная структура модели с лучшей способностью к сходимости и способностью к обобщению. Коэффициент корреляции модели показан на рис. 6.

Чем ближе коэффициент корреляции  $R$  на рис. 6 к 1, тем лучше будет эффект аппроксимации модели нейронной сети на отношении ввода-вывода. Из рисунка видно, что коэффициент корреляции между результатом обучения и целевыми данными составляет 0,9999, коэффициент корреляции между результатом верификации и целевыми данными составляет 0,99026, коэффициент корреляции между результатом прогнозирования и целевыми данными 0,98437, а коэффициент корреляции обученной общей сетевой модели 0,99569. Результаты показывают, что расчетные значения модели хорошо коррелируют с фактическими результатами и могут использоваться для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов. Модель ОР-нейронной сети, полученная путем обучения, использовалась для количественной оценки параметров механических свойств тестируемых образцов. В табл. 4—6 приведены результаты количественной оценки условного предела текучести  $R_p$  0,2, прочности при растяжении  $R_m$  и удлинения  $A$  испытанных образцов по отдельности.

Из табл. 4—6 видно, что относительная погрешность количественной оценки механических свойств испытуемого образца составляет менее 8 %. Общая точность выше, а максимальная средняя относительная погрешность условного предела текучести  $R_p$  0,2, прочности при растяжении  $R_m$  и удлинения  $A$  составляет соответственно 7,85, 4,31 и 5,74 %. Это указывает на то, что модель ОР-нейронной сети может реализовать неразрушающую количественную оценку механических свойств ферромагнитных материалов, и это подтверждает возможность количественной оценки параметров механических свойств на основе метода ИВТ и эффективность восьми выбранных характеристик. Эксперименты показывают, что модель ОР-нейронной сети, основан-

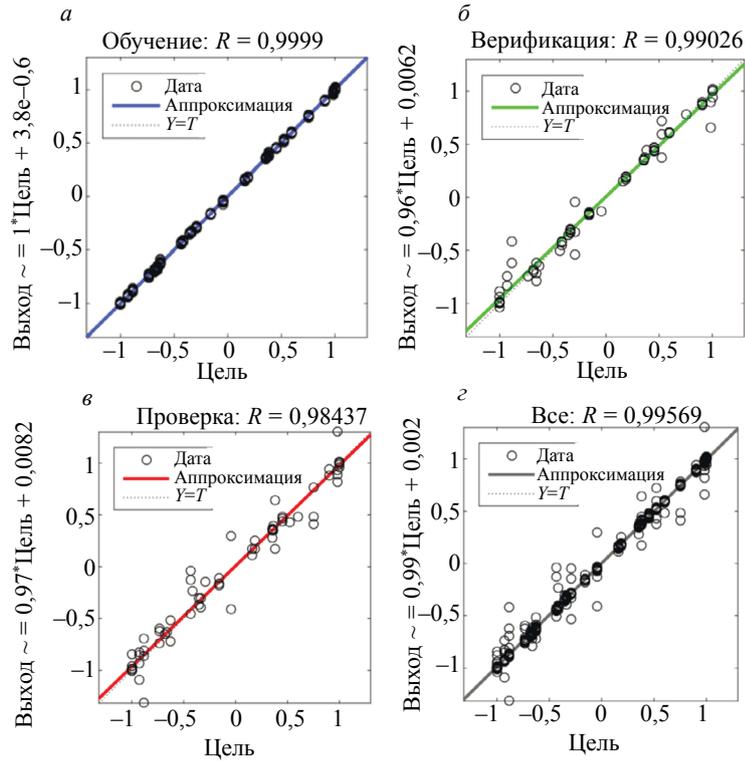


Рис. 6. Коэффициент корреляции модели ОР-нейросети.

Таблица 4

Результаты количественной оценки условного предела текучести ( $R_p 0,2$ )

Номер образца	Расчетное значение, МПа	Фактическое значение, МПа	Относительная погрешность, %
1	168,92	163	3,63
2	187,54	182	3,04
3	243,55	257	5,23
4	257,53	277	7,03
5	293,11	318	7,83
6	273,93	254	7,85
7	378,69	383	1,13
8	463,96	471	1,49
9	397,86	397	0,22
10	491,04	486	1,04

Таблица 5

Результаты количественной оценки прочности при растяжении ( $R_m$ )

Номер образца	Расчетное значение, МПа	Фактическое значение, МПа	Относительная погрешность, %
1	288,78	286	0,97
2	308,63	304	1,52
3	354,85	370	4,09
4	359,80	376	4,31
5	374,73	385	2,67
6	363,75	356	2,18
7	452,61	457	0,96
8	615,24	599	2,71
9	652,13	645	1,11
10	814,67	815	0,04

Результаты количественной оценки относительного удлинения (А)

Номер образца	Расчетное значение, %	Фактическое значение, %	Относительная погрешность, %
1	46,17	46,4	0,50
2	46,30	46,1	0,43
3	40,60	39,4	3,05
4	39,32	38,1	3,21
5	37,75	35,7	5,74
6	40,04	42,1	4,90
7	32,09	31,8	0,91
8	23,06	23,2	0,58
9	25,69	26,2	1,94
10	11,36	11,6	2,08

ная на характеристиках сигнала ИВТ, позволяет осуществлять неразрушающую количественную оценку механических свойств ферромагнитных материалов и достигать более высокой точности.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ

В данной статье методы ИВТ применяются для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов. Во-первых, традиционные характеристики сигнала ИВТ применяются для количественной оценки механических свойств. Затем предлагается новый метод на основе АРЭМ—ПГХ для извлечения новых характеристик сигнала ИВТ и сравнивается эффективность новых и старых характеристик. Результат показывает, что предполагаемые результаты для новых характеристик лучше, чем для традиционных характеристик. Наконец, ОР-нейронная сеть используется для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов с традиционными и новыми характеристиками, а также осуществляется количественная оценка трех механических свойств. Метод, предложенный в этой статье, не только отвечает требованиям точности промышленного производства с точки зрения погрешности, но также имеет преимущества неразрушающего контроля с большой практической ценностью, поскольку он позволяет избежать большого количества экспериментов на растяжение и снижает материальные потери.

Последующие эксперименты позволят расширить тип и количество образцов, увеличить размер выборки и построить более полную модель нейронной сети. Когда размер выборки станет достаточно большим, авторы попробуют использовать глубокую сеть доверия, сверточную нейронную сеть и другие алгоритмы при количественную оценку параметров механических свойств.

Работа частично поддержана Национальной программой развития и ключевых исследований «Разработка основных научных приборов и оборудования» (2017YFF0107304), Национальным планом развития и ключевых исследований «Производство материалов и производство лазеров» (2016YFB1100205), Программой разработки специальных научных приборов Министерства науки и технологии Китая (2016YFF0103702), Национальным фондом естественных наук Китая (61527803), Открытым фондом Нанкинского университета авиации и астронавтики (kfjj20180315), Открытым фондом ведущей лаборатории Министерства промышленности и информационных технологий «Неразрушающий контроль и технологии мониторинга на объектах высокоскоростного транспорта».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Desjardins D., Krause T. W., Clapham L. Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity // NDT & E International. 2016. V. 80. P. 65—70.
2. Fan M., Cao B., Sunny A. I. et al. Pulsed eddy current thickness measurement using phase features immune to liftoff effect // NDT & E International. 2017. V. 86. P. 123—131.
3. Xu Z., Wu X., Li. et al. Assessment of wall thinning in insulated ferromagnetic pipes using the time-to-peak of differential pulsed eddy-current testing signals // Ndt & E International. 2012. V. 51. No. 10. P. 24—29.

4. Kolokolnikov S., Dubov A., Steklov O. Assessment of welded joints stress-strain state inhomogeneity before and after post weld heat treatment based on the metal magnetic memory method // *Welding in the World*. 2016. V. 60. No. 4. P. 1—8.
5. Dubov A. A., Kolokolnikov M. S. Assessment of the material state of oil and gas pipelines based on the metal magnetic memory method // *Welding in the World*. 2012. V. 56. No. 3/4. P. 11—19.
6. Dubov A., Dubov A., Kolokolnikov S. Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts // *Welding in the World*. 2014. V. 58. No. 2. P. 225—236.
7. Ghanei S., Saheb Alam A., Kashefi M. Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausen noise technique // *Materials Science & Engineering A*. 2014. V. 607. P. 253—260.
8. Dobmann G., Altpeter I., Kopp M. Nondestructive materials characterization of irradiated nuclear pressure-vessel steel samples by the use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties // *Russ. J. Nondestr. Test*. 2006. V. 42. P. 272—277.
9. Altpeter Iris, Becker Raine, Dobmann Gerd, RolfKern, Theiner Werner, Yashan Andreij. Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation // *Inverse Prob*. 2002. V.18. No. 6. P. 1907—21.
10. Dobmann G., Altpeter I., Wolter B. et al. Industrial applications of 3MA—micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis // *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI)*. 2008. V. 31. P. 18—25.
11. Dobmann G., Kern R., Altpeter I. et al. Quantitative Hardening-Depth-Measurements Up to 4 mm by Means of Micro-Magnetic Microstructure Multiparameter Analysis (3MA) // *NDT & E International*. 1991. V. 24. No. 1. P. 44.
12. Stupakov A., Perevertov O., Zablotskii V. A system for controllable magnetic measurements of hysteresis and Barkhausen noise // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. V. 65. No. 5. P. 1087—1097.
13. Xiucheng L., Wanli S., Cunfu H. et al. Simultaneous quantitative prediction of tensile stress, surface hardness and case depth in medium carbon steel rods based on multifunctional magnetic testing techniques // *Measurement*. 2018. V. 128. P. 455—463.
14. He C., Huang Y., Liu X. et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT al. Evaluation of mechanical properties in medium carbon steel with a point mode electromagnetic sensor // *Sensors & Actuators A Physical*. 2018. V. 269. P. 126—136.
15. Gui Y.T., He Y., Adewale I. et al. Research on spectral response of pulsed eddy current and NDE applications // *Sensors & Actuators A Physical*. 2013. V. 189. No. 2. P. 313—320.
16. Cheng W. Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. V. 31. No. 3. P. 215—224.
17. Angani C. S., Park D. G., Kim C. G. et al. The Pulsed Eddy Current Differential Probe to Detect a Thickness Variation in an Insulated Stainless Steel // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2010. V. 29. No. 4. P. 248—252.
18. Huang C., Wu X., Xu Z. et al. Ferromagnetic material pulsed eddy current testing signal modeling by equivalent multiple-coil-coupling approach // *NDT&E International*. 2011. V. 44. No. 2. P. 163—168.
19. Alamin M., Tian G Y., Andrews A. et al. Principal component analysis of pulsed eddy current response from corrosion in mild steel // *IEEE Sensors Journal*. 2012. V. 12. No. 8. P. 2548—2553.
20. Dobmann G., Altpeter I., Wolter B. et al. Industrial applications of 3MA—micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis // *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI)*. 2008. V. 31. P. 18—25.
21. Stott C. A., Underhill P R., Babbar V. K. et al. Pulsed Eddy Current Detection of Cracks in Multilayer Aluminum Lap Joints // *IEEE Sensors Journal*. 2015. V. 15. No. 2. P. 956—962.
22. He Y., Tian G., Zhang H. et al. Steel Corrosion Characterization Using Pulsed Eddy Current Systems // *IEEE Sensors Journal*. 2012. V. 12. No. 6. P. 2113—2120.
23. Chen T., Tian G Y., Sophian A. et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT // *NDT&E International*. 2008. V. 41. No. 6. P. 467—476.
24. Li HF, Li GY, Zhou M. An adaptive BP-network approach to short term load forecasting // *IEEE. DRPT*. 2004. P. 505—8.
25. Zhang J., Lu SL., He W.X., Wang Y.S. Diagnosis of rolling bearing vibration of BP neural network method // *Light Ind Mach*. 2007. V. 25. P. 90—2.