### ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный Основан в феврале 1965 года Екатеринбург № 1 2021

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### Акустические методы

В.К. Качанов, И.В. Соколов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин, С.А. Федоренко, С.Г. Алехин, А.В. Козлов, Н.К. Пичугин. Построение дисперсионной зависимости корректирующего коэффициента при контроле компактных изделий квадратного сечения импакт-эхометодом	3
<b>Н.П. Алешин, Н.В. Крысько, Д.М. Козлов, А.Г. Кусый.</b> Эскпериментальное исследование дифракции упругих волн на модели трещины	1:
<b>А.А. Хлыбов, А.Л. Углов, Д.А. Рябов.</b> Об особенностях использования явления акустоупругости при контроле напряженного состояния анизотропного материала технических объектов при отрицательных температурах	23
<b>Н.А. Махутов, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов, В.И. Иванов, Е.В. Терентьев.</b> Кинетика процесса накопления повреждений и разрушения в зонах концентраторов при испытаниях образцов на разрыв	33
<b>Яо Фэй, Цао Иминь, Чен Гуанюй.</b> Пакетный вейвлет-анализ торкрет-каменных структур с использованием импакт-эхометода	4:
Капиллярные методы	
<b>В.Е. Поляков, А.А. Закутаев, А.А. Михайлов.</b> Способ и устройство для активного контроля сложного профиля глубины пропитки кремнийорганическими соединениями изделий из пористой керамики	51
<b>Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, И.И. Кудинов, А.Н. Головков, А.С. Генералов, А.В. Князев.</b> Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства.	64
Mydamyayya	7

УДК 620.179.163: 624.155.15

#### ПОСТРОЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ КОНТРОЛЕ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДОМ

© 2021 г. В.К. Качанов<sup>1,\*</sup>, И.В. Соколов<sup>1</sup>, А.А. Самокрутов<sup>1, 2</sup>, В.Г. Шевалдыкин<sup>2</sup>, С.А. Федоренко<sup>2</sup>, С.Г. Алехин<sup>2</sup>, А.В. Козлов<sup>2</sup>, Н.К. Пичугин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14 <sup>2</sup>OOO «АКС», Россия 142712 Московская область, промзона «Технопарк», ул. Восточная, вл. 12, стр. 1 \*E-mail: kachanovvk@mail.ru

> Поступила в редакцию 20.09.2020; после доработки 13.11.2020 Принята к публикации 24.11.2020

Приведены результаты вычисления коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β в компактных изделиях квадратного сечения при различных отношениях толщины к стороне сечения. С помощью моделирования в программной среде ANSYS показано, что по мере увеличения данного отношения происходит трансформация основного вида колебаний, обуславливающего собственный резонанс в компактном изделии: от продольных волн в компактных изделиях типа «свая» к волнам Лэмба в компактных изделиях типа «плита». При этом в компактных изделиях происходит нелинейное изменение коэффициента β, позволяющего скорректировать эффект геометрической дисперсии. Рассчитана дисперсионная зависимость коэффициента β в компактных объектах квадратного поперечного сечения от различного соотношения толщины и стороны сечения изделия.

*Ключевые слова*: импакт-эхометод, строительная конструкция из бетона, компактное изделие, коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука, дисперсионная зависимость.

**DOI:** 10.31857/S0130308221010012

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, при контроле строительных конструкций (СК) из бетона с помощью импакт-эхометода [1] возникает геометрическая дисперсия скорости звука [2], приводящая к появлению погрешности в значении измеряемой толщины изделия H (или в значении измеряемой скорости акустических колебаний C). Эта погрешность компенсируется с помощью коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука  $\beta$ , значение которого подставляется в основную расчетную формулу импакт-эхометода [1]:

$$H = \frac{\beta C_l}{2f_p},\tag{1}$$

где H — измеряемая толщина изделия;  $C_l$  — скорость распространения продольных акустических колебаний в бетоне, рассчитанная для бесконечного полупространства;  $f_{\rm p}$  — частота спектральной составляющей с максимальной амплитудой (основная резонансная частота).

Коэффициент коррекции  $\beta$  имеет неизменное значение для протяженных объектов контроля: для изделий типа «плита» (стена, перекрытие, фундамент здания), у которых толщина H много меньше иных габаритов a и b,  $\beta \approx 0.96$  (ASTM C1383—15), а также для изделий типа «свая» (колонна, опора ЛЭП, забивная свая), у которых измеряемая длина H много больше размеров сечения a и b,  $\beta \approx 0.95$  [1]. Именно поэтому за рубежом такие протяженные СК активно контролируются с помощью импакт-эхометода как на стадии строительства, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений [3—5].

Однако наряду с протяженными СК, у которых значение коэффициента коррекции  $\beta$  неизменно, имеется большое число так называемых компактных СК, у которых все размеры H, a и b сопоставимы (фундаментные блоки, опоры мостов, тестовые кубические изделия, по которым определяют прочность бетона при его застывании). В таких компактных объектах контроля (ОК) коэффициент коррекции имеет свое индивидуальное значение для каждого нового изделия (для каждого соотношения толщины H и иных габаритов a и b). Другая проблема, ограничивающая применение импакт-эхометода для контроля компактных СК, заключается в том, что в них не удается однозначно установить частоту искомого резонанса  $f_p$  на фоне близко расположенных других резонансных пиков. По этим причинам компактные ОК не контролируются с помощью импакт-эхометода. Так, на сегодняшний день есть совсем немного работ, где делается попытка контроля не протяженных изделий определенной формы [6—9]. При этом отсутствует достаточная исследовательская база, которая бы описывала особенности контроля импакт-эхометодом компактных объектов в целом.

В [10, 11] были впервые поставлены и частично решены проблемы контроля компактных бетонных изделий. В частности, в [11] был предложен многоканальный мультипликативный импакт-эхометод измерения толщины H компактных изделий, позволяющий однозначно определять частоту искомого резонанса  $f_p$ , основанный на измерении нескольких АЧХ изделия в нескольких положениях приемника на поверхности ОК и последующем перемножении результатов измерения. В [12] приведены результаты исследований последних лет по использованию импакт-эхометода для контроля наиболее часто применяемых в строительстве компактных изделий с квадратным сечением (стены, сваи, балки, тестовые бетонные изделия кубической формы). В частности, в [12] были разработаны теоретическая и экспериментальная методики расчета коэффициента  $\beta$  для компактных СК с квадратным сечением (со стороной квадрата  $\alpha = b = D$ ). В этих методиках использовали моделирование волновых процессов в программной среде ANSYS, а также предложенный нами мультипликативный метод моделирования в компактных ОК.

Результаты теоретического расчета были подтверждены экспериментальными измерениями. Так, для компактного изделия толщиной H с габаритным коэффициентом g = D/H = 1,25 был рассчитан коэффициент коррекции  $\beta \approx 0,77$ . Для этого же изделия было установлено, что основная резонансная частота  $f_{\rm p}$  обусловлена симметричной модой волны Лэмба, а само изделие относится к компактному ОК типа «плита».

При этом расчет коэффициента  $\beta$  для компактных ОК показал, что коэффициент коррекции имеет различные значения в компактных изделиях с разными габаритными коэффициентами g. Кроме того, на основе анализа дисперсионной зависимости скорости звука от габаритного коэффициента в [12] было показано, что резонансные пики на спектре компактных изделий, частоты которых определяются габаритами H, a и b, отражают различные типы колебаний, что требует определения типа колебания соответствующего основной резонансной частоте  $f_p$  для каждого конкретного компактного ОК. По этой причине интерес представляет построение дисперсионной зависимости  $\beta(g)$  для всего спектра компактных изделий квадратного сечения, такую дисперсионную зависимость следует найти для компактных ОК с различными значениями габаритного коэффициента g, имеющих один и тот же тип колебаний.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА В ОТ РАЗЛИЧНЫХ ГАБАРИТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Разработанная в [12] методика расчета коэффициента коррекции  $\beta$  в компактных изделиях была использована для построения зависимости  $\beta(g)$  для набора СК с квадратным сечением с одинаковой толщиной H=0,3 м и с различными габаритными коэффициентами g=D/H (табл. 1). В этих СК габаритный коэффициент g возрастал за счет увеличения стороны сечения D от g=1/3 (протяженная свая, у которой измеряемая длина H в три раза больше D) до компактного изделия с габаритным коэффициентом g=1 (куб), затем до компактного изделия типа «плита» (g=2) и, наконец, до протяженной плиты, у которой измеряемая толщина H в шесть раз меньше стороны квадрата D (g=6).

Йиже приведена процедура построения зависимости β(g) с помощью моделирования в программной среде ANSYS. При этом расчет β для каждого изделия был произведен исходя из того, что все ОК выполнены из бетона марки M300, которая широко используется в строительстве и у которой плотность ρ = 2400 кг/м³, модуль Юнга E = 34,56 ГПа и коэффициент Пуассона ν = 0,2. Зная данные характеристики, можно рассчитать значение скорости распространения продольной звуковой волны  $C_I$  в моделируемом бетоне по формуле для бесконечного полупространства [13]:

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}},$$
(2)

которое составит  $C_i = 4000$  м/с.

В [12] было показано, что при теоретическом методе определения коэффициента коррекции значение  $\beta$  находится как отношение резонансной частоты  $f_{\rm ans}$ , полученной с помощью гармонического анализа в программной среде ANSYS, к теоретическому значению резонансной частоты  $f_{\rm p}$  (при  $\beta=1$ ). Значение резонансной частоты  $f_{\rm p}$  рассчитывалось из формулы (1). Для объекта контроля из бетона марки M300 с толщиной H=0,3 м оно составляет  $f_{\rm p}\approx 6667~\Gamma$ ц.

Значение резонансной частоты  $f_{\rm ans}$  находили по спектру изделия, полученному с помощью гармонического анализа. Причем на спектре протяженных ОК эта частота всегда определялась одно-

Таблица 1

Исследуемые объекты для построения зависимости eta(g)

Размер стороны сечения $D$ , мм	Габаритный коэффициент g
100	1/3
150	0,5
200	0,67
250	0,83
300	1
350	1,17
375	1,25
400	1,33
450	1,5
600	2
750	2,5
900	3
1200	4
1800	6

значно, а на спектре ряда компактных ОК для вычисления частоты  $f_{\rm ans}$  использовали мультипликативную многоканальную методику моделирования, при которой виртуальное измерение компактного изделия проводили в нескольких положениях виртуального приемника на поверхности ОК, а затем результаты парциальных измерений перемножали. Далее устанавливали значение коэффициента коррекции  $\beta = f_{\rm ans} / f_{\rm p}$  для каждого конкретного ОК с конкретным значением габаритного коэффициента g и осуществляли построение зависимости  $\beta(g)$ .

Здесь следует отметить, что впервые построение дисперсионной зависимости  $\beta(g)$  для компактных ОК было проведено в работе [11]. Однако при этом не учитывалось, что в компактных изделиях наблюдается смена типов резонансного колебания. Также не учитывалось, что следует определять момент смены типа колебаний, а зависимость  $\beta(g)$  следует строить отдельно для каждого набора значений габаритного коэффициента g, у которого превалирует (то есть определяет резонанс измеряемого габарита) тот или иной тип колебаний. Поэтому приведенные значения коэффициента коррекции  $\beta$  для компактных изделий типа «плита», а также построенные в [11] дисперсионные зависимости для коэффициента коррекции  $\beta$  не точны.

Превалирующий тип колебаний в каждом конкретном компактном изделии можно установить с помощью модального представления результатов моделирования. Основным критерием при этом служит следующий признак: у изделий типа «свая» резонанс измеряемого габарита (длины) обусловлен стержневой волной, являющейся частным случаем продольной волны (рис. 1a) [1], а у изделий типа «плита» резонанс толщины обусловлен волной Лэмба (рис.  $1\delta$ ) (ASTM C1383—15).

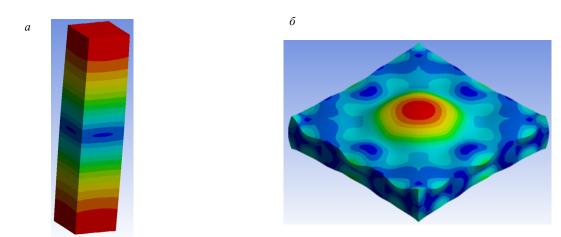


Рис. 1. Визуализация резонанса измеряемого габарита в программе ANSYS: a — свая;  $\delta$  — плита.

По этой причине в предлагаемой ниже методике построения дисперсионной зависимости  $\beta(g)$  для компактных изделий сперва, если это необходимо, с помощью мультипликативного метода моделирования находится частота  $f_{\rm ans}$ , а затем с помощью модального представления результатов моделирования определяется превалирующий тип колебаний. Зависимость  $\beta(g)$  строится для каждого набора компактных ОК, у которого превалирует тот или иной тип колебаний.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА В ОТ ГАБАРИТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА В КОМПАКТНОЙ ОБЛАСТИ СВАИ

Построение зависимости  $\beta(g)$  начнем с протяженной сваи с габаритным коэффициентом g=1/3. На AЧX сваи (рис. 2a), полученной с помощью гармонического анализа, виден ярко выраженный максимум, который соответствует резонансной частоте  $f_{\rm ans}\approx 6300$  Гц. Модальное представление колебательного процесса сваи для этой резонансной частоты подтверждает наличие в ней продольного колебания. Значение корректирующего коэффициента для исследуемого изделия  $\beta = f_{\rm ans}/f_{\rm p} = 6300/6667 \approx 0,945$ , что близко к значению коэффициента  $\beta$  для протяженного ОК типа «свая» [1].

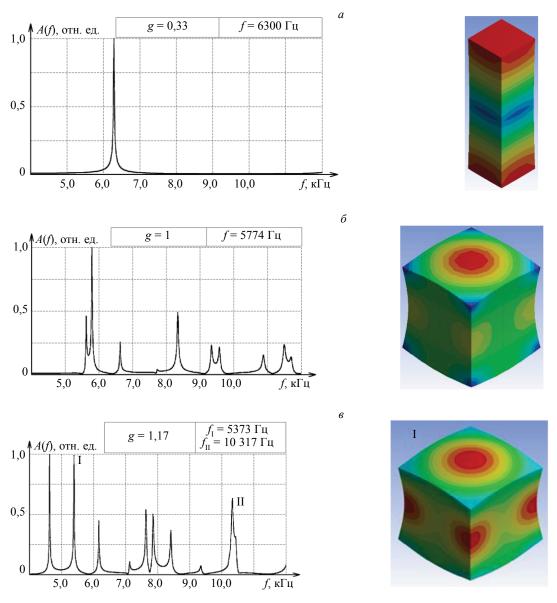


Рис. 2. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объектов контроля с квадратным сечением с габаритными коэффициентами g, равными: 1/3 (a), 1 ( $\delta$ ) и 1,17 ( $\epsilon$ ).

Далее, увеличивая габаритный коэффициент g, мы переходим к компактным сваям. Для ОК g=0.5 частота резонанса немного снизилась и равна  $f_{\rm ans}\approx 6262~\Gamma$ ц, а корректирующий коэффициент составляет  $\beta\approx 0.939$ .

Для ОК с габаритным коэффициентом g=1 (для куба) частота резонанса еще больше понизилась  $f_{\rm ans} \approx 5774~\Gamma$ ц;  $\beta \approx 0.866$  (см. рис.  $2\delta$ ).

Таким образом, по мере увеличения габаритного коэффициента g, происходит уменьшение частоты резонанса  $f_{\rm ans}$ , причем для ОК со значениями g между 1/3 и 0,5 частотный резонанс  $f_{\rm ans}$  уменьшается незначительно по сравнению со следующим объектом моделирования — кубом (g=1), у которого резонансная частота  $f_{\rm ans} \approx 5774$  Гц заметно сместилась в низкочастотную область (см. рис. 26). АЧХ куба стала более «изрезанной», но модальное представление колебаний показывает, что в кубе превалирует тот же вид продольных колебаний, что и у сваи с габаритным коэффициентом g=1/3. Однако за счет того, что длина сваи становится сопоставимой с поперечным сечением сваи, интенсивность продольного колебания снижается (красный круг на поверхности модального представления для куба занимает лишь часть поверхности).

На АЧХ компактного ОК с габаритным коэффициентом g=1,17 резонансная частота определяется неоднозначно, так как присутствуют два сопоставимых по величине амплитуды пика на частотах приблизительно 5373 и 4600 Гц. Поэтому для однозначного определения основной резонансной частоты был использован мультипликативный метод моделирования, который определил истинную частоту  $f_{\rm ans} \approx 5373$  Гц. Именно для этой частоты продольных колебаний был рассчитан коэффициент коррекции  $\beta \approx 0,806$  (рис. 2e).

Мультипликативный метод моделирования использовался также для определения основной резонансной частоты компактного ОК с габаритным коэффициентом g=1,25 (рис. 3). В этом изделии также сложно однозначно определить искомую резонансную частоту (рис. 3a), так как на АЧХ присутствуют как минимум четыре резонансных пика с сопоставимыми амплитудами. Однако после мультипликативной обработки (при которой были получены спектры ОК при расположении виртуального приемника в трех точках на поверхности ОК с последующим перемножением результатов парциальных измерений) оказалось (рис. 36), что основным резонансным пиком с максимальной амплитудой пока еще является пик на частоте  $f_{\rm ans}\approx 5141$  Гц. При этом другие пики большой амплитуды, например на частоте  $f_{\rm ans}\approx 7400$  Гц, соответствуют асимметричным модам волны Лэмба и не могут определять резонанс толщины [14]. Модальное представление результа-

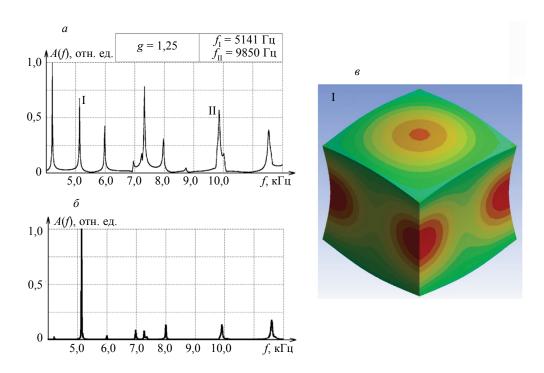


Рис. 3. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объекта контроля с квадратным сечением с габаритным коэффициентом g = 1,25:

a — АЧХ, снятая в одной точке;  $\delta$  — АЧХ, полученная с помощью мультипликативной обработки;  $\epsilon$  — модальное представление контролируемого объекта.

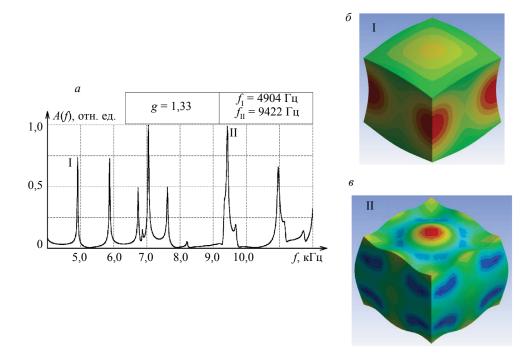


Рис. 4. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объекта контроля с квадратным сечением с габаритным коэффициентом g = 1,33:

a — АХЧ контролируемого объекта;  $\delta$  — модальное представление на частоте  $f_{\rm ans} \approx 4904~\Gamma$ ц; e — модальное представление на частоте  $f_{\rm ans} \approx 9422~\Gamma$ ц.

тов моделирования для резонансной частоты  $f_{\rm ans}\approx 5141~\Gamma$ ц показывает (рис.  $3\it b$ ), что в ОК с габаритным коэффициентом  $\it g=1,25$  еще преобладает продольная волна, хотя и очевидна предстоящая смена моды колебаний. Это подтверждает тот факт, что на AЧХ (см. рис.  $\it 3a$ ) появляется сопоставимый по амплитуде пик на более высокой частоте ( $\it f_{ans}\approx 9850~\Gamma$ ц). На рис. 4 показаны результаты моделирования волновых процессов в компактном ОК с габа-

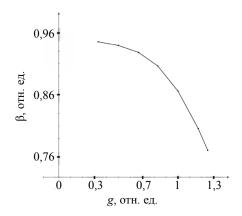
На рис. 4 показаны результаты моделирования волновых процессов в компактном ОК с габаритным коэффициентом g=1,33. На спектре изделия (рис. 4a) видно, что появляется пик II с частотой  $f_{\rm ans}\approx 9422$   $\Gamma$ ц, амплитуда которого превалирует над амплитудой пика I с частотой  $f_{\rm ans}\approx 4904$   $\Gamma$ ц. Пики большой амплитуды на других частотах не определяют резонанс толщины, так как соответствуют асимметричным модам волны Лэмба [14].

Соотношение амплитуд для двух резонансных частот показывает, что с увеличением габаритного коэффициента происходит смена типа колебаний. Модальное представление колебаний на частоте  $f_{\rm ans} \approx 4904~\Gamma$ ц (рис. 46) показывает, что пик I соответствует продольной волне. Модальное представление колебательного процесса для пика II на частоте  $f_{\rm ans} \approx 9422~\Gamma$ ц (рис. 46) соответствует типу колебаний, представленному на рис. 16, то есть волне Лэмба. Все это позволяет утверждать, что в данном изделии с g=1,33 превалирующим резонансным колебанием становится волна Лэмба.

Физически процесс смены типа резонансного колебания толщины можно объяснить следующим образом. Видно, что с увеличением габаритного коэффициента колебания I становятся менее интенсивными по толщине: красная область в центре уменьшается. При этом возрастает их поперечная составляющая: красная область боковых граней увеличивается. Очевидно, что все это приводит к уменьшению амплитуды продольной волны I, так как ее энергия определяется именно интенсивностью колебаний по толщине. Одновременно с этим возрастает влияние поперечного эффекта, который увеличивает амплитуду колебания II. Колебание II по своей природе является комбинацией продольной и поперечной волн, где в данном случае преобладает поперечная составляющая.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что по мере возрастания габаритного коэффициента происходит трансформация типа изделия: протяженное изделие типа «свая» переходит в компактное изделие типа «свая», а затем — в компактное изделие типа «плита».

Полученные с помощью программы ANSYS результаты измерения основной частоты резонанса  $f_{\rm ans}$  позволили рассчитать значения корректирующих коэффициентов  $\beta$  для рассмотренных компактных изделий типа «свая» при изменении габаритного коэффициента от 1/3 до 1 и дали возмож-



β	g
0,954	1/3
0,939	0,5
0,928	0,67
0,906	0,83
0,866	1
0,806	1,17
0,771	1,25

Рис. 5. Зависимость коэффициента коррекции  $\beta$  от габаритного коэффициента g для компактной области сваи.

ность построить зависимость  $\beta(g)$  для компактной области сваи, в которой превалируют продольные колебания (рис. 5). Из графика видно, что увеличение габаритного коэффициента g приводит к уменьшению корректирующего коэффициента  $\beta$ . Момент перехода компактного изделия из компактной области сваи в компактную область плиты на зависимости  $\beta(g)$  будет располагаться на интервале коэффициентов  $g \approx 1,25$ —1,27.

С учетом того, что коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука  $\beta$  определен как соотношение скорости звука в ограниченном изделии к скорости звука в ОК с неограниченными размерами ( $\beta = C_{\rm orp}/C_l$ ), можно сделать вывод, что при переходе от протяженного ОК типа «свая» к компактному ОК типа «плита» геометрическая дисперсия скорости звука снижает скорость продольной волны, которая приводит к уменьшению  $\beta(g)$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА В ОТ ГАБАРИТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА В КОМПАКТНОЙ ОБЛАСТИ ПЛИТЫ

Выше было показано, что однозначное определение превалирующего колебания определяется в компактных изделиях с квадратным сечением с габаритным коэффициентом  $g \approx 1/3$ —1. Далее, в изделиях с габаритным коэффициентом  $g \approx 1,17$ —1,25 наблюдается тенденция к смене превалирующего колебания. В ОК с габаритным коэффициентом g = 1,33 основной резонанс определяется волной Лэмба и составляет  $f_{\rm ans} \approx 9422$  Гц, что превышает теоретическое значение  $f_{\rm p} \approx 6667$  Гц. В этом случае коэффициент коррекции  $\beta$  становится больше 1, что позволяет утверждать о смене типа колебаний и переходе объекта из компактной области сваи в компактную область плиты.

На рис. 6 приведены результаты спектрального и модального представлений нескольких объектов моделирования из компактной области плиты, откуда видно, что с дальнейшим увеличением габаритного коэффициента g коэффициент  $\beta$  уменьшается: его значение стремится к 0,96. При этом частота искомого резонанса  $f_{\rm ans}$  смещается в низкочастотную область, а компактное изделие типа «плита» постепенно (начиная с  $g\approx 5$ ) превращается в протяженную плиту. В конечном итоге у объекта g=6 искомый резонанс составляет  $f_{\rm ans}\approx 6416$  Гц, что соответствует коэффициенту  $\beta\approx 0,962$ . Возникающие пики большой амплитуды на АЧХ объектов соответствуют асимметричным модам волны Лэмба, которые, как было отмечено в [14], не могут быть резонансными.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициентов  $\beta(g)$  в компактной области плиты. Вертикальная симптотическая линия, находящаяся вблизи габаритных коэффициентов  $g \approx 1,25$ —1,27, обозначает область перехода превалирующей продольной волны в компактном ОК квадратного сечения в волну Лэмба.

#### ДИСПЕРСИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА В ОТ ГАБАРИТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КВАДРАТНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Обобщенный график  $\beta(g)$  для рассматриваемых ОК квадратного сечения представлен на рис. 8. На нем римскими цифрами обозначены участки I и IV, представляющие соответственно протяжен-

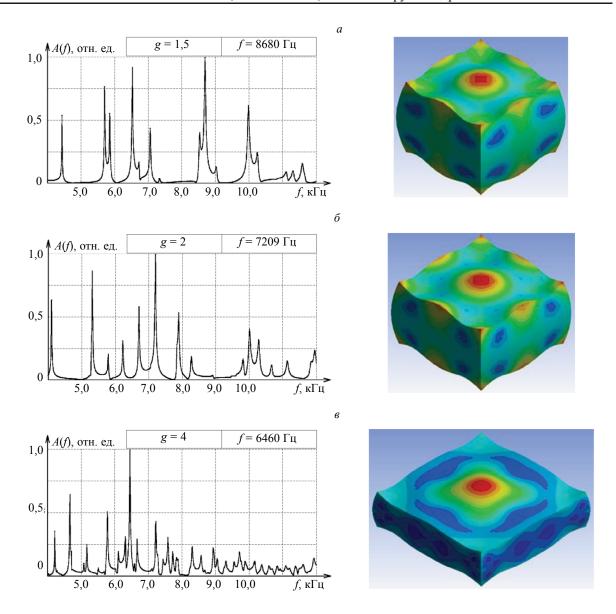


Рис. 6. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объектов контроля с квадратным сечением с габаритными коэффициентами g, равными: 1,5 (a); 2 ( $\delta$ ); 4 (e).

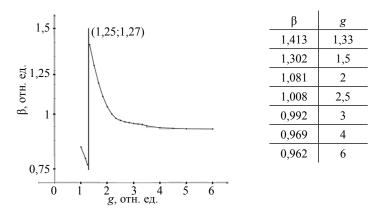


Рис. 7. Зависимость коэффициента коррекции  $\beta$  от габаритного коэффициента g для компактной области плиты.

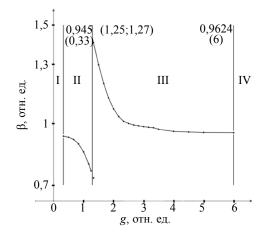


Рис. 8. Дисперсионная зависимость коэффициента коррекции β от габаритного коэффициента g.

ные области сваи и плиты, и участки II и III — компактные области сваи и плиты соответственно. Габаритный резонанс на участке II определяется продольной волной, а на участке III — симметричной модой волны Лэмба. Участки II и III разделены линией, обозначающей границу перехода мод.

Полученный в процессе моделирования график  $\beta(g)$  хорошо согласуется с графиком геометрической дисперсии звука в стержне, построенным Рэлеем [15], с той лишь разницей, что результат моделирования для компактных ОК представлен в виде зависимости коэффициента коррекции  $\beta$  от габаритного коэффициента g. Выше было показано, что величина  $\beta$  представляет отношение скорости звука в компактном изделии к постоянному для данной марки бетона значению скорости в бесконечном полупространстве. Тем самым, изменение коэффициента коррекции  $\beta$  соответствует изменению скорости звука в компактном изделии. Увеличение параметра g можно трактовать как уменьшение измеряемой толщины  $\beta$  при постоянном значении размера  $\beta$ . Это, в свою очередь, соответствует уменьшению длины резонансной волны  $\beta$  или увеличению собственной резонансной частоты  $\beta$ . Таким образом, можно утверждать, что зависимость  $\beta$  тождествена полученной Рэлеем дисперсионной зависимости  $\beta$ . Данный факт позволяет говорить о дисперсионной зависимости коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука  $\beta$  от частоты собственных колебаний в компактных изделиях.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные аналитически значения коэффициента коррекции для различных компактных объектов контроля квадратного сечения позволяют достаточно просто осуществлять контроль таких изделий. Для проверки правильности данного расчета были проведены многочисленные эксперименты по определению скорости звука на реальных бетонных образцах с различными габаритными коэффициентами. Ниже приведены примеры контроля с помощью импакт-эхометода изделий толщиной H = 300 мм со следующими значениями габаритного коэффициента g: 0,5; 1; 1,5 и 2.

Скорость с помощью ультразвукового теневого метода измерялась на частоте 100 кГц в соответствии с ГОСТ 17624—2012. Измерение скорости звука импакт-эхометодом осуществлялось с помощью прибора Freedom Data PC производства фирмы «Olson Instruments» (URL: https://olsoninstruments.com). Данный прибор состоит из блока обработки информации и преобразователя (рис. 9a). Схема измерения для импакт-эхометода была выбрана в соответствии с ASTM C1383—15 с учетом того факта, что контролю подвергаются компактные изделия (рис. 9a). Согласно выбранной схеме, измерения проводились в центральной области образца, которая была ограничена по краям расстоянием 0,25H. При этом расстояние между наносимым упругим ударом (импактом) и преобразователем не должно было превышать 0,4H. В результате измерения значение скорости звука в каждом из исследуемых компактных изделий определялось с помощью полученного экспериментально значения резонансной частоты  $f_p$  и рассчитанного выше соответствующего коэффициента  $\beta$ .

На рис. 10 приведены АЧХ реальных экспериментальных образцов, полученные в ходе измерения импакт-эхометодом. По их результатам хорошо заметно смещение резонансной частоты, которое полностью повторяет тенденцию построенного по данным моделирования графика  $\beta(g)$ .

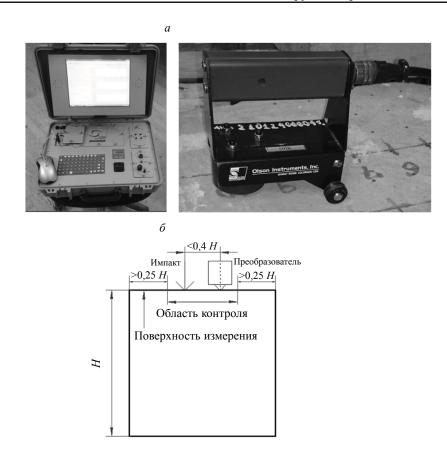


Рис. 9. Аппаратура (а) и схема измерения (б) импакт-эхометода.

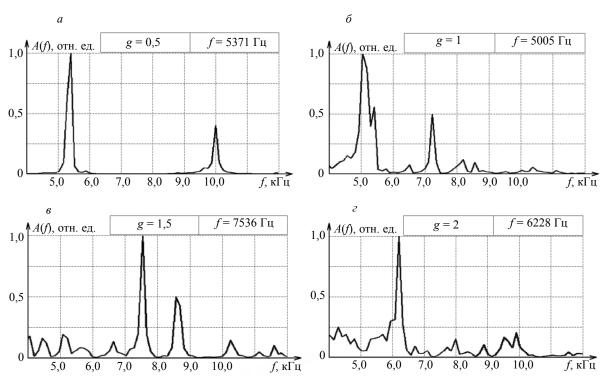


Рис. 10. АЧХ реальных экспериментальных образцов: a - g = 0.5;  $\delta - g = 1$ ;  $\epsilon - g = 1.5$ ;  $\epsilon - g = 2.5$ 

Таблица 2

Так, у объекта g=1 резонанс толщины немного ниже, чем у g=0.5. При этом оба эти объекта входят в компактную область сваи. У объекта g=1.5 резонанс резко увеличивается, что соответствует «замещению» типа резонансного колебания и переходу в компактную область плиты, а у g=2 снова снижается, что также зафиксировано на построенном графике. Очевидно, что все это может свидетельствовать о правильности проведенного моделирования и верной тенденции построенной зависимости  $\beta(g)$ , изображенной на рис. 8. Здесь стоит отметить, что оборудование фирмы «Olson Instruments» (URL: https://olsoninstruments.com), с помощью которого и был реализован импакт-эхометод, включает в себя нелинейную обработку, что, безусловно, сказывается на форме получаемых спектров. Именно этим объясняется хорошее выделение резонансного пика в компактных объектах по сравнению с результатами моделирования. При этом о самой обработке никакой информации не дается.

Результаты измерения скорости  $C_I$  теневым и импакт-эхометодами

Габаритный коэффициент g	Скорость $C_p$ измеренная теневым методом, м/с	Скорость $C_p$ измеренная импакт-эхометодом, м/с
0,5	3389	3432
1	3426	3468
1,5	3507	3473
2	3472	3457

Сравнение измерений скорости  $C_l$  в экспериментальных образцах теневым и импакт-эхометодами приведено в табл. 2. Скорость в импакт-эхометоде рассчитывалась по формуле  $C_l = \frac{2fH}{8}$ .

Видно, что значения  $C_l$  различаются не более чем на 2 %. Данный факт также подтверждает правильность полученной в ходе моделирования зависимости  $\beta(g)$ . При этом без учета рассчитанного корректирующего коэффициента  $\beta$  погрешность измерения скорости резко возрастает. Так, для изделия с габаритным коэффициентом g=1,5 она может превышать 20 %.

#### выводы

Разработаны методы определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука  $\beta$  в компактных СК из бетона с квадратным сечением. Показано, что коэффициент коррекции  $\beta$  в компактных изделиях из бетона меняется при изменении габаритного коэффициента g. При этом график  $\beta(g)$  имеет вид дисперсионной зависимости, подобной установленной Рэлеем зависимости C(f) для стержня.

Рассчитанные с помощью моделирования значения коэффициента коррекции β позволили повысить точность измерения толщины компактных ОК, что подтверждают сравнительные эксперименты, проведенные с помощью импакт-эхометода и ультразвукового теневого метода. Тем самым, разработанные методики определения коэффициента β позволяют проводить высокоточный контроль компактных СК из бетона с квадратным сечением с помощью импакт-эхометода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Sansalone M., Streett W.B. Impact-echo: nondestructive testing of concrete and masonry. Bullbrier Press, Jersey Shore, PA. 1997. 339 p.
  - 2. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
- 3. *Hsieh C.T., Lin Y.* Detecting debonding flaws at the epoxy-concrete interfaces in near-surface mounted CFRP strengthening beams using the impact-echo method // NDT & E International. 2016. V. 83. P. 1—13.
- 4. *Juncai X.*, *Xiong Y.* Detection of concrete structural defects using impact echo based on deep networks // Journal of Testing and Evaluation. 2020. V. 49. P. 1—12.
- 5. Jacob L.L., Joseph McElderry, Jared S.B., Spencer W.G., Mazzeo B.A. Automated sounding for concrete bridge deck inspection through a multi-channel, continuously moving platform // NDT & E International. 2020. V. 109. P. 102—177.

- 6. Al Imam Mohammad Ibn Saud. Effectiveness of impact-echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. 2013. V. 47. P. 753—759.
- 7. Geetha, Praveen Kumar: Thickness estimation and crack detection in concrete using impact-echo technique // International Research Journal of Engineering and Technology. 2018. V. 5. P. 2345—2348.
- 8. Montiel-Zafra V., Canadas-Quesada F., Campos-Sunol M.J., Vera-Candeas P., Ruiz-Reyes N. Monitoring the internal quality of ornamental stone using impact-echo testing // Applied Acoustics. 2019. V. 155. P. 180—189.
- 9. Musab Alhawat, Amir Khan. Evaluation of steel corrosion in concrete structures using impact-echo method // Advanced Materials Research. 2020. V. 1158. P. 147—164.
- 10. Качанов В.К., Соколов И.В., Авраменко С.Л. Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2008. № 12. С. 12—22.
- 11. *Качанов В.К.*, *Соколов И.В.*, *Авраменко С.Л.*, *Тимофееев Д.В.* Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2008. № 12. С. 23—36.
- 12. *Качанов В.К., Соколов И.В., Федоренко С.А.* Методика определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука для компактных изделий из бетона // Дефектоскопия. 2020. № 4. С. 3—13.
- 13. Ермолов И.Н., Алёшин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.2. Акустические методы контроля. Практ. пособие / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
- 14. *Carino N.J.* Impact-echo: the fundamentals // International Symposium on NDT in Civil Engineering. 2015. P. 1—18
  - 15. Рэлей. Теория звука. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1955. 503 с.

#### ЭСКПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ УПРУГИХ ВОЛН НА МОДЕЛИ ТРЕЩИНЫ

© 2021 г. Н.П. Алешин<sup>1,\*</sup>, Н.В. Крысько<sup>1,\*\*</sup>, Д.М. Козлов<sup>1,\*\*\*</sup>, А.Г. Кусый<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1 E-mail: \*aleshin@bmstu.ru; \*\*\*kryskonv@bmstu.ru; \*\*\*denvwb5@mail.ru, \*\*\*\*andrei.k.166@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2020; после доработки 13.11.2020; Принята к публикации 20.11.2020

Для имитации трещин в стыковых сварных швах использованы пазы с малым раскрытием. Проведено исследование влияния ориентации ребер пазов на их выявляемость при использовании эхо- и дифракционных методов ультразвукового контроля. Показано, что процессы, происходящие при рассеянии упругих волн на трещинах, необходимо моделировать трехмерной задачей. Однако теоретические аналитические и численные исследования в данной области чаще всего касаются двумерных задач дифракции упругих волн, когда исследуемое ребро мишени расположено на акустической оси источника и/или приемника ультразвука и ориентировано перпендикулярно падающему лучу. В статье приведены экспериментальные результаты, иллюстрирующие влияние ориентации острия (ребра) мишени в трехмерных задачах на принимаемые сигналы как при использовании дифракционных схем типа ТОFD, так и в классическом ультразвуковом контроле эхометодом по схеме «тандем» и с разворотом преобразователей по схеме «дуэт».

*Ключевые слова*: ультразвуковой контроль, дифракция, контроль качества, дифракционно-временной метод, TOFD.

DOI: 10.31857/S0130308221010024

#### **ВВЕДЕНИЕ**

При выборе схем и параметров контроля, как правило, рассматривается соосное расположение мишени (дефекта) и источника/приемника ультразвука. В эхометоде при этом ориентируются на регистрацию максимума амплитуды зеркально-отраженного сигнала, а в дифракционных методах — на максимум амплитуды дифрагированных сигналов или времена их приема и соотношение между ними. Однако очевидно, что дефект в сварном шве может быть ориентирован не строго вдоль или поперек оси шва. Поэтому следует иметь в виду, что ориентация дефекта заранее не известна, и он может отклоняться от «идеального» направления, заданного при расчете параметров контроля. При анализе акустических трактов важно учитывать влияние возможных отклонений мишени от заданной «идеальной» ориентации. Также следует иметь в виду, что ограниченная длительность импульсов современных дефектоскопов позволяет повысить разрешающую способность ультразвукового контроля. Однако при использовании коротких импульсов различные области одного и того же дефекта, например, его центральная часть и ребра, могут создавать несколько сигналов, разрешающихся во времени. В результате один дефект может быть зафиксирован как скопление или цепочка дефектов, либо может быть допущена ошибка при измерении размеров дефектов. В связи с изложенным, вопрос о влиянии ориентации плоскостного дефекта на параметры принимаемых сигналов не менее важен, чем вопрос о влиянии на принимаемые сигналы формы и размера дефекта.

В известных теоретических и экспериментальных работах по изучению рассеяния продольных и поперечных волн различной поляризации на моделях дефектов, имитирующих трещины, чаще всего рассматриваются случаи соосного расположения преобразователей и мишени. С учетом возможных отклонений последней от расчетного положения представляет интерес более подробно исследовать случаи наклонного падения ультразвука на ребра плоскостных дефектов, когда угол между направлением падающего луча и ребром не равен 90°. При этом возникают трехмерные задачи дифракции упругих волн, теоретическое исследование которых выполнить часто значительно сложнее, чем для двухмерных задач. В настоящей статье рассмотрены некоторые экспериментальные результаты, полученные при исследовании трехмерных задач рассеяния продольных и поперечных волн на ребрах плоскостных моделей дефектов при наклонном падении волн.

#### ВЫЯВЛЕНИЕ ОСТРИЯ ПЛОСКОСТНОГО ДЕФЕКТА

В качестве примера рассмотрим выявление острия узкого паза при изменении его ориентации относительно источника И, а также приемника П ультразвуковых волн. Схема выполнения эксперимента представлена на рис. 1.

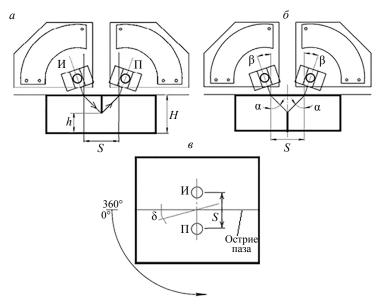


Рис. 1. Схема измерения амплитуд сигналов, рассеянных острием паза: рассеяние на нижнем (a) и верхнем (b) острие; схема вращения образца с пазом (b).

В данном случае в качестве модели плоскостного отражателя использован паз раскрытием 2a=0,12—0,14 мм. Образец — сталь со скоростью поперечной и продольной волн, соответственно  $c_L=3,26\cdot 10^3$  м/с и  $c_T=5,85\cdot 10^3$  м/с. Торец паза имел форму полуцилиндра диаметром D, равным 0,12—0,14 мм (рис. 2).

При измерениях на частоте 5 МГц это соответствует волновому размеру острия для поперечной волны  $k_T a \cong 0,7$  и для продольной волны  $k_L a \cong 0,4$ . Здесь  $k_T$  и  $k_L$  — волновые числа этих волн соответственно. Приведем также параметры образца: толщина H = 31,8 мм, глубина острия паза h = 15 мм. Таким образом при выявлении нижнего острия паза оно находилось на расстоянии 15 мм от контактной поверхности образца (см. рис. 1a), а при выявлении верхнего острия — на расстоянии 16.8 мм от контактной поверхности (рис. 16). При указанных условиях верхнее и нижнее острие паза можно рассматривать как имитаторы острия вертикально ориентированных плоскостных дефектов, расположенных на различных глубинах. Также отметим, что в качестве источника и приемника ультразвука использовались пьезопластины диаметром 3 мм, так что на частоте 5 МГц острие паза находилось в дальней зоне как для поперечной, так и для продольной волн, причем можно считать, что на озвучиваемый участок острия падала плоская волна. Акустический контакт осуществлялся в иммерсионном варианте через слой воды, так что вращение источника И с приемником П позволяло устанавливать такие углы падения β звука на поверхность образца, чтобы в него вводилась продольная или поперечная волна под необходимым углом а. При измерениях амплитуды сигналов, рассеянных острием, пара преобразователей И — П фиксировалась, а образец вращался вокруг вертикальной оси. Угол δ изменялся в диапазоне от 0 до 360° (см. рис. 1в). При этом значение  $\delta = 0$  и 180° соответствует случаю, когда источник и приемник ориентированы как на рис. 1, так что плоскость, образованная падающим и рассеянным лучами, перпендикулярна острию паза. Соответственно, при  $\delta = 90$  и  $270^{\circ}$  паз озвучивается вдоль его поверхности. При такой схеме проведения измерений поворот образца на 360° можно рассматривать как состоящий из 4 участков: 0—90°, 180—90°, 90—270°, 360—270°, в каждом из которых условия рассеяния ультразвука на ребре аналогичны. При этом можно выполнять усреднение результатов по таким 4-м участкам и рассматривать рассеяние ультразвука в диапазоне углов поворота образца от 0° (падение луча перпендикулярно ребру) до -90 (падение луча на ребро вдоль поверхности паза).

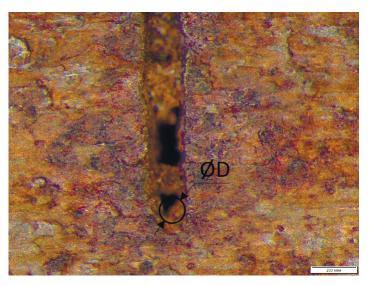


Рис. 2. Макрошлиф торца паза.

Известны результаты некоторых расчетов и экспериментов, выполнявшихся ранее по аналогичной схеме. Например, в работе [1] рассмотрено рассеяния на нижнем ребре паза и указано, что при углах ввода продольной волны 10, 30 и 60° амплитуда сигнала, дифрагированного на этом ребре, изменяется в пределах 1 дБ при изменении угла разворота  $\delta$  в пределах от 0 до 30°, а затем падает до нуля при  $\delta$  = 90°. Относительно верхнего ребра лишь указано, что при  $\delta$  = 90° рассеянный на нем сигнал остается конечным (слабым) по амплитуде. Однако соответствующие экспериментальные данные и значения амплитуд не приведены.

Приведенные результаты качественно соответствуют расчетам для продольной волны, выполненных с использованием геометрической теории дифракции ультразвука в упругой среде согласно [2]. Однако в некоторых точках результаты экспериментов и расчетов отличаются друг от друга до 1,5 раз. Также следует отметить, что в данной работе эксперимент проводился на пазе раскрытием 0,4 мм глубиной 48,5 мм, но частота и волновой размер раскрытия не указаны, т.е. не выполнена оценка того, насколько торец использованного паза можно рассматривать как острие трещины. Поэтому, основываясь только на приведенных данных, трудно оценить возможность их использования при выявлении трещин в изделиях меньших толщин, характерных, например, для контроля сварных швов трубопроводов.

Отметим, что результаты рассмотренной работы приведены только для продольной волны, и настоящее время они применяются в технологии TOFD [3]. Однако, учитывая указанные особенности описанных экспериментальных результатов, представляется целесообразным проверить их на образцах с пазами меньшего раскрытия. Поэтому, описанный выше экспериментальный образец выбран с раскрытием 0,12—0,14 мм — минимальным, которое удалось выполнить с обеспечением цилиндрической поверхности его торца.

Описанный образец ранее использовался в работе [4] для анализа рассеяния продольной волны на нижнем острие паза для случая  $\delta=0^\circ$ , т.е. когда плоскость падения продольной волны перпендикулярна торцу паза. Измерения проведены на частоте 5 МГц. Показано, что если радиус паза меньше длины волны, то с уменьшением этого радиуса амплитуда дифрагированного сигнала, огибающего полуцилиндрический торец, убывает по логарифмическому закону, а при значениях радиуса паза, превышающих длину волны, амплитуда дифрагированного сигнала убывает с ростом радиуса линейно. Такое изменение амплитуды можно рассматривать как косвенное подтверждение того, что торец паза с размерами  $k_L a \cong 0,4, k_T a \cong 0,7$  действительно можно рассматривать как имитатор острия трещины.

Отметим теперь, что приведенные примеры публикаций относятся к рассеянию на острие плоскостного дефекта продольной волны. Однако в эхометоде ультразвукового контроля гораздо чаще применяются поперечные волны. В работе [5] представлены расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды дифрагированного сигнала от угла наклона трещины для поперечных и продольных волн, но влияние угла поворота  $\delta$  на амплитуду дифрагированного сигнала для поперечной волны изучено не было. Рассмотрим этот случай подробнее.

Как известно, в отличие от рассеяния продольной волны, для поперечной необходимо учитывать ее поляризацию. На рис. 1 плоскость поляризации поперечной волны, вводимой в образец (и принимаемой из образца), совпадает с плоскостью схем в верхней части рисунка. При  $\delta=0^\circ$  такая поперечная волна вертикально (SV) поляризована относительно боковой поверхности паза. Поэтому целесообразно рассмотреть такие углы ввода поперечной волны в металл, когда угол падения на боковую поверхность паза меньше, равен и больше третьего критического  $\alpha_{\rm kp3}$ . В первом случае вдоль поверхности паза возбуждается продольная волна по типу боковой, а в третьем — только поперечная и, возможно, релеевская [6—8]. В нашем образце  $\alpha_{\rm kp3} \cong 33^\circ$ . Поэтому, далее рассмотрим ввод поперечной волны в образец под углами 65, 57 и 45°, так что падение такой поперечной волны на вертикальную грань паза при  $\delta=0^\circ$  происходит под углами 25, 33 и 45°. Выбор именно этих углов будет дополнительно обоснован ниже. Для удобства сравнения результатов эти же углы были выбраны и для ввода продольной волны.

Перейдем теперь к описанию полученных результатов. Вначале в качестве примера рассмотрим рассеяние продольной волны: в этом случае — сигналы, дифрагированные на нижнем ребре (см. рис. 1a) и на верхнем ребре (см. рис. 1b).

Отметим, что в условиях данного эксперимента при выполнении сканирования практически невозможно точно установить взаимную ориентацию источника и приемника так, чтобы их диаграммы направленности пересекались строго над ребром паза. Также диаграммы направленности Источника и Приемника могут несколько отличаться. Поэтому при вращении образца возможны небольшие, в пределах одного-полутора миллиметров, смещения оси вращения образца относительно оси системы И—П. При этом необходимо отметить, что такие смещения на 1—1,5 мм — естественные смещения оси сварного шва или плоскостных дефектов в объеме сварного шва при контроле реальных сварных соединений, т.е. с аналогичными случайными изменениями амплитуд принимаемых сигналов оператор постоянно встречается при практическом контроле. Поэтому вопрос об усреднении результатов измерений отмечен выше. Однако, даже с учетом усреднения по четырем аналогичным участкам при вращении образца на 360°, погрешность каждого конкретного измерения амплитуды следует ожидать в пределах до 2 дБ относительно некоторого идеально соосного расположения элементов экспериментальной установки. Это проявляется в том, что полученные в эксперименте точки не ложатся строго на гладкую кривую.

Результаты измерений при углах ввода продольной волны  $\alpha = 45$ , 57 и 65°, с учетом усреднения по 20 точкам для каждого угла ввода, показан на рис. 3.

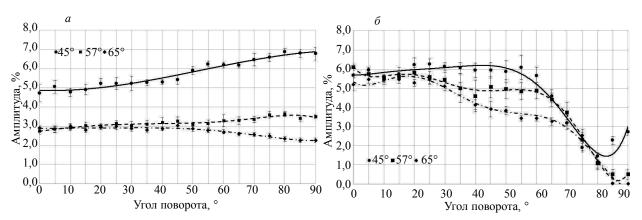


Рис. 3. Рассеяние продольной волны на верхнем (a) и нижнем (b) ребрах паза.

Эти результаты в целом аналогичны приведенным в [1], но дополняют их. С одной стороны, рис. 3 детализирует ранее опубликованные результаты для углов, которые в той работе не рассмотрены. С другой стороны, диапазон углов  $\delta$ , при которых не наблюдается скольконибудь заметное (за пределами погрешности) изменение амплитуд принимаемых сигналов, составляет не менее 45 против 30° в [1]. Также результаты [1] дополнены данными по рассеянию на нижнем ребре, причем некоторый рост амплитуды сигнала, рассеянного на нижнем ребре паза в районе углов поворота  $\delta = 90^\circ$  можно отнести, по-видимому, к влиянию протяженной боковой поверхности паза, вдоль которой в этих случаях волна распространяется перед попаданием на ребро.



Рис. 4. Характерные А-сканы для рассеяния продольной волны на верхнем (a) и нижнем  $(\delta)$  ребрах паза: a — головная волна 16,22 мкс (1), L-L 18,84 мкс (2);  $\delta$  — L-L 18,36 мкс (2).

Рассмотренные сигналы приходят на приемник первыми (от паза), и их идентификация не составляет труда. Соответствующие характерные А-сканы (осциллограммы) сигналов приведены на рис. 4. При озвучивании верхнего острия (рис. 4a) первой приходит головная волна, затем регистрируется дифрагированный сигнал продольной волны L-L от острия. При озвучивании нижнего острия (рис.  $4\delta$ ) регистрируется только дифрагированный сигнал продольной волны L-L от острия.

Рассмотрим теперь результаты аналогичных измерений амплитуд сигналов, возбуждаемых поперечной волной при рассеянии на нижнем и верхнем ребре паза. В этом случае следует более тщательно подходить к селектированию сигналов, особенно — к сигналам от верхнего ребра паза, поскольку они могут экранироваться другими импульсами, например, сигналами, создаваемыми релеевской волной, скользящей по поверхности образца. Характерные А-сканы для данного случая приведены на рис. 5. При озвучивании верхнего острия (рис. 5a) первой приходит головная волна, после нее регистрируется релеевская волна, затем приходит дифрагированный сигнал поперечной волны T-T от острия. При озвучивании нижнего острия (рис. 5a) регистрируется только дифрагированный сигнал поперечной волны T-T от острия.

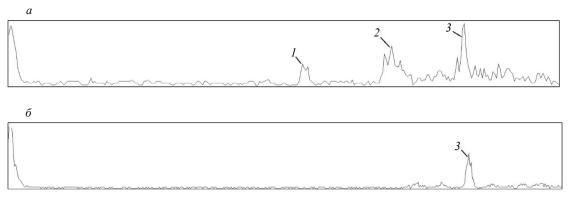


Рис. 5. Характерные А-сканы для рассеяния поперечной волны на верхнем (a) и нижнем ( $\delta$ ) ребрах паза: a — головная волна 16,8 мкс (I), релеевская волна 21,5 мкс (2), T-T 24,9 мкс (3);  $\delta$  — T-T 25,04 мкс (3).

Амплитуды принятых сигналов в зависимости от ориентации острия паза приведены на рис. 6. Как и для продольной волны, при рассеянии на нижнем ребре наблюдается общее снижение амплитуды при увеличении угла  $\delta$  (рис. 6a) и некоторое увеличение амплитуды при рассеянии на верхнем ребре (рис.  $6\delta$ ).

Однако теперь имеются особенности, связанные с тем, что при увеличении угла  $\delta$  от 0 до  $90^{\circ}$  плоскость поляризации вводимой в металл волны наклоняется относительно боковой поверхности паза, т.е. в ней появляется компонента, горизонтально поляризованная (SH) относительно этой поверхности. При некоторых ориентациях источника и приемника относительно ребра паза наблюдается немонотонное изменение амплитуды сигнала, дифрагированного на нижнем ребре. Рассмотрим этот вопрос подробнее в следующем разделе.

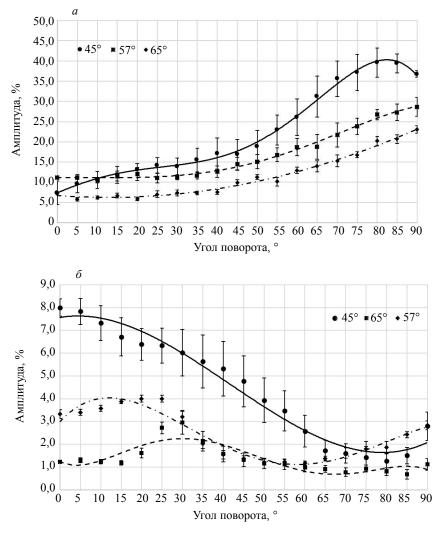


Рис. 6. Рассеяние поперечной волны на верхнем (a) и нижнем (b) ребрах паза.

#### ТРЕХМЕРНЫЕ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ УПРУГИХ ВОЛН НА ПЛОСКОСТНЫХ ДЕФЕКТАХ

Рассмотрим представленную на рис. 7 общую схему ультразвукового контроля сварного стыкового шва с использованием различных методов прозвучивания.

Если источник И и приемник П совмещены в положении ИП1, то реализуется контроль совмещенным наклонным преобразователем эхометодом. В раздельной схеме И-П2 контроль ведется двумя наклонными преобразователями эхометодом по схеме «дуэт» (при  $\Delta \neq 0$ ) или «тандем» (при  $\Delta = 0$ ), а в варианте И-П3 — двумя наклонными преобразователями эхометодом или дифракционно-временным методом ТОГО. Пусть используются пьезопреобразователи, излучающие в металл (и принимающие из металла) поперечные волны с углом ввода а. Плоскости поляризации преобразователей И (ИП1) и П3 обозначены АОЕ, а плоскость поляризации приемника П2 — ОВС. Если, например, плоскостной дефект (трещина) ориентирован вдоль оси сварного шва, то в схеме «дуэт» плоскость падения на этот дефект, обозначенная AOB, очевидно, не совпадает с плоскостями поляризации источника И, а также приемника П2. Если при этом ребро трещины ориентировано вдоль отрезка О-О3, то падающая от источника И волна попадает на это ребро под углом, отличным от 90°, т.е. возникает трехмерная задача рассеяния такой волны. Именно к такому общему случаю относится наблюдение дифрагированных сигналов, рассмотренных выше. Если ребро паза (продольной трещины) ориентировано вдоль оси шва, то рассеяние в плоскости АОЕ соответствует схеме проведения эксперимента на рис. 1. Если же ребро паза ориентировано перпендикулярно оси шва (поперечная трещина), то схеме эксперимента на рис. 1 соответствует рассеяние в плоскости АОВ.

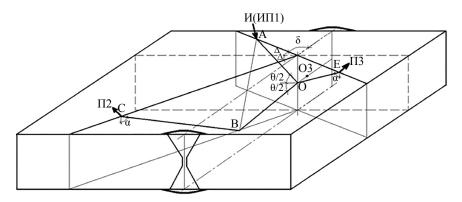


Рис. 7. Общая схема эхо- и дифракционных методов ультразвукового контроля сварных швов. Штрихпунктирными линиями обозначена осевая плоскость стыкового сварного шва, пунктиром — перпендикулярная к ней плоскость.

Традиционно в схеме TOFD с расположением преобразователей И-П3 и использованием продольных волн предполагается, что  $\Delta = 0^{\circ}$ . Из рис. 3 видно, что в широком диапазоне отклонений угла  $\Delta$  от нуля соотношение амплитуд сигналов, рассеянных верхним и нижним острием, от значения при  $\Delta = 0$ , изменяется незначительно.

В отличие от этого, при рассеянии поперечной волны из рис. 6 видно, что при регистрации дифрагированных сигналов, создаваемых при рассеянии поперечной волны по схеме TOFD, сигнал, рассеиваемым нижним ребром паза, может возрастать при разворотах  $\delta$  в окрестности  $30^\circ$ . Это связано с тем, что в падающей на ребро поперечной волне возрастает SH-компонента, соответственно, меньше происходит трансформация поперечной волны в другие типы объемных волн и в релеевскую волну.

Аналогично, если источник и приемник находятся в положении И-П2, взаимная ориентация плоскостей поляризации волн и плоскости падения на дефект, ориентированный вдоль оси шва, не совпадают. Угол ξ между этими плоскостями можно найти, рассматривая ориентацию плоскости АОВ относительно дефекта, ориентированного вдоль оси сварного шва. Согласно [9, 10], этот угол определяется из соотношения  $\cos \xi = \frac{\cos \Delta c \cos \alpha}{\sqrt{1-(\cos \Delta \sin \alpha)^2}}$  , причем  $\cos \frac{\theta}{2} = \cos \Delta \sin \alpha$  . В схеме «тандем»  $\Delta = 0^\circ$  поперечная волна поляризована в плоскости рис. 1a,  $\delta$ , и падение поперечной волны происходит перпендикулярно ребру мишени, при этом  $\frac{\theta}{2} = \alpha$  . При увеличении угла  $\Delta$  (схема «дуэт») направление плоскости поляризации смещается относительно перпендикуляра к ребру мишени и при стремлении угла  $\Delta$  к 90° углы  $\xi$  и  $\frac{\theta}{2}$  также стремятся к 90°. Если угол ввода ультразвука в металл достаточно мал, например,  $\alpha = 45^{\circ}$ , то при любых  $\Delta$  угол падения на боковую поверхность паза превышает третий критический, и обе компоненты в падающей поперечной волне SV и SH (относительно поверхности паза) рассеиваются на ребре без трансформации в продольную волну, и, как и в случае рис. За, амплитуда принимаемого сигнала монотонно падает с ростом угла  $\Delta$ . В случае, когда падение поперечной волны на вертикальную поверхность паза происходит под третьим критическим углом (т.е. для α = 57°) или под меньшими углами (например, при  $\alpha = 65^{\circ}$ ), на вертикальной поверхности паза происходит трансформация поперечной волны в продольную, в результате часть ее энергии теряется. Поэтому по мере увеличения угла  $\Delta$  и соответственно увеличения SH (относительно паза) компоненты падающей волны амплитуда дифрагированного поперечного сигнала растет. Она достигает максимума при  $\Delta$  вблизи 20—30 $^{\circ}$ , после чего угол падения на вертикальную поверхность паза, превышающий 3-й критический, трансформация в продольную волну прекращается, при дальнейшем увеличении  $\Delta$  амплитуда дифрагированной на ребре поперечной волны монотонно падает аналогично тому, как было на рис. 36 для продольной волны.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Приведены результаты экспериментального исследования дифракции продольной и поперечной волны на ребрах узкого паза, раскрытие которого выбрано таким образом, чтобы его можно

было рассматривать как имитатор верхнего и нижнего ребра трещины в сварном шве. Исследование проведено при вращении паза относительно источника и приемника на 360°, так что такой паз в зависимости от его ориентации можно рассматривать как модель продольной или поперечной протяженной трещины в сварном шве.

Для случая рассеяния продольной волны приведенные результаты расширяют ранее опубликованные данные для более широкого диапазона углов ввода. При этом показано, что для паза, имитирующего продольную трещину сварного шва, при использовании схемы TOFD изменение ориентации его ребер относительно излучателя и приемника ультразвука в диапазоне до  $\pm 45^{\circ}$ , практически не сказывается на соотношении амплитуд сигналов, дифрагированных на верхнем и нижнем ребрах паза.

Для случая рассеяния поперечной волны показано, что при углах ввода ультразвука, превышающих 57°, при отклонениях ориентации ребра паза от перпендикуляра к плоскости падения поперечной волны на вертикальную поверхность паза, следует ожидать рост (до 1,5 раз) амплитуды сигнала, дифрагированного на нижнем ребре паза. Это связано с перераспределением SV и SH (относительно вертикальной поверхности паза) компонент в поперечной волне, падающей на ребро паза.

Авторский коллектив выражает благодарность к.т.н. Л.Ю. Могильнеру за содействие при постановке экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-0148-20-00 от 20.12.2019.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Charlesworth J.P., Temple J.A.G. Engineering Application of Ultrasonic Time-Of-Flight Diffraction. Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England. 2001. 255 p.
- 2. Achenbach J.D., Gautesen A.K., McMacken H., Norris A.N. Ray Methods for Waves in Elastic Solids. Pitman, London, 1982.
- 3. Ginzel Ed. Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 249 p.
- 4. *Алешин Н.П.*, *Григорьев М.В.*, *Крысько Н.В.* Влияние конфигурации вершины источника дифракции на амплитуду дифрагированного сигнала // Сварка и диагностика. 2019. № 6. С. 17—19.
- 5. Григорьев М.В., Гурвич А.К., Гребенников В.В., Семерханов С.В. Ультразвуковой способ определения размеров трещин // Дефектоскопия. 1979. № 6. С. 50—56.
  - 6. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 412 с.
- 7. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 2013. 574 с.
- 8. Bazulin E.G., Konovalov D.A., Sadykov M.S. Finite-Difference Time Domain Method. Calculating Echo Signals in Homogeneous Isotropic Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 7. P. 469—478. [Базулин Е.Г., Коновалов Д.А., Садыков М.С. Метод конечных разностей во временной области. Расчет эхосигналов в однородных изотропных материалах // Дефектоскопия. 2018. № 7. С. 9—18.]
- 9. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Могильнер Л.Ю., Яровой А.А. Повышение выявляемости объемных дефектов // Дефектоскопия. 1985. № 7. С. 24—30.
- 10. Алешин Н.П., Лежава А.Г., Могильнер Л.Ю. Изучение дифракции упругой волны на канальных дефектах и рекомендации по повышению их выявляемости // Дефектоскопия. 1986. № 11. С. 3—10.

# ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ АКУСТОУПРУГОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2021 г. А.А. Хлыбов<sup>1,\*</sup>, А.Л. Углов<sup>1</sup>, Д.А. Рябов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24 \*E-mail: hlvbov 52@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2020; после доработки 30.10.2020 Принята к публикации 06.11.2020

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания методик определения напряженно-деформированного состояния акустически анизотропных конструкционных материалов в составе технических объектов, эксплуатируемых в арктических условиях. Проанализированы особенности использования явления акустоупругости для материалов с различными значениями акустоупругих коэффициентов, акустической анизотропии и коэффициентами температурной зависимости акустических параметров, фигурирующих в расчетных алгоритмах. Установлено, что существующие подходы к учету температурных эффектов в ряде важных случаев приводят к заметным погрешностям при определении механических напряжений в материале ответственных технических объектов. При этом учет температурных поправок необходим как для двухосного (плоского), так и для одноосного напряженного состояния. Экспериментально показано наличие анизотропии термоакустических коэффициентов поперечных волн для материалов, обладающих анизотропией. Предложены уточненные расчетные формулы для определения одно- и двухосного напряженного состояния анизотропного материала, учитывающие анизотропию термоакустических коэффициентов поперечных волн.

*Ключевые слова*: напряженное состояние, поперечные волны, упругая анизотропия, акустоупругие коэффициенты, термоакустические коэффициенты, задержки импульсов.

**DOI:** 10.31857/S0130308221010036

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время явление акустоупругости [1—4] широко используется для определения механических напряжений, возникающих в материале ответственных технических объектов в различных отраслях промышленности и транспорта.

Методы контроля напряженного состояния с успехом применяются в ядерной энергетике [5—7], строительстве [8], на железнодорожном [9—12] и трубопроводном [13—18] транспорте.

Существует значительное количество работ, посвященных созданию исследовательских и инженерных методик определения остаточных микро- и макронапряжений различных конструкционных материалах на базе явления акустоупругости [19—23].

Напряженное состояние, близкое к плоскому, реализуется в стенках газопроводов, эксплуатация которых в условиях Крайнего Севера сопряжена с резкими температурными колебаниями, без корректного учета которых оценка напряжений может привести к значительным погрешностям.

К числу ответственных объектов, в элементах которых реализуется одноосное напряженное состояние, следует отнести строительные несущие и другие конструкции, широко используемые в арктических условиях. Разработанные к настоящему времени инженерные методики использования явления акустоупругости не предполагают учета температурного фактора при контроле одноосного напряженного состояния с использованием поперечных волн, что, как показывают физические соображения и результаты экспериментов, может привести к заметным погрешностям в случае анизотропных материалов.

Сложившиеся к настоящему времени подходы к контролю механических напряжений в материале акустическим методом обычно базируются на общих соотношениях акустоупругости [4].

Соответствующие уравнения связи скорости и времени распространения упругих объемных волн различной поляризации с действующими напряжениями в рамках матричной теории акустоупругости в отсутствие начальных напряжений и внешних электромагнитных воздействий имеют обычный для линеаризованных соотношений вид:

$$\delta V_{ik} = \beta_{ikln} \sigma_{ln} + \gamma_{ik}^{V} \Delta T; \tag{1}$$

$$\delta t_{ik} = \alpha_{ikln} \sigma_{ln} + \gamma_{ik}^t \Delta T, \tag{2}$$

где индекс i соответствует направлению распространения упругой волны, k — направлению поляризации; значения i=k соответствуют продольным волнам, значения  $i\neq k$  — поперечным;  $\sigma_{ln}$  — тензор напряжений в момент измерения;  $\delta V_{ik}$ ,  $\delta t_{ik}$  — относительные изменения скорости и времени распространения упругих волн:  $\delta V_{ik} = \frac{V_{ik} - V_{ik}^0}{V_{ik}^0}$ ,  $\delta t_{ik} = \frac{t_{ik} - t_{ik}^0}{t_{ik}^0}$ ,  $V_{ik}$  и  $t_{ik}$  соответствуют напряжениям  $\sigma_{ln}$ ,  $V_{ik}^0$  и  $t_{ik}^0$  — начальному ненапряженному состоянию материала;  $\beta_{ikln}$  — акустоупругие коэффициенты скорости;  $\alpha_{ikln}$  — акустоупругие коэффициенты времени;  $\Delta T = T - T_0$  — изменение температуры материала объекта при изменении напряжений от 0 до  $\sigma_{ln}$ ;  $\gamma_{ik}^V = \left(\frac{\partial \delta V_{ik}}{\partial T}\right)_{\sigma_{ln}}$  — термоакустические коэффициенты времени.

Методики контроля напряжений с использованием наиболее распространенного акустического эхо-импульсного метода обычно базируются на измерениях временных интервалов между многократно отраженными импульсами упругих волн различной поляризации. В этой связи акустоупругие соотношения типа (2) представляются более предпочтительными. Однако, если уравнения (1) непосредственно вытекают из соотношений нелинейной теории упругости и акустоупругие коэффициенты  $\beta_{ikln}$  не зависят (точнее – слабо зависят) от напряжений, то в уравнениях (2) относительно коэффициентов такого однозначного заключения сделать нельзя. Действительно, в случае изотропной среды связь между коэффициентами  $\alpha_{ikln}$  и  $\beta_{ikln}$  имеет вид [4]:

$$\alpha_{ikln} = A_{ikln} - \beta_{ikln}, \tag{3}$$

где

$$A_{ikln} = -\frac{1}{E} \begin{bmatrix} \mathbf{v} & \mathbf{v} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{v} & \mathbf{v} \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix},\tag{4}$$

E, v — модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно, зависимость которых от напряжений вносит дополнительную ошибку в определение напряжений с использованием уравнений (2).

В случае анизотропного материала выражение (4) существенно усложняется и дополнительная методическая ошибка определения напряжений с помощью уравнений (2) становится еще большей и менее определенной.

На наш взгляд, более строгий подход к построению инженерных соотношений акустоупругости, базирующихся на измерении временных интервалов, предложен в работе [3], в которой на основе базовых уравнений (1) для случая плоского напряженного состояния с главными напряжениями  $\sigma_1$ , в плоскости, перпендикулярной направлению распространения упругих волн, получены выражения, связывающие напряжения с задержками импульсов упругих волн двух типов: продольных, и поперечных, поляризованных вдоль главных напряжений.

Цель работы — уточнение алгоритма определения одно- и двухосного напряженного состояния анизотропного материала акустическим методом с учетом температурного фактора термоакустических коэффициентов поперечных волн.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Используем аналогичный подход при построении расчетных соотношений для анизотропного материала без упрощающих предположений в отношении акустоупругих коэффициентов, сделанных автором [3].

Будем рассматривать один из наиболее распространенных в технике вид конструкционных материалов — ортотропный, в котором действуют главные напряжения — продольное  $\sigma_1$  и поперечное  $\sigma_2$ , лежащие в плоскости z=0 и направленные вдоль осей x и y, совпадающими с осями анизотропии.

Уравнения акустоупругости (1) с учетом изменения температуры материала объекта контроля могут быть записаны следующим образом:

$$\delta V_{31} = \beta_{3111} \sigma_1 + \beta_{3122} \sigma_2 + \gamma_{31}^{V} \Delta T; \tag{5}$$

$$\delta V_{32} = \beta_{3211} \sigma_1 + \beta_{3222} \sigma_2 + \gamma_{32}^V \Delta T; \tag{6}$$

$$\delta V_{33} = \beta_{3311} \sigma_1 + \beta_{3322} \sigma_2 + \gamma_{33}^V \Delta T. \tag{7}$$

Введем упрощенные обозначения:

 $V_1 = V_{31}$  — скорость упругой поперечной волны, распространяющейся нормально к поверхности объекта контроля и поляризованной вдоль оси x;

 $V_2 = V_{32}$ — скорость упругой поперечной волны, распространяющейся нормально к поверхности объекта контроля и поляризованной перпендикулярно оси y;

 $V_3 = V_{33}$  — скорость продольной волны, распространяющейся нормально к поверхности объекта контроля.

Акустоупругие и термоакустические коэффициенты обозначим следующим образом:

$$\begin{split} \beta_1 &= \beta_{3111}, \ \beta_2 = \beta_{3122}, \ \beta_3 = \beta_{3211}, \ \beta_4 = \beta_{3222}, \\ \gamma_1^V &= \gamma_{31}^V, \gamma_2^V = \gamma_{32}^V, \gamma_3^V = \gamma_{33}^V. \end{split}$$

Из симметрии задачи следует равенство двух коэффициентов  $\beta_{3311} = \beta_{3322}$ , которые обозначим через  $\beta_{\epsilon}$ .

Таким образом, исходные уравнения акустоупругости приобретают вид:

$$\delta V_1 = \beta_1 \sigma_1 + \beta_2 \sigma_2 + \gamma_1^V \Delta T; \tag{8}$$

$$\delta V_2 = \beta_2 \sigma_1 + \beta_4 \sigma_2 + \gamma_2^V \Delta T; \tag{9}$$

$$\delta V_3 = \beta_5 (\sigma_1 + \sigma_2) + \gamma_3^V \Delta T. \tag{10}$$

Обозначим времена распространения упругих волн в напряженном состоянии через  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ , а в ненапряженном состоянии через  $t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$ . Элементарные преобразования позволяют исключить неизвестные величины толщины

Элементарные преобразования позволяют исключить неизвестные величины толщины материала в зоне измерений до и после приложения напряжений и, отбросив добавки второго порядка малости, записать уравнения акустоупругости в следующем виде:

$$\delta d_1 = \alpha_1 \sigma_1 + \alpha_2 \sigma_2 + (\gamma_3^V - \gamma_1^V) \Delta T; \tag{11}$$

$$\delta d_2 = \alpha_3 \sigma_1 + \alpha_4 \sigma_2 + (\gamma_3^V - \gamma_2^V) \Delta T, \tag{12}$$

где 
$$\delta d_1 = \frac{d_1 - d_{01}}{d_{01}}$$
,  $d_1 = \frac{t_1}{t_3}$ ,  $d_{01} = \frac{t_{01}}{t_{03}}$ ;  $\delta d_2 = \frac{d_2 - d_{02}}{d_{02}}$ ,  $d_2 = \frac{t_2}{t_3}$ ,  $d_{02} = \frac{t_{02}}{t_{03}}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  — акустоупругие коэффициенты времени, связанные с акустоупругими коэффициентами скорости:

$$\alpha_1 = \beta_5 - \beta_1, \ \alpha_2 = \beta_5 - \beta_2, \ \alpha_3 = \beta_5 - \beta_3, \ \alpha_4 = \beta_5 - \beta_4.$$
 (13)

Из уравнений (11), (12) следуют расчетные соотношения для определения плоского напряженного состояния:

$$\sigma_1 = k_1 \left[ \delta d_1 - \left( \gamma_3^V - \gamma_1^V \right) \Delta T \right] + k_2 \left[ \delta d_2 - \left( \gamma_3^V - \gamma_2^V \right) \Delta T \right]; \tag{14}$$

$$\sigma_2 = k_3 \left[ \delta d_1 - \left( \gamma_3^V - \gamma_1^V \right) \Delta T \right] + k_4 \left[ \delta d_2 - \left( \gamma_3^V - \gamma_2^V \right) \Delta T \right], \tag{15}$$

где  $k_1,\,k_2,\,k_3,\,k_4$  — тензометрические [3] или упругоакустические [4] коэффициенты:

$$k_1 = \frac{\alpha_4}{\alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3}, k_2 = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3}, k_3 = -\frac{\alpha_3}{\alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3}, k_4 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3}.$$
 (16)

Очевидно, что экспериментально определить термоакустические коэффициенты времени  $\gamma_{1,2,3}^{\prime}$  проще, чем термоакустические коэффициенты скорости  $\gamma_{1,2,3}^{\prime}$  .

В [4] установлена связь между этими коэффициентами:

$$\gamma_{1,2}^{V} = -\gamma_{1,2}^{t}, \gamma_{3}^{V} = \frac{\alpha}{3} - \gamma_{3}^{t}, \tag{17}$$

где α — коэффициент объемного теплового расширения материала объекта.

С учетом (17) расчетные формулы (23), (24) принимают вид:

$$\sigma_{1} = k_{1} \left[ \delta d_{1} - \left( \frac{\alpha}{3} + \gamma_{1}^{t} - \gamma_{3}^{t} \right) \Delta T \right] + k_{2} \left[ \delta d_{2} - \left( \frac{\alpha}{3} + \gamma_{2}^{t} - \gamma_{3}^{t} \right) \Delta T \right]; \tag{18}$$

$$\sigma_2 = k_3 \left[ \delta d_1 - \left( \frac{\alpha}{3} + \gamma_1^t - \gamma_3^t \right) \Delta T \right] + k_4 \left[ \delta d_2 - \left( \frac{\alpha}{3} + \gamma_2^t - \gamma_3^t \right) \Delta T \right]. \tag{19}$$

Обычно авторами инженерных методик акустоупругости в отношении термоакустических коэффициентов поперечных волн со взаимно перпендикулярными векторами поляризации делается предположении об их равенстве:

$$\gamma_1^t = \gamma_2^t. \tag{20}$$

То же самое регламентируется нормативными документами ГОСТ Р 52890—2007, ГОСТ Р 56664—2015.

Однако из физических представлений об особенностях распространения поперечных горизонтально поляризованных волн в акустически анизотропных материалах следует, что для них равенство (20) не выполняется. Действительно, как показано в [2], термоакустические коэффициенты связаны с акустоупругими коэффициентами пропорциональной зависимостью Акустоупругие коэффициенты, как следует из результатов современных исследований [14, 23—26], зависят от степени акустической анизотропии материала, при этом неучет факта зависимости акустоупругих коэффициентов от степени анизотропии может привести к существенным погрешностям при определении напряжений. То же может произойти и при допущении несправедливости равенства (20) в случае акустически анизотропных материалов.

Для оценки влияния температуры на результаты измерения двухосных напряжений, формулы (18), (19) удобно записать следующим образом:

$$\sigma_1 = \sigma_1(T_0) + \Delta\sigma_1(\Delta T); \tag{21}$$

$$\sigma_2 = \sigma_2(T_0) + \Delta \sigma_2(\Delta T), \tag{22}$$

где  $\sigma_1(T_0)$ ,  $\sigma_2(T_0)$  соответствуют напряжениям, возникающим в объекте при неизменной температуре  $T_0$  и рассчитываемым по обычным формулам акустоупругости:

$$\sigma_1(T_0) = k_1 \delta d_1 + k_2 \delta d_2; \tag{23}$$

$$\sigma_2(T_0) = k_3 \delta d_1 + k_4 \delta d_2. \tag{24}$$

Температурные добавки к напряжениям можно записать следующим образом:

$$\Delta\sigma_{1}(\Delta T) = \Delta\sigma_{1}'(\Delta T) + \Delta\sigma_{1}''(\Delta T); \tag{25}$$

$$\Delta \sigma_2 \left( \Delta T \right) = \Delta \sigma_2' \left( \Delta T \right) + \Delta \sigma_2'' \left( \Delta T \right), \tag{26}$$

где добавки  $\Delta \sigma_1'(\Delta T)$  и  $\Delta \sigma_2'(\Delta T)$  зависят от разности термоакустических коэффициентов поперечных и продольных волн, как это указано в [1] (с поправкой на температурный коэффициент расширения):

$$\Delta \sigma_1'(\Delta T) = (k_1 + k_2) \left( \gamma_3' - \overline{\gamma'} - \frac{\alpha}{3} \right) \Delta T; \tag{27}$$

$$\Delta \sigma_2' \left( \Delta T \right) = \left( k_3 + k_4 \right) \left( \gamma_3' - \overline{\gamma'} - \frac{\alpha}{3} \right) \Delta T, \tag{28}$$

где  $\overline{\gamma'}$  — среднее значение термоакустического коэффициента времени для поперечных волн  $\overline{\gamma'} = \frac{\gamma'_1 + \gamma'_2}{2}$ .

Добавки  $\Delta \sigma_1''(\Delta T)$  и  $\Delta \sigma_2''(\Delta T)$  возникают при невыполнении равенства (20):

$$\Delta \sigma_1''(\Delta T) = \frac{(k_1 - k_2)(\gamma_2' - \gamma_1')}{2} \Delta T; \tag{29}$$

$$\Delta \sigma_2'' \left( \Delta T \right) = \frac{\left( k_3 - k_4 \right) \left( \gamma_2' - \gamma_1' \right)}{2} \Delta T. \tag{30}$$

Для проверки высказанных предположений проводился эксперимент по определению термоакустических коэффициентов  $\gamma_1^t$  и  $\gamma_2^t$  на образцах акустически изотропной стали 20 и трубной стали класса прочности X70 толщиной 16 мм с разной степенью собственной акустической анизотропии  $A_0 = \frac{t_{02}}{t} - 1$ , приблизительно равными 3 и 7 %.

Измерения задержек импульсов проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН» ( $\mathbb{N}$  в Государственном реестре средств измерений 67552-17), имеющего метрологически обеспеченное среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности  $\Delta t'$ , равное 1 нс. Погрешность используемого контактного термометра составляла  $0.1^{\circ}$ С.

Измерения проводились с помощью прямого совмещенного преобразователя поперечных волн, имеющего в качестве активного элемента две рядом расположенные пьезопластинки с частотой 5 МГц со взаимно перпендикулярными векторами поляризации. Использовались два раздельных приемо-передающих канала ИВК «АСТРОН» для каждой пьезопластинки

На рис. 1 приведена осциллограмма импульсов, типичная для обоих каналов.

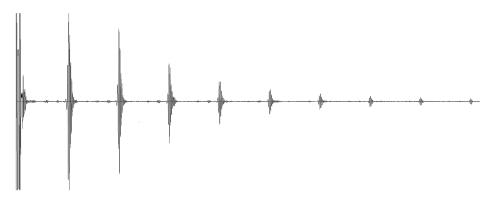


Рис. 1. Типичная осциллограмма отраженных импульсов поперечных волн.

Для исследованных образцов задержка между 1-м и 2-м отраженными импульсами составляет приблизительно 10 мкс. Поэтому применение ИВК «АСТРОН» обеспечивает величину относительной погрешности  $\delta' t = \frac{\Delta t'}{\overline{t}}$  при измерении задержки между 1-м и n-м отраженными импульсами порядка  $\frac{10^{-4}}{(n-1)}$ . Нами использовались 1-й и 6-й отраженные импульсы, что обеспечивало относительную погрешность измерения временных интервалов  $2 \times 10^{-5}$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2—4 приведены графики зависимостей  $\frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T), \frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T)$  для трех исследованных образцов.

Рис. 2 показывает, что для акустически изотропной стали разница термоакустических коэффициентов поперечных волн практически отсутствует, что и следовало ожидать.

Для анизотропной стали с величиной собственной анизотропии порядка 3 % термоакустические

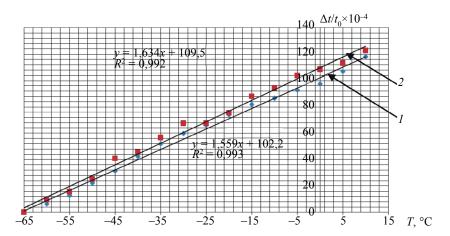


Рис. 2. Термоакустические кривые для образцов из акустически изотропной стали 20:  $I = \frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T)\,;\; 2 = \frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T).$ 

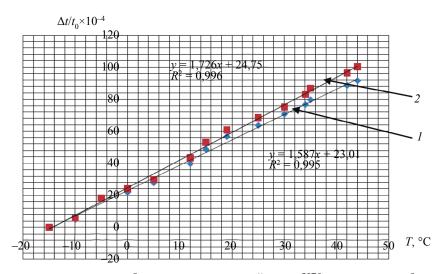


Рис. 3. Термоакустические кривые для образцов из анизотропной стали X70 со степенью собственной анизотропии порядка 3%:  $I = \frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T)\;;\; 2 = \frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T).$ 

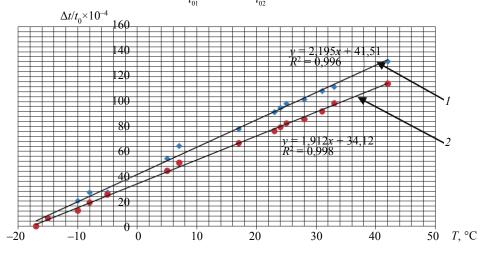


Рис. 4. Термоакустические кривые для образцов анизотропной стали X70 со степенью собственной анизотропии порядка 7%:  $I = \frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T)\,;\; 2 = \frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T).$ 

коэффициенты составляют:  $\gamma_1^t = 1,59 \times 10^{-4}$  град $^{-1}$ ,  $\gamma_2^t = 1,73 \times 10^{-4}$  град $^{-1}$ , для анизотропной стали с величиной  $A_0 \approx 7$  %:  $\gamma_1^t = 2,20 \times 10^{-4}$  град $^{-1}$ ,  $\gamma_2^t = 1,91 \times 10^{-4}$  град $^{-1}$ , т.е для нее разность термоаку-

стичеких коэффициентов вдвое больше. При этом для первой стали  $\gamma_1^t < \gamma_2^t$ , а для второй —  $\gamma_1^t > \gamma_2^t$ . Погрешность определения термоакустических коэффициентов можно оценить по приближенной формуле:

 $\Delta \gamma^t \approx \sqrt{2} \overline{\gamma^t} \sqrt{(\delta' t)^2 + (\delta' T)^2},$ (31)

где  $\delta' t = \frac{\Delta t}{\overline{t}}$ ,  $\Delta t$  — абсолютная погрешность определения задержки,  $\overline{t}$  — ее среднее значение;

$$\delta'T=\frac{\Delta'T}{T-T_0},~\Delta'T~$$
 — абсолютная погрешность определения температуры в диапазоне  $T$ — $T_0$ .

При доверительной вероятности 95 % погрешность определения термоакустических коэффициентов  $0.01 \times 10^{-4}$  град $^{-1}$ , поэтому разница термоакустических коэффициентов для исследованных анизотропных сталей представляется значимой.

Для оценки влияния анизотропии термоакустических коэффициентов на погрешность определения двухосного напряженного состояния, рассмотрим величины  $\delta\sigma_1 = \frac{\Delta\hat{\sigma}_1''(\Delta T)}{\Delta\sigma_1'(\Delta T)}$  и  $\delta\sigma_2 = \frac{\Delta\sigma_2''(\Delta T)}{\Delta\sigma_2'(\Delta T)}$ , характеризующие соотношение добавок к расчетным значениям напряжений с учетом и без учета анизотропии термоакустических коэффициентов. Из формул (27—30) следует:

$$\delta\sigma_{1} = \frac{(k_{1} - k_{2})(\gamma_{2}^{t} - \gamma_{1}^{t})}{2(k_{1} + k_{2})(\gamma_{3}^{t} - \gamma_{1}^{t})};$$
(32)

$$\delta\sigma_2 = \frac{(k_3 - k_4)(\gamma_2' - \gamma_1')}{2(k_3 + k_4)(\gamma_3' - \overline{\gamma}' - \frac{\alpha}{3})}.$$
(33)

По данным [4], коэффициент объемного теплового расширения для исследуемых марок стали  $\alpha \approx 3 \times 10^{-5}$  град<sup>-1</sup>. В соответствии с результатами работы [28] примем  $\gamma_3^t \approx 0.9 \times 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>.

В соответствии с экспериментальными результатами, приведенными в работе [15] для стали с начальной анизотропией, равной 3 %:

 $k_1=9.8\times 10^4$  МПа,  $k_2=-1.3\times 10^4$  МПа,  $k_3=13.9\times 10^4$  МПа,  $k_4=-1.6\times 10^4$  МПа, для стали с начальной анизотропией, равной 7 %:

$$k_1 = 6.0 \times 10^4 \text{ M}\Pi \text{a}, k_2 = -1.8 \times 10^4 \text{ M}\Pi \text{a}, k_3 = 11.6 \times 10^4 \text{ M}\Pi \text{a}, k_4 = -2.2 \times 10^4 \text{ M}\Pi \text{a}.$$

Таким образом, для анизотропной стали с начальной анизотропией порядка 3 % получаем:  $\delta\sigma_{1,2}\approx 10.0$  %; для анизотропной стали с начальной анизотропией порядка 7 %:  $\delta\sigma_{1,2}\approx 20$  %, что уже довольно существенно и требует учета анизотропии термоакустических коэффициентов.

Например, при резких температурных перепадах, свойственных климату Арктики, расчет напряжений без учета анизотропии термоакустических коэффициентов может привести к заметным погрешностям, составляющих, как это следует из формул (29), (30), порядка 50 и 100 МПа для исследованных анизотропных сталей при перепаде температур.

В случае одноосного напряженного состояния достаточно двух измерений: для поперечных волн с взаимно перпендикулярной поляризацией.

Соответствующие строгие расчетные формулы приведены в работе [3] и в ГОСТ Р 56664— 2015, однако для более наглядного представления влиянии анизотропии термоакустических коэффициентов на результаты расчета одноосного напряженного состояния рассмотрим упрощенную формулу, использование которой не приводит к значительным погрешностям по сравнению со строгими формулами:

$$\sigma = D(A - A_0),\tag{34}$$

 $\sigma = D(A - A_0), \tag{34}$  где  $A_0 = \frac{t_{02}}{t_{01}} - 1$  — собственная анизотропия материала в отсутствие напряжений;  $A = \frac{t_2}{t_1} - 1$  анизотропия материала при действии одноосных напряжений; D — тензометрический коэффициент, близкий для исследуемых сталей к величине  $-1.1 \times 10^5$  МПа [3].

С учетом анизотропии термоакустических коэффициентов формула для анизотропии при температуре в отсутствие напряжений приобретает вид:

$$A(T) = A(T_0) + \Delta A(T), \tag{35}$$

где  $\Delta A(T) = [A(T_0) + 1](\gamma_2^t - \gamma_2^t)\Delta T$ .

Добавка к анизотропии  $\Delta T$  приводит к систематической погрешности определения напряжений с учетом формулы (34), составляющей приблизительно 1,5 МПа/град для стали с анизотропией 3 % и 3 МПа/град для стали с анизотропией 3 %, что может привести к заметным погрешностям, составляющих порядка 75 и 150 МПа для исследованных сталей при перепаде температур  $\pm 50$  °C.

Факт зависимости акустической анизотропии от температуры для исследованных образцов анизотропной стали подтверждается графиками, приведенными на рис. 5.

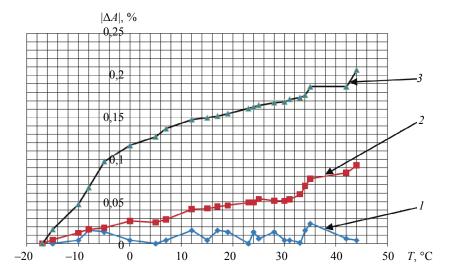


Рис. 5. Зависимость акустической анизотропии от температуры:  $I-A_0\approx 0$  %;  $2-A_0\approx 3$  %;  $3-A_0\approx 7$  %.

Погрешность определения анизотропии  $\Delta A \approx \sqrt{2\delta t}$ , где  $\delta t = \frac{\Delta t}{\overline{t}}$ ;  $\Delta t$  — абсолютная погрешность определения задержки;  $\overline{t}$  — ее среднее значение. При использовании ИВК «АСТРОН» и определении задержек между 1-м и 6-м отраженными импульсами величина  $\Delta A$  не превышает 0,015 %.

Из полученных результатов следует, что при расчете одноосного напряженного состояния при значительных перепадах температур следует учитывать анизотропию термоакустических коэффициентов.

#### выводы

- 1. На основании физических представлений о связи акустоупругих и термоакустических коэффициентов сделано предположение об анизотропии последних для поперечных горизонтально поляризованных волн, распространяющихся в анизотропном материале.
- 2. Результаты сравнительных экспериментальных исследований, проведенных на образцах из изотропной стали и анизотропной стали с разной степенью собственной акустической анизотропии, показали для последней наличие разницы термоакустических коэффициентов по-разному поляризованных поперечных волн, заведомо превышающей погрешность измерений. При этом эта разница увеличивается с увеличением степени анизотропии.
- 3. Оценена погрешность определения напряжений, вызванная неучетом анизотропии термоакустических коэффициентов поперечных волн. Показано, что для стали со значительной собственной анизотропией резкие перепады температур, свойственные условиям Арктики, могут привести к существенным ошибкам в расчете напряжений.

4. Предложены уточненные расчетные формулы для определения одно- и двухосного напряженного состояния анизотропного материала, учитывающие анизотропию термоакустических коэффициентов поперечных волн.

Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 151 с. 2. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензометрия. Кишинев: Штиинца, 1991. 204 с.
- 3. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
- 4. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
- 5. *Трофимов А.И.*, *Минин С.И.*, *Трофимов М.А*. Измерение напряженного состояния сварных соединений технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС на основе теории акустоупругости // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 2. С. 26—34.
- 6. *Минин С.И.* Определение модулей упругости третьего порядка для измерения напряженнодеформированного состояния металла элементов конструкций АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 1. С. 15—22.
- 7. *Хлыбов А.А.*, *Рябов Д.А*. Оценка остаточных напряжений в образцах из ферритно-перлитной стали с аустенитной наплавкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 2 (764). С. 45—50.
- 8. Алексеева Е.Л., Альхиминко А.А., Беляев А.К., Лобачев А.М., Полянский В.А., Ростовых Г.Н., Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Яковлев Ю.А. Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 12 (51). С. 33—44.
- 9. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В., Гущина Л.В.* Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23.
- 10. *Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С.* Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7 (655). С. 103—109.
- 11. *Муравьев В.В.*, *Волкова Л.В.*, *Платунов А.В.*, *Булдакова И.В.* Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 1. С. 41—44.
- 12. *Муравьев В.В., Волкова Л.В.* Экспериментальная оценка остаточных напряжений и натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 98—104.
- 13. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В.* Использование явления акустоупругости при исследовании напряженного состояния технологических трубопроводов // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 52—59.
- 14. *Волкова Л.В.*, *Муравьева О.В.*, *Муравьев В.В.*, *Булдакова И.В.* Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 42—52.
- 15. Углов А.Л., Хлыбов А.А. О контроле напряженного состояния газопроводов из анизотропной стали методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 34—41.
- 16. *Булдакова И.В.*, *Волкова Л.В.*, *Муравьев В.В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединениями // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 1. С. 4—8. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8
- 17. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В.* Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 51—60.
- 18. *Махутов Н.А., Пасманик Л.А., Камышев А.В.* Метод акустоупругости для оценки напряженнодеформированного состояния и безопасности элементов трубопроводных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2018. № 1. С. 19—29.
- 19. Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03н17к10в10мт // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 3—9.
- 20. *Муравьев В.В.*, *Стрижак В.А.*, *Пряхин А.В.* Исследование внутренних напряжений в металло-конструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 12. С. 52—57.

- 21. Zhan Y., Changsheng L., Xiangwei K., Zhongya L. Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress // Ultrasonics. 2017. V. 73. P. 271—276.
- 22. *Abbasi Z., Ozevin D.* The influence of ultrasonic frequency on shear 31. stress measurement using acoustoelasticity / Conference Proceedings. 42. Ser. "42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE". 2016. P. 7—10.
- 23. Albakri M.I., Tarazaga P.A. A novel acoustoelastic-based technique for stress measurement in structural components // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 34th. Ser. "Dynamics of Civil Structures Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics, 2016". 2016. P. 49—56.
- 24. Grishchenko A.I., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Shtukin L.V. Relationship between the acoustic anisotropy parameter and measures of the stress-strain state for a specimen with a stress concentrator // Days on Diffraction (DD). IEEE. 2017. P. 154—158.
- 25. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 6. P. 201—207.
- 26. *Никитина Н.Е., Казачек С.В.* Зависимость коэффициентов акустоупругости от анизотропии физико-механических свойств трубных сталей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 4. С. 49—54.
- 31. Камышев А.В., Макаров С.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В. Обобщенные коэффициенты для измерения механических напряжений методом акустоупругости в конструкциях из углеродистых и низколегированных сталей // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 3—10.
- 32. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В.* Учет температурного фактора при ультразвуковом контроле напряженного состояния трубопроводов // Дефектоскопия. 2012. № 5. С. 20—25.

## КИНЕТИКА ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАТОРОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ НА РАЗРЫВ

© 2021 г. Н.А. Махутов<sup>1</sup>, И.Е. Васильев<sup>1,\*</sup>, Д.В. Чернов<sup>1</sup>, В.И. Иванов<sup>2</sup>, Е.В. Терентьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия 101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

<sup>2</sup> ЗАО «НИИИН МНПО Спектр», Россия 119048 Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

\*E-mail: vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.08.2020; после доработки 15.11.2020 Принята к публикации 27.11.2020

Рассмотрено влияние различного рода концентраторов напряжений на процессы накопления повреждений, зарождения и распространения трещин в образцах из стали  $C\tau3$  в условиях одноосного растяжения. Исследованные образцы имели центральное отверстие диаметром  $\emptyset=5$  мм или поперечный сварной шов. Результаты акустико-эмиссионной диагностики показали, что, несмотря на различную природу концентраторов, диаграммы нагружения, характер накопления повреждений и развитие магистральных трещин, количество зарегистрированных событий акустической эмиссии (АЭ) и активность их регистрации, динамика изменения весового содержания локационных импульсов ( $W_i$ ) в энергетических кластерах нижнего, среднего и верхнего уровня была достаточно похожей, также как и значения этих параметров при разрушении образцов.

*Ключевые слова*: концентрация напряжений, трещина, акустическая эмиссия, импульс АЭ, критериальные параметры, видеорегистрация, структура материала.

**DOI:** 10.31857/S0130308221010048

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сигналы АЭ событий, регистрируемые преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), отражают энергетические и временные параметры импульсов смещений среды, генерируемых при динамической перестройке структуры материала. Возникает задача в установлении феноменологических закономерностей между разрушениями структуры конструкционного материала на микромезо- и макромасштабном уровне [1, 2] и регистрируемыми при этом импульсами АЭ, их энергетическими и темпоральными параметрами, формой и спектром. Установление таких перекрестных связей дает возможность идентифицировать природу регистрируемых процессов, оценить текущий уровень степени разрушения структуры материала и осуществить прогноз остаточной прочности изделия.

В основном кластерный анализ и классификацию регистрируемых сигналов АЭ событий по их энергетическим и временным параметрам, а также формам и спектрам проводят на этапе постобработки данных, используя различные методики кластеризации [3—8]. При этом существуют отдельные методики [9—11], позволяющие в режиме реального времени разделять регистрируемые импульсы на кластеры, свойственные различным типам источников АЭ, в поле параметров, характеризующих форму сигнала.

С целью мониторинга кинетики накопления повреждений в структуре полимерных композитных материалов (ПКМ) на микро-, мезо- и макромасштабном уровне в процессе АЭ диагностики было предложено регистрируемые массивы импульсов разделять на кластеры нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) уровня в поле параметров относительной энергии и усредненной частоты выбросов ( $E_{\rm u}-N_{\rm u}/t_{\rm u}$ ) [12—14]. Параметр  $N_{\rm u}/t_{\rm u}$  характеризует усредненную плотность заполнения импульса в кГц, а параметр  $E_{\rm u}$  — относительную его энергию в дБ, вычисляемую по формуле:  $E_{\rm u}=20\times \lg(E/E_0)$ , где  $E_0=10^{-6}$  эВ (1 эВ  $\approx 16\times 10^{-20}$  Дж) [16, 17]. Эти параметры дополняют основные характеристики сигналов АЭ, включающие согласно ГОСТ ИСО Р 55045—2012 максимальную амплитуду ( $u_{\rm m}$ ), время его нарастания ( $t_{\rm u}$ ) в мкс — интервал от момента пересечения порога дискриминации ( $u_{\rm th}$ ) до достижения максимального значения амплитуды ( $u_{\rm m}$ ), длительность импульса ( $t_{\rm u}$ ) в мкс — интервал от момента пресечения сигналом порога дискриминации до ухода его под порог и количество выбросов ( $N_{\rm u}$ ) в ед. — пересечений амплитудой сигнала порога дискриминации.

В качестве критериальных параметров, отражающих кинетику накопления повреждений и разрушение структуры материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне, предложено использовать активность регистрации и весовое содержание импульсов АЭ событий в энергетических кластерах. Их применение потребовало введения следующих обозначений:

 $N_{H}, N_{C}, N_{B}$  — количество импульсов АЭ в кластерах нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) энергетического уровня;

 $N_{\Sigma^{\Pi}}$  — суммарное количество импульсов АЭ событий ( $N_{\Sigma^{\Pi}} = N_H + N_C + N_B$ );  $W_i = (N_i/N_{\Sigma^{\Pi}}) \times 100 \%$  — весовое содержание локационных импульсов в кластерах, где i = H, C, B ( $\Sigma$   $W_i = W_H + W_C + W_B = 100 \%$ );  $N_i$  — активность регистрации импульсов АЭ в единицу времени в кластерах H, C, B;  $N_i$  — суммарная активность регистрации импульсов АЭ в единицу времени ( $N_{\Sigma} = N_H + N_C + N_B$ ).

В ходе испытания образцов из стали Ст3 с центральным отверстием (ЦО) и поперечным сварным швом (СШ) на растяжение, проводимых с применением системы АЭ диагностики, синхронизированной с видеорегистрацией, изучалось влияние концентраторов на кинетику накопления повреждений и разрушение структуры материала.

Задачи проводимых исследований определялись следующими целями.

- 1. Сопоставить уровень предельных нагрузок и деформаций, а также характер разрушения образцов в партиях ЦО и СШ при одноосном растяжении для определения их потенциальной опасности в конструкциях из стали Ст3.
- 2. Протестировать на образцах из Ст3 возможность использования структурно-феноменологической концепции, разработанной для разделения импульсов АЭ событий на энергетические кластеры, соответствующие микро-, мезо- и макроструктурным разрушениям в пакете ПКМ, и критериальных параметров  $N_i$  и  $W_i$  для мониторинга кинетики накопления повреждений на всех масштабных уровнях и прогноза остаточной прочности изделий, путем сопоставления их текущих значений с пороговыми, регистрируемыми при разрушении материала, применительно к конструкционным сталям.

#### 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись плоские образцы корсетного типа, изготовленные из стали Ст3, толщиной 3 мм. В качестве концентраторов в средней части образцов сверлилось центральное отверстие диаметром  $\emptyset = 5$  мм или выполнялся поперечный сварной шов. Для получения последнего образцы разрезали пополам, по линии разреза делали скосы и с применением автоматической электросварки выполняли двухсторонний шов. Затем для снятия остаточных напряжений на расстоянии 20 мм от сварного шва фрезерованием на глубину 0,5 мм с каждой стороны образца удалялся наружный слой металла, и полученная поверхность полировалась. С целью повышения вероятности зарождения трещины в центре сварного шва в нем выполнялось отверстие диаметром  $\emptyset = 1$  MM.

Испытания образцов проводили на электромеханической установке Shimadzu с максимальным растягивающим усилием 50 кН при автоматическом повышении нагрузки. Для сбора и обработки регистрируемых АЭ данных применялась восьмиканальная система A-Line 32D, выпускаемая ООО «Интерюнис-ИТ» (РФ). Регистрация импульсов АЭ осуществлялась пьезоэлектрическими преобразователями R15а—AST фирмы Mistras (США), а в качестве предусилителей сигналов использовались ПАЭФ-014 производства ООО «Интерюнис-ИТ» (РФ).

Перед проведением испытаний на контрольных образцах, выбранных из каждой партии, выполнялись пробные нагружения при ступенчатом повышении растягивающего усилия, по результатам которого определялись оптимальные настройки АЭ системы, подробное изложение которых приведено в публикации [14]. Исходя из амплитуды шумов на испытательном стенде, регистрируемых при полосе пропускания цифровых фильтров  $\Delta f_{\rm p} = 30{\text -}500~{\rm k}$  Гц, устанавливался уровень порога дискриминации  $u_{th} = 43 \text{ дБ}$ , обеспечивающий дискретную эмиссии в процессе нагружения образцов при скорости актуатора перемещений подвижной траверсы стенда  $V_a \le 2$  мм/мин.

На основании энергетических и темпоральных параметров регистрируемых импульсов АЭ событий определялись границы нижнего, среднего и верхнего кластера в поле дескрипторов  $E_{\rm u}-N_{\rm u}/t_{\rm u}$ . При выбранных значениях  $u_{\rm th}=43~{\rm gF}$  и  $\Delta f_{\rm p}=30$ —500 кГц эти границы составляли:  $E_{\rm u}=70$ —90 дБ,  $N_{\rm u}/t_{\rm u}=10$ —210 кГц для кластера H;  $E_{\rm u}=90$ —110 дБ,  $N_{\rm u}/t_{\rm u}=30$ —180 кГц для кластера C;  $E_{\rm u}>110~{\rm дБ}$ ,  $N_{\rm u}/t_{\rm u}=60$ —150 кГц для кластера B.

#### 3. ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проводимых исследований регистрировалась динамика изменения активности АЭ и весового содержания локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня. Сопоставлялись тренды накопления повреждений и разрушения структуры материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровне для партий образцов с центральным отверстием (ЦО) и поперечным сварным швом (СШ). Сравнивались текущие значения критериальных параметров с пороговыми, регистрируемыми в момент разрушения образцов, что позволяло прогнозировать их остаточную прочность в процессе нагружения.

#### 3.1. Испытания образцов с центральным отверстием

Форма и основные габаритные размеры испытываемых образцов толщиной 3 мм приведены на рис. 1.

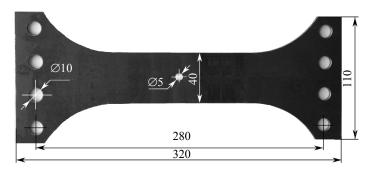


Рис. 1. Форма и габаритные размеры образцов типа ЦО толщиной 3 мм.

В образце ЦО-4 испытываемой партии с целью изучения влияния сторонних помех на динамику накопления АЭ событий и изменение критериальных параметров в процессе повышения нагрузки в канале отверстия после сверления был оставлен заусенец со стружкой, который в процессе нагружения служил источником сигналов трения.

Для локации АЭ событий в процессе мониторинга на поверхность образца на расстоянии 120 мм относительно центрального отверстия с применением металлических струбцин через слой контактной смазки устанавливались преобразователи R15а—SMA. Регистрация АЭ событий осуществлялась синхронно с процессом видеозаписи деформирования образца в области концентратора. Деформация образцов при растяжении измерялась по перемещению штока актуатора подвижной траверсы стенда и контролировалась на начальном этапе деформирования при  $\epsilon_1 \leq 3$  % экстензометром с базой измерения 25 мм.

На рис. 2 показана диаграмма нагружения образца в координатах P— $\varepsilon_1$ , построенная по данным динамометра и актуатора перемещений подвижной траверсы стенда. Разрушение материала в зоне отверстия произошло в период 1250—1282 с испытания при повышении деформации образца до  $\varepsilon_1$  = 20—22 % и падении растягивающей нагрузки от 46,1 до 20 кН.

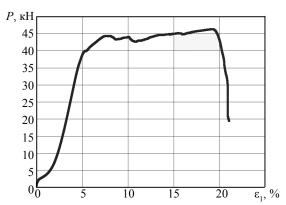


Рис. 2. Диаграмма нагружения образца ЦО-4.

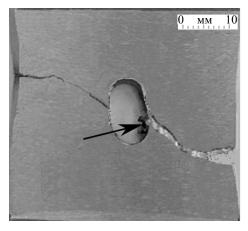


Рис. 3. Вид разрушения образца ЦО-4 в области центрального отверстия; стрелкой (→) показано положение заусенца в канале отверстия.

На рис. 3 приведен вид разрушения образца в области центрального отверстия после электрохимического полирования поверхности металла.

На рис. 4 представлены результаты АЭ диагностики, полученные при испытаниях образца ЦО-4 при испытаниях на разрыв.

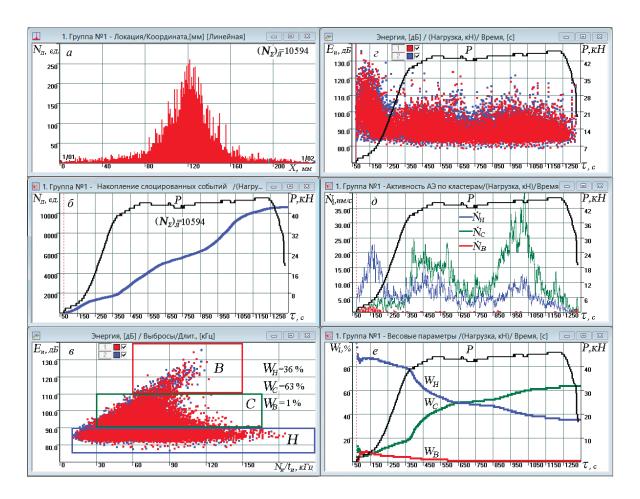


Рис. 4. Результаты АЭ диагностики при испытаниях образца ЦО-4 на разрыв, включающие: координатную локацию АЭ событий (a), их накопление  $(\delta)$ , разделение зарегистрированных сигналов в поле параметров  $E_{\mathfrak{u}} - N_{\mathfrak{u}}/t_{\mathfrak{u}}$  на кластеры H, C, B (a), динамику изменения относительной энергии (c), активности регистрации (d) и весового содержания (e) импульсов АЭ в энергетических кластерах.

На рис. 4a и  $\delta$  приведены результаты координатной локации и накопления АЭ событий  $(N_{\rm n})$ , зарегистрированные при испытаниях образца. Наибольшая плотность индикаций АЭ событий, достигающая 250 ед/мм, отмечалась в зоне центрального отверстия образца. Всего в ходе эксперимента было зарегистрировано  $N_{\rm n}=10594$  событий АЭ, более 90 % из которых отмечалось на расстоянии  $\pm 40$  мм от центра отверстия.

Разделение импульсов АЭ событий на кластеры нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня, сформировавшееся при испытаниях образца на разрыв в поле дескрипторов  $E_{\mu}$ — $N_{\mu}/t_{\mu}$ , по-казано на рис. 4 $\epsilon$ . Индикации сигналов, регистрируемых каналами АЭ системы на графиках 4 $\epsilon$  и  $\epsilon$ , соответствующие первому каналу, отмечены красным маркером, второго — синим.

На рис. 4z—e отражена динамика изменения в процессе нагружения образца параметров относительной энергии  $E_{u}$ , активности регистрации  $N_{i}$  и весового содержания  $W_{i}$  импульсов АЭ событий в энергетических кластерах.

В начальный период упругого деформирования образца в течение 150—200 с эксперимента при повышении уровня нагрузки до P=10 кH (как следует из графиков 4 $\varepsilon$ ,  $\delta$ ) регистрировалась повышенная активность AЭ событий во всех энергетических кластерах. При упругом деформировании конструкционных сталей и сплавов основными источниками AЭ событий являются зоны локальных дефектов и неоднородностей в материале изделий [15]. Таким локальным дефектом в данном случае являлся заусенец со стружкой, оставленный после сверления в канале отверстия. Поэтому в начальный период упругого деформирования образца ЦО-4 в энергетических кластерах отмечалась высокая активность AЭ, достигающая на пике в течение 150—180 с: в нижнем кластере  $\dot{N}_H$  = 23 им/с, в среднем —  $\dot{N}_C$  = 5 им/с, в верхнем —  $\dot{N}_B$  = 3 им/с. При этом весовое содержание импульсов АЭ событий в энергетических кластерах составляло:  $W_H$  = 85 %,  $W_C$  = 7 % и  $W_B$  = 8 %.

По мере деформирования образца влияние заусенца на характер накопления АЭ событий заметно снижалось. Дальнейшее повышение нагрузки сопровождалось резким падением активности АЭ событий в нижнем и верхнем энергетических кластерах и повышением параметра  $N_C$  в среднем кластере. Такое изменение активности АЭ соответствующим образом отразилось на уровне весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах. В течение 150—350 с эксперимента при повышении нагрузки до 35 кН весовое содержание импульсов в кластере C повысилось с 7 до 18 %, а в кластерах H и B соответственно снизилось: для параметра  $W_H$ — с 85 до 78%, а для  $W_R$ — с 8 до 4 %.

В период упругопластического деформирования образца, длившегося в течении 350—500 с испытания образца при повышении уровня нагрузки от 35 до 43 кН отмечалось заметное возрастание активности импульсов АЭ в кластерах H и C. При этом уровень параметра  $\dot{N}_C$  повысился до 20—25 им/с, а уровень параметра  $\dot{N}_H$  — до 10—15 им/с, что соответствующим образом отразилось и на их весовом содержании в энергетических кластерах. К началу пластического деформирования образца уровень параметра  $W_H$  составлял 58 %, параметра  $W_C$  = 40 %, а параметра  $W_B$  = 2 %.

В период пластического деформирования материала, длившегося в течении 500—1250 с эксперимента, при повышении нагрузки от 43 до 46 кН и изменении уровня  $\epsilon_1$  от 7,5 до 19 % наблюдались существенные колебания активности регистрации импульсов АЭ событий в нижнем и среднем энергетических кластерах. Если до 600 с колебания этих параметров были незначительны и сохранялись в пределах:  $\dot{N}_H$  = 6—13 им/с,  $\dot{N}_C$  = 15—23 им/с, то в период 600—650 с нагружения их уровень заметно снизился и в течение 200 с эксперимента до 850 с находился в интервале значений:  $\dot{N}_H$  = 2—7 им/с,  $\dot{N}_C$  = 5—12 им/с. В период 850—1050 с эксперимента, как видно из графика 4 $\dot{O}_T$  отмечался значительный рост активности импульсов в кластерах  $\dot{M}_T$  и  $\dot{M}_T$  и 10 том величина параметра  $\dot{N}_H$  повышалась до 12 им/с, а параметра  $\dot{N}_C$  до 40 им/с. Дальнейшее деформирование образца сопровождалось падением активности АЭ событий во всех энергетических кластерах. В момент разрушения образца на 1282 с эксперимента уровень параметров  $\dot{N}_H$  и  $\dot{N}_C$  имел минимальные значения, не превышающие 2 им/с. Такой характер регистрации АЭ событий обусловлен вязкоупругим деформированием материала в области центрального отверстия, когда амплитуда основного массива генерируемых импульсов не превышала уровня  $u_{th}$  = 43 дБ. В этот период весовое содержание локационных импульсов в энергетических кластерах изменялось незначительно и составляло при потере образцом несущей способности:  $\dot{W}_H$  = 36 %,  $\dot{W}_C$  = 63 % и  $\dot{W}_B$  = 1 %.

#### 3.2. Испытания образцов со сварным швом

Для предотвращения непрерывной эмиссии, регистрируемой в ходе предварительных испытаниях контрольных образцов со сварным швом, было предложено сузить область локации и использовать сторожевые датчики, блокирующие отраженные импульсы и сигналы помех от силовых

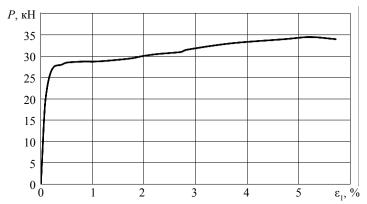


Рис. 5. Диаграмма нагружения образца СШ-1.

захватов нагружающего стенда. Поэтому на расстоянии 45 мм относительно центра сварного шва устанавливались рабочие преобразователи R15a—AST (ПАЭ № 1 и № 2), а на расстоянии 70 мм — сторожевые датчики (ПАЭ № 3 и № 4).

На рис. 5 показана диаграмма нагружения образца СШ-1 в координатах P— $\varepsilon_1$ , построенная по данным динамометра и актуатора перемещений подвижной траверсы стенда.

Хрупкое разрушение образца произошло на 705 с испытания при величине деформации  $\varepsilon_1 = 6,22 \%$  и уровне растягивающего усилия P = 34,7 кH.

Вид разрушения образца СШ-1, произошедшего в зоне термического влияния сварного шва по линии нормального отрыва, показан на рис. 6.

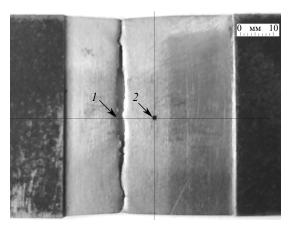


Рис. 6. Разрушение образца СШ-3 в зоне термического влияния сварного шва: I — трещина нормального отрыва; 2 — отверстие в центре сварного шва.

Линия разрушения проходила на расстоянии 7—8 мм относительно отверстия диаметром  $\emptyset = 1$  мм, которое должно было инициировать развитие доминантной трещины в центре сварного піва.

На рис. 7 представлены результаты АЭ диагностики, полученные при испытаниях образца СШ-1 при испытаниях на разрыв, произошедший на 712 с испытания при уровне растягивающей нагрузки  $P_{\rm B}=34,7$  кН и величине деформации  $\epsilon_{\rm B}=6,22$  %. На графиках 7a, 6 приведены результаты координатной локации и накопления АЭ событий ( $N_{\rm H}$ ), зарегистрированные при испытаниях образца. Наибольшая плотность индикаций АЭ событий, составляющая 6—8 ед/мм, отмечалась в зоне сварного шва слева от центрального отверстия на расстоянии 7—10 мм. Всего в процессе испытаний образца на разрушение рабочей группой было зарегистрировано ( $N_{\rm S}$ ) = 103 АЭ событий.

Распределение импульсов АЭ событий в кластерах H, C и B, накопленных в течение испытания образца на разрыв в поле дескрипторов  $E_{\rm u}$ — $N_{\rm u}/t_{\rm u}$ , показано на рис. 7 $\epsilon$ . Если параметр  $W_B$  был близок нулю, то параметр весового содержания импульсов АЭ, накопленных в среднем кластере  $W_C$  = 67% к моменту разрушения образца, в двое превышал параметр  $W_H$  = 33%.

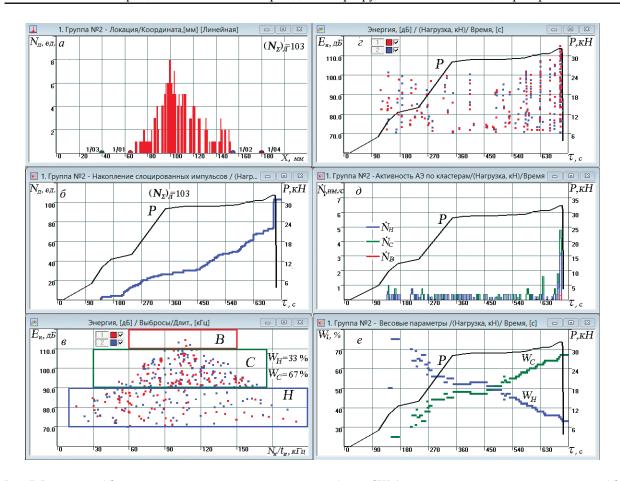


Рис. 7. Результаты АЭ диагностики при испытаниях на разрыв образца СШ-1, включающие: координатную локацию АЭ событий (a), их накопление  $(\delta)$ , разделение зарегистрированных сигналов в поле параметров  $E_{_{\rm II}}$ — $N_{_{\rm II}}/t_{_{\rm II}}$  на кластеры H, C, B (e), динамику изменения относительной энергии  $(\epsilon)$ , активности регистрации  $(\delta)$  и весового содержания (e) импульсов АЭ в энергетических кластерах.

Графики 7e-e отображают динамику изменения в процессе нагружения образца параметров относительной энергии  $E_{\rm u}$ , активности регистрации  $N_i$  и весового содержания  $W_i$  локационных импульсов в энергетических кластерах в процессе эксперимента.

В период упругого деформирования образца при повышении уровня нагрузки до P=15 кH, длившегося практически до 250 с эксперимента, динамика изменения параметров  $\dot{N}_i$  и  $W_i$  была неустойчивой, что характерно для начальной стадии нагружения металлов.

Период упругопластического деформирования образца, длившегося с 250 по 340 с испытания при повышении уровня нагрузки от 15 до 28 кH, отмечался низкой активностью AЭ и стабильным весовым содержанием импульсов AЭ событий в кластерах H и C:  $W_H$  = 60—62 %,  $W_C$  = 38—40 %.

Как следует из графика 7e, в период пластического деформирования образца (340—690 с испытания) при повышении уровня нагрузки от 28 до 34,5 кН наблюдался рост параметра  $W_C$  от 40 до 55 % и соответствующее снижение параметра  $W_H$ с 60 до 45 %. Активность регистрации локационных импульсов в этот период нагружения в кластере C изменялась в пределах  $N_C = 0,5$ —1,5 им/с, а в кластере H не превышала  $N_H = 0,5$  им/с (рис. 7a). В период ускоренного разрушения образца (696—710 с эксперимента), как видно из графика 7a, фиксировался резкий рост активности импульсов в обоих энергетических кластерах: параметр  $N_C$  достигал 5 им/с, а параметр  $N_H = 3$  им/с. При этом какого-либо заметного изменения параметров  $W_H$  и  $W_C$  не происходило (график 7e), что обусловлено относительно коротким периодом разрушения образца (14 с) и инерционностью изменения весовых параметров, вследствие возрастания суммарного влияния накопленных импульсов AЭ событий в ходе испытания ( $N_{\Sigma_1} = 103$  ед.).

На рис. 8 представлены фрагменты микроструктуры стали Ст3 вблизи кромки разрыва образца СШ-3. Исследования микроструктуры металла проводили на продольном шлифе, вырезанном в месте разрыва образца, при увеличении в 500 раз с применением микроскопа Zeiss Observer Z1m по методу светлого поля.

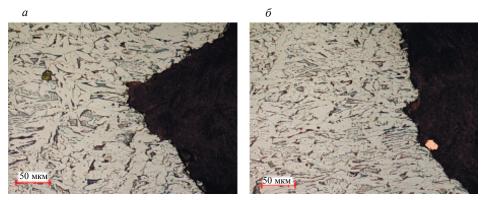


Рис. 8. Фрагменты микроструктуры стали Ст3 (a и  $\delta$ ) в зоне термического влияния сварного соединения вблизи линии разрыва образца СШ-1.

Как видно из фрагментов микроструктуры на рис. 8, вблизи линии разрыва наблюдается градиентная структура металла, характерная для зон термического влияния сварных соединений сталей перлитного класса. В результате такого воздействия в зоне термического влияния сталь Ст3 потеряла пластичность, свойственную основному металлу, и повысилась ее хрупкость.

## 3.3. Результаты АЭ мониторинга и оценка остаточной прочности

Результаты испытания на разрыв партий образцов в количестве шести штук с центральным отверстием (ЦО) и поперечным сварным швом (СШ) из стали Ст3, зарегистрированные в момент их разрушения, приведены в табл. 1 и 2. Таблицы включают: длительность испытания ( $\Delta \tau$ ), предельные значения нагрузки ( $P_B$ ) и деформации ( $\epsilon_B$ ) при разрушении образцов, количество накопленных АЭ событий ( $N_{\Sigma}$ ), весовое содержание импульсов АЭ событий в энергетических кластерах  $W_{H^2}$  и  $W_B$ , а также результаты статистической обработки этих параметров для испытанных партий образцов: среднее выборочное значение ( $\overline{a}$ ), среднее квадратичное отклонение (S) и разброс ( $\eta$ ), определенный в интервале  $\pm 2S$ .

Результаты испытаний на разрыв образцов партии ЦО

Таблица	1		
---------	---	--	--

№	Δτ, c	$P_{\mathit{B}}$ , к $H$	ε <sub>B</sub> , %	$(N_{\scriptscriptstyle \Sigma})_{\scriptscriptstyle \rm J}$ , ед.	$W_{H}$ , %	W <sub>C</sub> , %	W <sub>B</sub> , %
ЦО-1	1163	44,8	19,31	6792	30	70	0
ЦО-2	1085	45,4	19,67	5334	38	62	0
ЦО-3	1196	45,9	20,13	7278	33	67	0
ЦО-4	1212	46,1	21,6	10594	36	63	1
ЦО-5	1178	45,6	19,92	8282	36	64	1
ЦО-6	1293	47,7	22,1	9867	34	65	1
$\overline{a} = \sum a_i/n$	1188	46	20,46	8025	34	65	1
S	43,72	1,08	1,13	1968,7	3,14	3,16	0,55
$\eta = 2S/\overline{a}$ , %	7,36	4,7	11,05	49,6	18,96	9,73	110

Характер разрушения образцов в каждой из испытанных партий незначительно отличался от представленных на рис. 3 и 6. Как следует из табл. 1 и 2, при достаточно низком уровне разброса предельных нагрузок и деформаций, не превышающем в выборках 5—11 %, величина разброса  $\eta_{(N_{\Sigma})}$  накопленных АЭ событий в образцах партий ЦО и СШ достигала 50 и 100 % соответственно. При этом разброс весового содержания локационных импульсов в кластерах H и C был существенно ниже и не превышал в интервале  $\pm 2S$  для параметра  $W_H$  в партиях ЦО и СШ 19 и 21 %, а для параметра  $W_C$ —10 и 11 % соответственно.

Таблица 2

Результаты испытаний на разрыв образцов партии СШ

Nº	Δτ, c	$P_{\scriptscriptstyle B}$ , кН	ε <sub>B</sub> , %	$(N_{\Sigma})_{_{\mathrm{Л}}}$ , ед.	W <sub>H</sub> , %	W <sub>C</sub> , %	W <sub>B</sub> , %
СШ-1	712	34,7	6,22	103	33	67	0
СШ-2	831	35,1	6,24	172	38	62	0
СШ-3	705	34,2	5,72	78	33	67	0
СШ-4	856	36,1	6,78	263	35	65	0
СШ-5	803	35,6	6,32	121	36	64	0
СШ-6	775	34,4	6,18	98	30	70	0
$\overline{a} = \sum a_i/n$	791	35	6,23	139	34	67	0
S	52,62	0,73	0,34	68,5	3,51	3,51	0
$\eta = 2S/\overline{a}$ , %	13,30	4,17	7,38	98,56	20,65	10,80	0

Таблица 3 Результаты статистической обработки параметров  $W_H$  и  $W_C$  при испытаниях на разрыв образцов партии ЦО

(a) /a 9/		$W_H$ , %		W <sub>C</sub> , %			
$(\varepsilon_1)_i/\varepsilon_B^{}$ , %	$(ar{W}_{\!\scriptscriptstyle H}\!)_{\!\scriptscriptstyle { m E}i}$	$S_n$	η <sub>2S</sub> , %	$(ar{W}_{\scriptscriptstyle C})_{\scriptscriptstyle { m E}i}$	$S_n$	η <sub>2S</sub> , %	
10	73	7,61	25,60	24	6,08	49,92	
20	69	6,99	20,25	31	5,50	35,88	
30	63	5,86	18,74	36	5,61	31,46	
40	59	5,24	17,93	41	5,15	25,04	
50	51	6,02	23,77	48	6,05	25,11	
60	49	5,85	23,73	50	5,48	21,91	
70	45	4,04	18,15	55	4,22	15,28	
80	39	2,88	14,87	61	3,37	11,08	
90	37	2,73	14,64	62	3,31	10,65	
100	34	3,27	18,96	65	3,16	9,73	

 ${\rm Ta\, f}_{\rm Л\, H\, H\, G} \ 4$  Результаты статистической обработки параметров  $W_H$  и  $W_C$  при испытаниях на разрыв образцов партии СШ

(a) /a 0/		$W_{_{H}}$ , %		$W_{C}$ %			
$(\varepsilon_1)_i/\varepsilon_B^{}$ , %	$(\stackrel{-}{W_H})_{arepsilon i}$	$S_n$	η <sub>2S</sub> , %	$(\bar{W}_C)_{\epsilon i}$	$S_n$	$\eta_{2S}$ , %	
30	57	6,39	22,42	43	5,78	26,88	
40	55	5,85	21,28	45	4,93	21,93	
50	51	5,83	22,86	48	6,03	25,11	
60	47	5,18	22,04	56	5,67	20,26	
70	41	2,95	14,39	59	3,55	12,05	
80	38	3,51	18,48	63	3,22	10,22	
90	35	3,37	19,24	64	3,41	10,65	
100	34	3,61	21,25	66	4,03	12,22	

В табл. 3 и 4 приведены результаты статистической обработки критериальных параметров  $W_H$  и  $W_C$ , зарегистрированных в области пластического деформирования стали Ст3, при повышении уровня  $(\epsilon_1)_i/\epsilon_B$  от 0,1 до 1,0 для образцов партии ЦО и от 0,3 до 1,0 для образцов партии СШ. Последнее обусловлено тем, что при испытании на разрыв образцов партии СШ в интервале  $(\epsilon_1)_i=(0,1-0,3)\times\epsilon_B$  регистрировалась неустойчивая динамика изменения параметров  $W_H$  и  $W_C$ .

На рис. 9 по данным табл. 3 и 4 построены графики средних выборочных значения параметров  $(\overline{W}_H)_{\varepsilon i}$  и  $(\overline{W}_C)_{\varepsilon i}$  (a, e) и величины их разброса  $\eta_{Wi}(\delta, \varepsilon)$ , посчитанные в интервале  $\pm 2S$ , при повышении уровня пластической деформации в интервале  $(\varepsilon_1)_i = (0, 1-1, 0) \times \varepsilon_R$ .

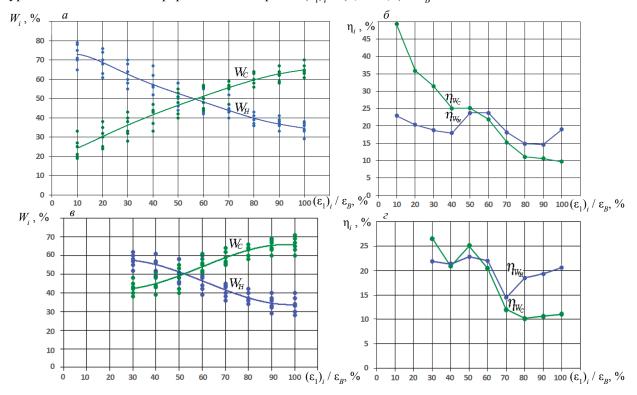


Рис. 9. Сопоставление параметров  $W_H$  и  $W_C$ , зарегистрированных при испытаниях на разрыв образцов партий ЦО (a) и СШ (a), а также величин их разброса  $\eta_{\mathrm{Wi}}$   $(\delta, \epsilon)$ , при изменении уровня пластической деформации в интервале  $(\epsilon_1)_i = (0,1-1,0) \cdot \epsilon_B$ .

Как следует из рис. 9, при увеличении уровня деформации в интервале  $\varepsilon_1 = (0,1-0,5) \times \varepsilon_B$  наиболее информативным является параметр  $W_H$ , средний уровень которого в анализируемых выборках изменялся от 73 до 51 %. При этом величина разброса этого параметра в интервале 2S находилась в пределах  $\eta_W = 20-25$  %.

находилась в пределах  $\eta_{W_H} = 20$ —25 %. В интервале  $\varepsilon_1 = (0,5$ —1,0)  $\times$   $\varepsilon_B$  наиболее информативным является параметр  $W_C$ , среднее выборочное значение которого возрастало от 48 до 65—66 %, а величина разброса снижалась от  $(\eta_{W_C})_{0,5} = 25$  % до  $(\eta_{W_C})_{1,0} = 10$ —12 %.

=25~% до  $(\eta_{W_C})_{1,0}=10$ —12 %. Полученные средние выборочные значения критериальных параметров  $W_H$  и  $W_C$  и уровни их разброса в интервале  $\pm 2S$  согласуются с результатами публикации [14], в которой приведены данные испытания партии образцов из стали 20 на растяжение.

Последовательное применение параметров  $\widehat{W}_H$  и  $W_C$  в указанных интервалах деформирования материала может повысить точность прогноза остаточной прочности образцов и изделий. Сравнивая текущие значения регистрируемых параметров  $W_H$  и  $W_C$  в процессе АЭ мониторинга изделий с графиками изменения средних выборочных значений  $(\overline{W}_H)_{\varepsilon_l}$  и  $(\overline{W}_C)_{\varepsilon_l}$ , можно в режиме реального времени с погрешностью, примерно соответствующей их разбросу  $\eta_{W}$ , осуществлять оценку остаточной прочности в области пластического деформирования материала.

#### 4. ВЫВОДЫ

Результаты испытаний на разрыв образцов из стали Ст3 с концентраторами напряжений в виде центрального отверстия и поперечного сварного шва позволили сделать следующие выводы.

1. Сравнение результатов испытания партий образцов ЦО и СШ показало, что наиболее опасным в случае недостаточной термообработки может быть сварное соединение, не только воздействующее на характер распределения напряжений, но и существенным образом изменяющим структуру материала в зоне термического влияния. Из сопоставления данных табл. 1 и 2 следует,

что среднее выборочное значение предельной деформации  $\overline{\epsilon}_B = 6,23$  %, при которой происходило разрушение образцов в партии СШ, оказалось в 3,5 раза меньше значения  $\overline{\epsilon}_B = 20,46$  %, полученного для образцов партии ЦО.

- 2. Результаты экспериментов при испытаниях на разрыв партий образцов из стали CT3 показали принципиальную возможность использования разработанной для композитных материалов методики и ПО для мониторинга кинетики накопления повреждений в структуре ПКМ, применительно к конструкционным сталям, а также параметров  $W_H$ и  $W_C$  для прогноза в режиме реального времени остаточной прочности образцов на этапе их пластического деформирования.
- 3. Несмотря на различие природы концентраторов, диаграммы деформирования образцов, характера зарождения и развития трещин, количества зарегистрированных АЭ событий и активности акустической эмиссии на этапах деформирования, а также влияния помех трения на процесс накопления повреждений, тренд изменения весового содержания локационных импульсов ( $W_i$ ) в энергетических кластерах в процессе пластического деформирования материала в испытанных партиях образцов в целом совпадал также, как и уровень критериальных параметров  $W_H$  и  $W_C$  в интервале значений ( $\varepsilon_1$ ), = (0,3—1,0)  $\times$   $\varepsilon_R$ .
- 4. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение механизмов кинетики разрушения структуры конструкционных сталей и сплавов на микро, мезо и макромасштабном уровне, и регистрируемых при этом импульсов АЭ, их энергетических и темпоральных параметров, формы и спектра. Это позволит уточнить границы энергетических кластеров и пороговые значения критериальных параметров для более достоверной оценки остаточной прочности диагностируемых изделий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда — проект № 20-19-00769.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Махутов Н.А*. Комплексное исследование процессов разрушения материалов и конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 11. С. 46—51.
- 2. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 5. С. 100—113.
- 3. Li L., Lomov S.V., Yan X., Carvelli V. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites // J. Compos Structures. 2014. V. 116. P. 286—296.
- 4. Ech-Choudany Y., Assarar M., Scida D., Morain-Nicolier F., Bellach B. Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // J. Applied Acoustics. 2017. V. 123. P. 123—132.
- 5. Botvina L.R., Tyutin M.R., Petersen T.B., Levin V.P., Soldatenkov A.P., Prosvirnin D.V. Residual Strength, Microhardness, and Acoustic Properties of Low-Carbon Steel after Cyclic Loading // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2018. V. 47. № 6. P. 516—524.
- 6. Saeedifar Milad, Najafabadi Mehdi Ahmadi, Zarouchas Dimitrios, Toudeshky Hossein Hosseini, Jalalvand Meisam. Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission // Composites Part B. 2018. V. 144. P. 206—219.
- 7. Lin Qing, Bin Wan, Wang Yan, Lu Yunhu, Labuz Joseph F. Unifying acoustic emission and digital imaging observations of quasi-brittle fracture // J. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. V. 103. P. 1—9.
- 8. Abusrea Mahmoud R., Seung-Wook Han, Kazuo Arakawa, Nak-Sam Choi. Bending strength of CFRP laminated adhesive joints fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding // Composites. Part B. 2019. V. 156. P. 8—16.
- 9. Monitoring Method for Active Cracks in Concrete by Acoustic Emission / JCMS-III B5706. Federation of Construction Materials Industries. Japan. 2003. P. 29.
- 10. Masayasu Ohtsu, Toshiro Isoda, Yuichi Tomoda. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures // J. Acoustic Emission. 2007. V. 25. P. 21—32.
- 11. *Iliopoulos Sokratis N., Dzaye Evin, Khattabi Yassir El, Schutter De Geert, Aggelis Dimitrios G.* Continuous AE monitoring of fresh concrete / Progress in acoustic emission XVIII, JSNDI & IIIAE-23. December 5—9, 2016. P. 293—298.
- 12. *Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E.* et al. Criterion Parameters for Assessing Degradation of Composite Materials by Acoustic Emission Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 12. P. 811—819. [*Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Елизаров С.В.* Критериальные параме-

тры для оценки степени деградации композитных материалов при акустико-эмиссионном мониторинге изделий // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 3—11.]

- 13. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.* Исследование кинетики разрушения структурных связей однонаправленного ламината с применением акустикой эмиссии и видеорегистрации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 11. С. 45—61.
- 14. *Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В., Елизаров С.В.* Мониторинг накопления повреждений в кессоне стабилизатора планера МС-21 с применением акустической эмиссии // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 2. С. 118—141.
  - 15. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: «Спектр», 2017. 368 с.
- 16. *Бигус Г.А.*, *Даниев Ю.Ф.*, *Быстрова Н.А.*, *Галкин Д.И*. Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 445 с.
- 17. ИНТЕРЮНИС-ИТ. «А-Line» Руководство пользователя. Версия v181211. М.: ООО «Интерюнис-ИТ», 2018. 265 с.

Дефектоскопия № 1 2021

## ПАКЕТНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ТОРКРЕТ-КАМЕННЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДА

©2021г. Яо Фэй<sup>1,\*</sup>, Цао Иминь<sup>1</sup>, Чен Гуанюй<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет Хохай, Нанкин, Цзянсу, Китай \*E-mail: yaofei215@hhu.edu.cn

Поступила в редакцию 22.02.2020; после доработки 10.08.2020 Принята к публикации 14.08.2020

Изучается качество контакта торкрет-каменных структур с использованием импакт-эхометода (ИЭ) для обнаружения дефектов в торкрет-бетоне толщиной 10 и 20 см. Проведены численные и экспериментальные исследования. Традиционный анализ частотных характеристик может дать только качественную оценку, но не может количественно оценить критичность дефекта на поверхности контакта. Пакетное вейвлет-разложение используется для анализа сигнала с целью получения распределения энергии в каждой полосе частот. После этого рассчитывают относительные собственные значения энергии пакета вейвлета и получают показатель энергетической характеристики торкрет-бетона с различной толщиной и состоянием контакта. Подход к оценке качества границы раздела, основанный на энергии, применялся для количественной оценки качества контакта на поверхности раздела торкрет-каменных структур.

*Ключевые слова*: торкрет-бетон, качество контакта, импакт-эхометод, частотный анализ, пакетное вейвлет-разложение, показатель энергетической характеристики.

**DOI:** 10.31857/S013030822101005X

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Торкрет-бетон является жизненно важным компонентом туннельных конструкций и используется для снятия напряжения горных пород, вызванного выемкой грунта в различных геологических системах и средах. Надежная и эффективная оценка состояния торкрет-бетона является фундаментальным вопросом при строительстве и эксплуатации туннеля, который играет ключевую роль на ранней стадии строительства туннеля и после ввода его в эксплуатацию. Многие факторы могут вызвать проблемы с качеством торкрет-бетона и механическими характеристиками композитной структуры. Торкрет-бетон может отделиться от каменистой основы из-за ее деформации после выемки грунта и усадки торкрет-бетона на начальной стадии отвердевания бетона. Торкрет-бетон не обеспечивает передачу напряжений и защиту самой породы [1—3], когда они разделены. Кроме того, распределение напряжений имеет сложный харатер в слабых окружающих породу разрезах. Отбор керна — это самый примитивный метод контроля для изучения толщины и качества контакта торкрет-бетона, но при отборе керна вызываются необратимые повреждения конструкции, поскольку отбор обычно выполняется в самой конструкции. Однако во время отбора керна качество контакта поверхности торкрет-бетона с породами ухудшается. Следовательно, необходим эффективный метод неразрушающего контроля для оценки качества контакта туннельного торкрет-бетона.

Импакт-эхометод, являющийся эффективным экспериментальным методом неразрушающего контроля, широко используется в области контроля внутренних дефектов бетонных конструкций. М. Sansalone и Y. Lin [4—6] использовали его для экспериментов с дефектами внутреннего отслоения бетонных плит. Н. Azari [7] обнаружил, что эффективность ИЭ ограничена его чувствительностью к размерам и толщине плит. Также некоторые исследования показывают взаимосвязь между законом отражения волны напряжения и самой конструкцией, включая форму моды, размер дефекта, глубину и другие факторы [8,9].

К. Song [10, 11] оценивал качество контакта между торкрет-бетоном и окружающей каменистой породой в туннеле, используя оконное преобразование Фурье импакт-эхометодом; также этот метод можно использовать для обнаружения различных дефектов торкрет-бетона. Однако состояние контакта трудно описать количественно, и невозможно определить различие между различными дефектами. N. Zoidis и Е. Tatsis [12] исследовали пустоты между полом из бетона и нижележащим слоем заполнителя с помощью таких методов неразрушающего контроля, как метод импульсного реагирования и ультразвуковой импульсный метод. А. Garbacz [13] оценивал качество границы раздела при восстановлении железобетона, анализируя импакт-эхосигналы. Д.Г. Аггелис [14] использовал импакт-эхометод во время экспериментов по цементации трещин туннелей и проанализировал параметры эха. После этого был проведен дополнительный анализ для контроля дефек-

тов цементации в проходческих щитах. Было обнаружено, что частотная характеристика дефектов цементации имеет сложный вид из-за большего количества отражающих поверхностей раздела [15]. Импакт-эхометод может использоваться, чтобы обнаруживать дефекты в однослойных бетонных конструкциях и оценивать дефекты в многослойных конструкциях. Однако сложно точно судить о дефектах только на основе частотного анализа, поскольку отраженные волны имеют более сложный характер.

В последнее время для повышения эффективности контроля были применены некоторые передовые методы сбора и анализа данных. В.К. Качанов [16] применил алгоритм «фокусировки на точку» для безэталонного измерения скорости ультразвука при томографии бетонных конструкций. Повышенная точность обеспечивается устранением причины ошибок. Т.В. Фурса [17] доказала, что увеличение коэффициента затухания энергии электрических откликов в усиленном пучке может служить предвестником его надвигающегося катастрофического пробоя. Предложены критерии определения стадий разрушения железобетонных балок по параметрам электрического отклика.

В данной статье импакт-эхометод применяется к торкрет-каменным структурам с различными дефектами границы раздела. Характеристики сигнала в частотном интервале получают с использованием методов частотного преобразования. Кроме того, относительные собственные значения энергии пакета вейвлета получают с помощью анализа энергии пакета вейвлета, который обеспечивает точный показатель оценки для качества контакта границ раздела. Этот новый подход позволяет оценивать качество контакта на основе относительных энергетических характеристик пакета вейвлета по сравнению с традиционной оценкой частотного интервала в импакт-эхометоде.

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Каменные и бетонные материалы используются в этом эксперименте для моделирования торкрет-каменных структур. Между бетоном и камнем были установлены различные дефекты, чтобы имитировать различные условия контакта на границе раздела.

В импакт-эхометоде по сигналу отражения на границе раздела исследуется дифракция и отражение волны напряжения в слоистых структур.

#### 2.1. Материал для исследования

Выбор материала и соотношение смеси торкрет-бетона определяется в соответствии с китайским стандартом «Технические условия по нанесению торкрет-бетона» (JGJ/T 372-2016). Размер частиц заполнителя составляет 5—10 мм, что соответствует требованиям спецификации. Состав торкрет-бетона представлен в табл. 1.

Расход материала на единицу объема торкрет-бетона

Таблица 1

Соотношение воды и цемента	Вода, кг/м³	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Гравий, кг/м <sup>3</sup>
0,50	212	424	882	882

#### 2.2. Образцы

Толщина слоя каменистой породы составляет 20 см, с помощью оборудования для импакт-эхометода проверено, что скорость волны составляет 4100 м/с.

В работе толщина объекта контроля может напрямую влиять на интенсивность частоты отражения и на отражение волны напряжения на границе раздела. Поэтому были изготовлены два образца с различной толщиной торкрет-бетона. ТК-10 и ТК-20 обозначают торкрет-каменные структуры толщиной 10 и 20 см.

В работе для имитации наличия дефектов используются полиэтиленовые пенопластовые блоки. Состояние контакта на границе раздела описывается следующими тремя типами: дефект, отсутствие дефекта и отслоение, которые дальше условно обозначаются: Д, ОД и ОТС соответственно. Самая большая разница между ОТС и двумя другими типами состоит в том, что ОТС имеет частичную связь между бетоном и камнем, что похоже на соты. При частичном соединении

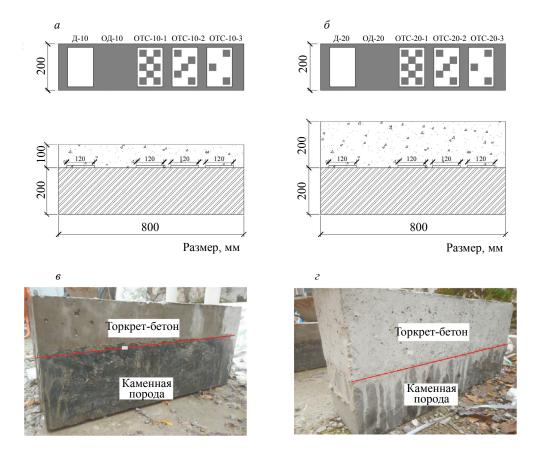


Рис. 1. Образцы: схематическая диаграмма ТК-10 (*a*); схематическая диаграмма ТК-20 (*δ*); реальная схема ТК-10 (*в*); реальная схема ТК-20 (*ε*).

состояние контакта на границе определяется площадью отверстий в пенопласте. Когда зона выемки в пенопласте уменьшается, с породой контактирует меньше бетона, поэтому состояние контакта меняется с хорошего на плохое. Состояния контакта нумеруются как: ОТС-1, ОТС-2, ОТС-3 с уменьшением зона выемки. Полиэтиленовый пенопластовый блок сцепляется с каменной породой с помощью клея, чтобы обеспечить фиксацию на поверхности раздела между слоем породы и бетоном, не двигаясь во время процесса вибрации. После затвердевания положение пенопласта можно хорошо зафиксировать. Схематическая диаграмма и реальная схема всех контролируемых структур показаны на рис. 1, где белые области представляют собой пенопласт.

На рис. 1a и a толщина слоя бетона в образце TK-10 составляет 10 см, а на рис. 1b и a толщина слоя бетона в TK-20 составляет 20 см. Каждый образец имеет 5 различных состояний контакта, которые были перечислены выше, а расположение и типы дефектов образцов точно такие же, как и у предыдущих образцов. Весь пенопласт имеет размеры 1b см x 12 см, что соответствует требованиям по минимальному размеру дефекта при различных значениях толщины в этом исследовании. Процент ОТС указывает на отношение зоны выемки пенопластовом блоке к общей площади блока. Эти зоны контроля пронумерованы в соответствии с толщиной бетонного слоя и состоянием контакта, как показано в табл. 2.

Скорость волны в бетоне зарезервированного образца была измерена, составила 3957 м / с. Акустический импеданс бетона и каменной породы показан в табл. 3.

## 2.3. Метод исследования и оборудование

В этой статье для контроля дефектов используется импакт-эходетектор SET-PI2-01 производства Hunan Sine Electronic Technology Co., Ltd. Частота составляет 4—15 к $\Gamma$ ц, а частота дискретизации установлена на уровне125 к $\Gamma$ ц. Была задана длительность импульса в 128 мкс и усиление в 62 дБ. Частота выборки составляет 8 мкс, всего 1024 точки данных, а период опроса составляет примерно 8 мс.

Таблица 2 Конструкции образцов для лабораторных экспериментов

Образец	Состояние контакта	Размер дефекта, см	Толщина торкрет-бетона, см
Д-10	Дефект	15×12	10
ОД-10	Без дефекта	_	10
OTC-10-1	50 % — отслоение	15×12	10
OTC -10-2	69 % — отслоение	15×12	10
OTC -10-3	82 % — отслоение	15×12	10
Д-20	Дефект	15×12	20
ОД-20	Без дефекта	_	20
OTC -20-1	50 % — отслоение	15×12	20
OTC -20-2	69 % — отслоение	15×12	20
OTC -20-3	82 % — отслоение	15×12	20

Акустический импеданс бетона и камня

Материал	Скорость волны $V_p$ , м/с	Плотность $\rho$ , $\kappa \Gamma/m^3$	Акустический импеданс $Z$ , кг/м·с <sup>2</sup>	Коэффициент отражения
Бетон	3957	2350	9,3E+06	0.12
Камень	4560	2650	12,6E+06	0,13

Импакт-эхометод не требует контактной жидкости и может осуществлять односторонний контроль по сравнению с ультразвуковым методом. После того, как импактор сгенерирует кратковременное возбуждение, упругая волна начинает распространяться внутри торкрет-структуре. Когда упругая волна встречает внутренний дефект конструкции или ее границы, происходит ее отражение из-за различных акустических импедансов граничащих сред. Датчик, расположенный рядом с источником возбуждения, принимает отраженную упругую волну и регистрирует сигнал вибрации в точке приема. Принятые переменные сигналы, которые включают время распространения и амплитуду волны, отображаются на осциллограф, и визуально может быть получен предварительный результат контроля. Более подробные результаты можно получить, если применить анализ частотно-временной области. Принципиальная схема при контроле торкрет-каменных структур импакт-эхометодом показана на рис. 2.

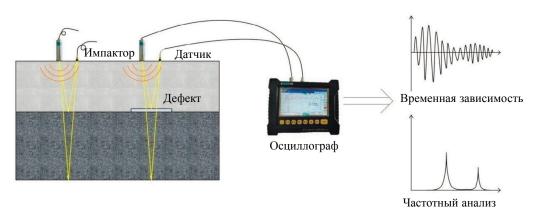


Рис. 2. Принцип метода для контроля торкрет-каменных структур импакт-эхометодом.

В этой статье источник и приемник находятся на расстоянии 3—5 см, поэтому получаемый сигнал может лучше отразить процесс распространения продольной волны, которая не подвергается слишком сильному влиянию поверхностной волны.

Таблица 3

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### 3.1. Анализ частотных характеристик ТК-20

В ходе эксперимента было проведено 50 измерений в каждой области каждого образца, и энергетический спектр каждый контрольной точки рассчитан при различных условиях эксплуатации. В этой статье контролируемая конструкция ТК-20 используется как типичный пример для лучшего понимания. На рис. 3a,  $\delta$  кривые изменения ускорение—время измерены в местах с дефектами и без дефектов. Временные сигналы преобразуются в сигналы частотной области с помощью преобразования Фурье (ФП) на рис. 3e,  $\epsilon$ , поэтому различные частотные характеристики могут быть получены из диаграмм частотной области.

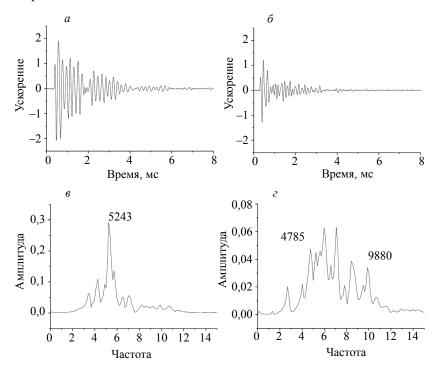


Рис. 3. Диаграммы частотной области для ТК-20: формы сигналов во временной области для ОД-20 (a); формы сигналов во временной области для Д-20 ( $\delta$ ); АХЧ для ОД-20 ( $\epsilon$ ); АХЧ для Д-20 ( $\epsilon$ ).

Согласно теории импакт-эхометода [18], коэффициент отражения на границе раздела равен  $R_1 = 0.13$ , что указывает на то, что большая часть энергии может продолжать распространяться вниз через границу раздела бетон—камень во время прохождения упругой волны. Частоту резонанса, соответствующего толщине плиты (T-частота), можно получить из уравнения (1) и уравнения (2) с коэффициентом формы 0,96:

$$f_{T1} = \frac{\beta C_{P1}}{2T_1},\tag{1}$$

$$f_{T2} = \frac{1}{\frac{2T_1}{\beta C_{P1}}} + \frac{2T_2}{\beta C_{P2}},\tag{2}$$

где  $f_{T1}$  и  $f_{T2}$  — T-частота торкрет-бетона и камня;  $\beta$  — коэффициент формы, который зависит от коэффициента Пуассона ( $\mu$ );  $T_1$ ,  $C_{P1}$ ,  $T_2$ ,  $C_{P2}$  — скорость продольной волны и толщина торкрет-бетона и камня соответственно;  $\Delta t$  — интервал дискретизации сигнала.

На рис. 36 на диаграмме частотной области для ОД-20 есть только один пик частоты, равный 5243 Гц. Расчетная T-частота в нижней части камня составляет 5110 Гц, что близко к пику на рисунке. Расчетная T-частота на границе слоя торкрет-бетон составляет 10,22 кГц, что не соответ-

ствует рисунку. Это приемлемо, поскольку значения акустического импеданса бетона и камня схожи, что приводит к слабым отражениям на границе раздела.

На рис. 3г несколько частотных пиков появляются на диаграмме частотной области, и имеет место нечеткое распределение пиков в частотном диапазоне 4—10 кГц для случая Д-20. Самый высокий пик при частоте 9880 Гц соответствует расчетной Т-частота на нижней поверхности каменной породы, а положение исходного пика может быть уменьшено до 4700 Гц. Возникает много пиков, и трудно найти соответствующие частотные характеристики этих пиков. Это указывает на то, что при наличии дефекта при распространении упругой волны могут возникать помехи, которые приводят к дифракции и другим физическим явлениям, включая изменение пути распространения и явления множественных пиков. Таким образом, трудно выделить основную частоту только через частотную диаграмму, и причина ее появления требует дальнейшего анализа с использованием теории Лэмба [19].

#### 3.2. Частотный анализ ОТС-20

Быстрое фурье-преобразование (БФП) также было выполнено для импакт-эхосигналов, полученных с ОТС-20-1, ОТС-20-2 и ОТС-20-3 для получения спектрограммы частотной области.

На рис. 4 частота  $6100~\Gamma$ ц найдена независимо от качества границы раздела бетон—камень для ОТС-состояния и обнаружено, что эта частота не имеет соответствующих частотных характеристик. Существует пик частоты около  $5000~\Gamma$ ц, где частота соответствует распространению упругой волны по скальному грунту и образованию отражения. На рис. 4a есть несколько высокочастотных компонентов, которые трудно распознать. На рис.  $4\delta$  частота отражения от нижней части скалы все еще доминирует в ОТС-20-2, но доля высоких частот увеличивается. На рис.  $4\epsilon$  присутствует еще больше высокочастотных пиков, и спектрограмма выглядит более запутанной. Распределение частоты показывает характеристики в спектрограмме частотной области, аналогичные  $\mathcal{L}$ -20.

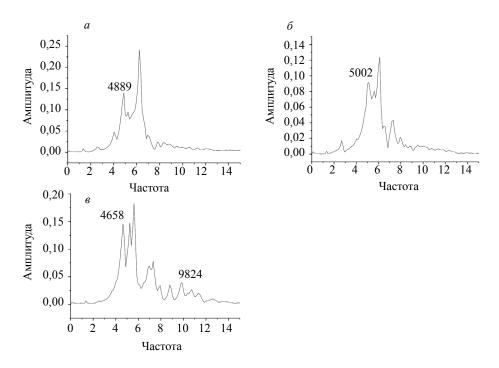


Рис. 4. Спектрограммы ОТС: АХЧ для ОТС-20-1 (a); АХЧ для ОТС-20-2 (б); АХЧ для ОТС-20-3 (в).

Другой образец под названием ТК-10 показывает ту же картину. При наличии дефектов на границе раздела частотное распределение постепенно усложняется. Можно видеть, что хотя традиционное преобразование БФП позволяет делать некоторые выводы, оно имеет много недостатков. Во-первых, граничный эффект вызывает большое количество частотных пиков, и трудно определить, есть ли дефекты в контролируемом участке. Во-вторых, БФП может дать только каче-

ственную приблизительную оценку и не может предоставить количественный показатель качества контакта на границе раздела. Поэтому для улучшения анализа будет использован метод пакетного вейвлет-разложения.

#### 4. ПАКЕТНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

### 4.1. Пакетное вейвлет-разложение

При пакетном вейвлет-разложении используется ортогональное разложение, и каждый сигнал полосы частот является независимым и без ошибок. Теория частотного анализа пакета вейвлета основана на теореме Парсеваля (интегральном уравнении Парсеваля). Энергия во временной области — это L2-норма сигнала и энергии на j-уровне разложения:

$$E_{j} = \sum_{i=1}^{2^{j}} E_{j}^{i}, \tag{3}$$

где  $E_j^i$  означает L2-норму вейвлет-коэффициентов каждого узла при j-уровне разложения, E — энергия волного пакета. Энергия каждого субсигнала может формировать вектор энергии  $E = \begin{bmatrix} E_1 E_2 ... E_i \end{bmatrix}$ . Таким образом, с помощью пакета вейвлета-сигнал можно разложить в векторстолбец из  $2^j$ -элементов векторов.

Полная энергия сигнала представляет собой сумму энергии субсигнала в различных частотных диапазонах, а информация о повреждениях структуры содержится в энергиях узлов субсигналов в распределении энергии. Он отражает различные характеристики повреждений и требует независимой количественной оценки для точного обнаружения повреждений.

После того, как энергия неповрежденного и поврежденного узла субсигнала вычислена с помощью сигнала разложения пакета вейвлета, величина изменения энергетического спектра суммируется по уравнению:

$$\Delta E_{j} = \frac{E_{j}^{DE}}{\sum_{j=1}^{2^{p}} E_{j}^{DE}} - \frac{E_{j}^{ND}}{\sum_{j=1}^{2^{p}} E_{j}^{ND}},$$
(4)

$$\Delta E = \sum_{j=1}^{2^{P}} \Delta E_{j}, \tag{5}$$

где  $\Delta E$  — относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета; показатели степени Д и ОД обозначают дефект и без дефекта; индекс p обозначает количество узлов вейвлет-пакета на j-уровне разложения;  $\Delta E_j$  — вычисленное значение в начале каждого узла пакетного вейвлет-разложения и их сумма —  $\Delta E$ . В этом уравнении, энергия пакета вейвлета в контрольной точке на ОД-участке используется как контрольная группа (при этом, является константой) и экспериментальная группа, включающая точки на участках Д, ОТС и ОД непосредственно, при необходимости может быть изменена.

Изменение энергетического спектра каждого узла добавляется, чтобы получить окончательную относительную энергетическую характеристику как значения относительной энергетической характеристики вейвлет-пакета ( $\Delta E$ ), которые можно вычислить.  $\Delta E$  используется для идентификации повреждений и в качестве справочного материала для анализа повреждений, чтобы определить место повреждения. Кроме того, результат может быть более точным, поскольку подобное влияние граничных условий каждой контрольной точки устраняется вычитанием. Связь между индексом признака и дефектом получается путем сравнения показателей признаков разной степени повреждения.

Пакетному вейвлет-преобразованию уделяется больше внимания в подшипниках, машиностроении и обработке металлов [22]. В последние годы он также широко используется в инженерной дефектоскопии, особенно в традиционных деревянных конструкциях и бетонных балках. Временные зависимости, полученные акустическим методом (импактором является ударная сила или акустическая волна), могут показать больше информации о повреждениях после пакетного вейвлет-разложения [23]. Кроме того, результаты пакетного вейвлет-разложения могут быть использованы в качестве эффективного стандарта оценки для искусственных нейронных сетей.

## 4.2. Распределение частотного диапазона экспериментальных результатов

В этой статье для разложения сигнала выбран вейвлет Добеши 5 (вейвлет db5). Уровень пакетного вейвлет-разложения равен 6, так что получается 64 частотных диапазона, что означает, что размерность вектора признаков каждой выборки равна 64. Было обнаружено, что энергия первых 20 полос составляет более 99 % от общей энергия и остальные 44 полосы оказывают незначительное влияние на оценку. Следовательно, спектрограмма распределения частотных диапазонов включает только первые 20 порядков на рис. 5.

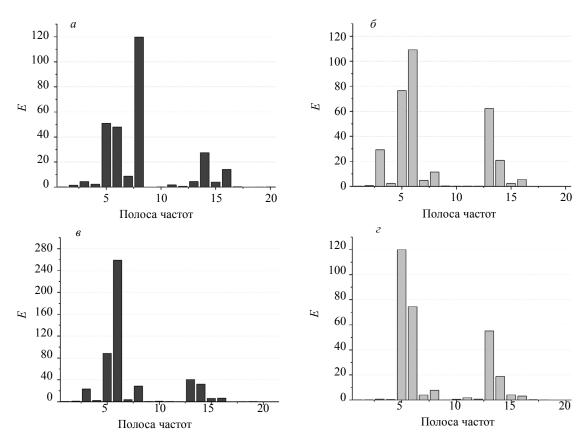


Рис. 5. Распределение энергии по полосам частот пакета вейвлета: ОД-10 (a); Д-10 (б); ОД-20 (в); Д-20 (г).

Типичное распределение полос частот показывает, что энергия каждой полосы различается в зависимости от состояния контакта. На рис. 5a пик на 8-й полосе означает, что энергия, в основном, концентрируется в относительно низкочастотной области, где состояние контакта наилучшее. Исходный пик перемещается в 6-ю полосу на рис. 5a, а высокочастотная часть увеличивается по сравнению с таковой в ОД-10. На рис. 5a большая часть энергии сосредоточена в полосе 6 и очень мало энергии приходится на высокие частоты. Однако на рис. 5a можно увидеть, что исходный пик перемещается в 5a-ю полосу, а высокочастотные полосы значительно увеличиваются при ухудшении качества контактана границе раздела.

В общем, распределение полос частот резко различается между дефектной и бездефектной структурами, но между бездефектными структурами разница невелика. Если количественно оценить это различие с помощью метода, описанного в разделе 4.1, можно получить показатель качества контакта торкрет-каменных структур.

#### 4.3. Пакетный вейвлет-анализ результатов численного моделирования

Принцип пакетного вейвлет-разложения состоит в следующем. Определяется распределение энергии, который содержит информацию о повреждении структуры, а после пакетного вейвлет-разложения импакт-эхосигналов с дефектом или без него учитывается дополнительный вклад в энергию

узла. Можно рассчитать характерные значения энергии вейвлет-пакета ( $\Delta E$ ). На основании различия определяется факт наличия или отсутствия дефектов и затем определяется место повреждения.

Программное обеспечение MSC.MARC, реализующее метод конечных элементов, используется для создания численной модели торкрет-каменной (ТК) структуры. Толщина слоев торкретбетона в ТК-структуре составляет 10, 15, 20 и 25 см. Для каждой толщины было пять состояний: ОД, Д, ОТС-1, ОТС-2 и ОТС-3. Относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета может служить мерой качества контакта, поскольку частотное распределение импакт-эхосигналов изменяется при различных состояниях контакта. Относительная энергия вейвлет-пакета для каждой полосы частот у экспериментальных образцов вычитается из относительной энергии на соответствующей позиции частоты у контрольной группы, чтобы получить относительные собственные значения энергии согласно уравнению (4). Графики характеристической энергии каждого участка показаны на рис. 6.

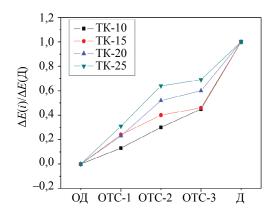


Рис. 6. Нормированные относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов.

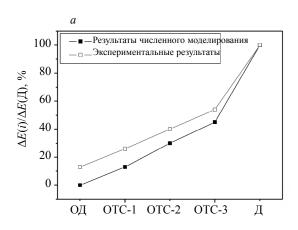
На рис. 6 энергия вейвлет-пакета получена из результатов численного моделирования и получены относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов при различных условиях эксплуатации. В местах ОД все собственные значения равны нулю, поскольку расчет основан на том, что энергия вейвлет-пакета в бездефектном месте принята в качестве опорного значения. Результаты численного моделирования пронормированы, чтобы уменьшить разницу между относительными собственными значениями энергии вейвлет-пакетов при различной толщине бетона. Конкретный метод нормализации состоит в том, чтобы вычислить процентное отношение характеристического значения каждой области измерения к характеристическому значению области Д. Тенденции изменений идентичны, и ухудшение качества контакта будет увеличиваться, если доля относительных собственных значений энергии вейвлет-пакета, то есть значение  $\Delta E(i)/\Delta E(\Pi)$ , увеличивается. Характерная частотная энергия вейвлет-пакета для трех степеней дефекта ОТС-1, ОТС-2 и ОТС-3 нелинейно возрастает. Кроме того, различная толщина торкрет-бетона влияет на относительное собственное значение энергии вейвлет-пакета.

Следовательно, сигнал частотной области может быть качественно определен в соответствии со временем, когда частота появляется на частотной диаграмме ОТС-состоянии. Он также может быть дополнительно определено путем вычисления относительного собственные значения энергии вейвлет-пакета для оценки качества контакта.

## 4.4. Пакетный вейвлет-анализ экспериментальных результатов

Пакетное вейвлет-разложение проводится для сигнала каждого участка, и вычисляется энергия вейвлет-пакета (E). Определяется средняя энергия каждой частотной полосы в 50 точках измерения в участках ОД, результат обозначается как СРЕД. Вычисляется разница между энергией каждой полосы частот во всех участках измерения и энергией СРЕД, а затем эта разница используется для получения относительных собственных значений энергии. При многоточечном контроле относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов усредняются, чтобы окончательно получить значения энергетического спектра при всех условиях эксплуатации после того, как будут удалены точки данных с большими ошибками. Линии характеристического значения показаны на рис. 7.

На рис. 7 результаты численного моделирования и экспериментальные значения относительных собственных значений энергии вейвлет-пакета ТК-10 и ТК-20 показывают, что относительное собственное значение энергии вейвлет-пакета увеличивается и становится нелинейным, когда качество контакта на границе раздела в ТК-структуре ухудшается. Относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета Д использовались в качестве опорных значений, которые были нормированы для получения процентной доли каждой контактной массы.



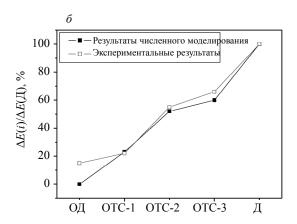
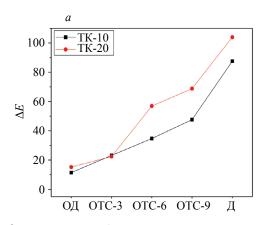


Рис. 7. Собственные значения относительной энергии вейвлет-пакетов результатов численного моделирования и экспериментов: TK-10 (a); TK-20 ( $\delta$ ).

На рис. 7a формы линий после нормировки очень похожи, хотя относительные собственные значения энергии результатов численного моделирования и экспериментальных результатов различаются. При численном моделировании характеристические энергетические спектры ОД и различных ОТС нормированы на 0; 0,13; 0,30 и 0,46. Экспериментальные характеристические энергетические спектры ОД и различных ОТС нормированы на 0,13; 0,26; 0,40 и 0,54. Результаты численного моделирования относительных собственных значений энергии вейвлет-пакета ТК-10 меньше экспериментальных значений, потому что бетон представляет собой сложный многонаправленный композит, а результаты измерений не так стабильны, как результаты, полученные с помощью конечно-элементного моделирования. Рис. 76 показывает ту же картину. Собственные значения численного моделирования и эксперимента очень близки, за исключением области ОД. Каждый раз наблюдается различие в импакт-эхосигналах, что приводит к разным результатам на одном и том же участке. Следовательно, в этом случае, характеристический энергетический спектр не равен нулю для бездефектной области. Выше показано, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными результатами, и как численное моделирование, так и экспериментальные значения показывают, что относительное собственное значение энергии вейвлет-пакета увеличивается с ухудшением качества контакта. Собственные значения вейвлет-пакетов экспериментальных результатов в ТК-10 и ТК-20 показаны на рис. 8.



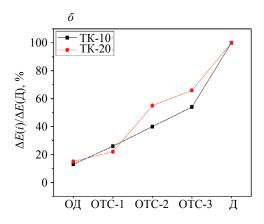


Рис. 8. Относительные собственные значения энергии вейвлет-пакетов: экспериментальные результаты (a); нормированные экспериментальные результаты  $(\delta)$ .

На рис. 8*а* относительные собственные значения энергии вейвлет-пакета в областях Д и ОТС увеличивается с увеличением толщины бетона, поскольку увеличение толщины бетона приводит к большой разнице в распределении энергии в полосах частот. Из рис. 8*б* видно, что, хотя собственные значения энергии для каждой области измерения колеблются, нормированные значения для области ОД меньше 15 %, а для области ОТС и области Д — более 20 %. Это показывает, что метод расчета собственных значений эффективно различает эти участки контроля. Этот метод анализа не требует определения наличия или отсутствия дефектов путем идентификации пиков. Ориентируясь на рис. 8*а*, можно предложить следующий показатель: рассмотреть индекс выше собственного значения области ОД, ниже собственного значения области Д, рядом с собственным значением ОТС-1 и определить его как показатель подозреваемого дефекта. Когда собственные значения энергии больше этого индекса, это указывает на то, что контролируемая торкрет-каменная структура может содержать дефекты, и эксперименты по определению механических свойств, проведенные позже, могут иметь некоторые ошибки. Как и в этом эксперименте, его можно принять равным 15. Конкретное значение индекса должно быть связано с уровнем энергии источника воздействия, что требует дальнейшего исследования в более поздних исследованиях.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье было изучено качество контакта на границе контролируемой структуры из торкрет-бетона и каменистой породы с использованием импакт-эхометода. Можно сделать следующие выводы.

Результаты численных и натурных экспериментов показывают, что наличие дефектов может быть определено по главной частоте на границе раздела каменной породы и торкрет-бетона посредством анализа в частотной области. Однако количественно определить состояние дефектов на границе раздела невозможно.

После пакетного вейвлет-разложения получается спектр энергии частот. Когда качество контакта ухудшается, исходный пик смещается в сторону более низкой частоты. С другой стороны, высокочастотная часть увеличивается и даже приближается к исходному пику. Распределение частотных диапазонов резко различается между дефектной структурой и бездефектной структурой, но между бездефектными структурами эта разница небольшая.

Качество контакта может быть количественно определено по относительным собственным значениям энергии вейвлет-пакета при различной толщине торкрет-бетона. Относительное собственное значение энергии постепенно увеличивается, когда состояние контакта ухудшается. Хотя собственные значения энергии каждой области измерения колеблются, существует интервал между собственными значениями области ОД и собственными значениями других областей. Торкрет-каменные структуры с различным качеством контакта можно оценивать количественно, задавая показатель для интервала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исследование было финансово поддержано Фондами фундаментальных исследований Центральных университетов (№ гранта B200202086).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Graziani A., Boldini D., Ribacchi R.* Practical Estimate of Deformations and Stress Relief Factors for Deep Tunnels Supported by Shotcrete // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2005. V. 38. No. 5. P. 345—372.
- 2. Lee S., Kim D., Ryu J. An experimental study on the durability of high performance shotcrete for permanent tunnel support // Tunnelling & Underground Space Technology. 2006. V. 21. No. 3—4. P. 431—431.
- 3. Jiang C., Fan K., Wu F., Chen D. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete // Materials & Design. 2014. V. 58. No. 6. P. 187—193.
- 4. Sansalone M., Carino N.J. Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impact-echo method // ACI Materials Journal. 1989. V. 86. No. 2. P. 175—184.
- 5. Cheng C., Sansalone M. The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies // Materials and Structures. 1993. V. 26. No. 5. P. 74—285.
- 6. *Lin Y., Sansalone M., Carino N.J.* Finite element studies of the impact-echo response of plates containing thin layers and voids // Journal of Nondestructive Evaluation. 1990. V. 9. No. 1. P. 27—47.
- 7. Azari H., Nazarian S., Yuan D. Assessing Sensitivity of Impact Echo and Ultrasonic Surface Waves Methods for Quality Assessment of Concrete Structures / Proceedings of the 93rd Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington, DC, USA, January 2014.

- 8. Wang J.J., Chang T.P., Chen B.T., Lin H.C. Evaluation of Resonant Frequencies of Solid Circular Rods with Impact-Echo Method // Journal of Nondestructive Evaluation. 2010. V. 29. No. 2. P. 111—121.
- 9. *Lee I., Kwon S. H., Park J., Oh T.* The effective near-surface defect identification by dynamic behavior associated with both impact-echo and flexural modes for concrete structures // KSCE Journal of Civil Engineering. 2017. No.1. P. 1—9.
- 10. Song K.I., Cho G.C. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method // NDT & E International. 2009. V. 42. No. 6. P. 487—500.
- 11. Song K.I., Cho G.C. Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the Impact-Echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform // International Journal of Rock Mechancis and Mining Sciences. 2010. V. 47. No. 8. P. 1274—1288.
- Mechancis and Mining Sciences. 2010. V. 47. No. 8. P. 1274—1288.

  12. Zoidis N., Tatsis E., Vlachopoulos C., Gotzamanis A., Clausen J.S., Aggelis D.G., Matikas T.E. Inspection, evaluation and repair monitoring of cracked concrete floor using NDT methods // Construction and Building Materials. 2013. V. 48. No. 11. P. 1302—1308.
- 13. *Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., Kwasniewski L.* On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis // Construction and Building Materials. 2017. V. 134. No. 3. P. 311—323.
- 14. Aggelis D.G., Shiotani T., Kasai K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo // Tunnelling and Underground Space Technology. 2008. V. 23. No. 6. P. 629—637.
- 15. Yao F., Chen G. Y. Time-Frequency Analysis of Impact Echo Signals of Grouting Defects in Tunnels // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 581—595.
- 16. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kontsov R.V., Timofeev D.V. Using «focusing to a point» algorithm for reference-free measurement of the speed of ultrasound in tomography of concrete engineering structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 6. P. 443—452.
- 17. Fursa T.V., Petrov M.V., Dann D.D. A method for evaluating failure in reinforced concrete under bending based on the response of electrical parameters to an impact action // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 7. P. 519—527.
- 18. *Hsiao C., Cheng C.C., Liou T., Juang Y.* Detecting flaws in concrete structures using the impact-echo method // NDT & E International. 2008. V. 41. No. 2. P. 98—107.
- 19. Gibson A., Popovics J.S. Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis // Journal of Engineering Mechanics. 2005. V. 131. No. 4. P. 438—443.
- 20. *Epasto G., Proverbio E., Venturi V.* Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method // Materials and Structures. 2010. V. 43. No. 1—2. P. 235.
- 21. Qu H., Li M., Chen G., Sneed L.H. Multi-bandwidth wavelet transform of impact echo signals for delamination detection of thin concrete slabs // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2016. V. 6. No. 4. P. 1—16.
- 22. *Pino G., Ribas J.R., Guimarães L.F.* Bearing Diagnostics of Hydro Power Plants Using Wavelet Packet Transform and a Hidden Markov Model with Orbit Curves // Shock and Vibration. 2018.
- 23. Fei C., Han Z., Dong J. An ultrasonic flaw-classification system with wavelet-packet decomposition, a mutative scale chaotic genetic algorithm, and a support vector machine and its application to petroleum-transporting pipelines // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2006. V. 42. No. 3. P. 190—197.

Дефектоскопия № 1 2021

УДК 620.179.111.3

## СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПИТКИ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

© 2021 г. В.Е. Поляков<sup>1,\*</sup>, А.А. Закутаев<sup>1,\*\*</sup>, А.А. Михайлов<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Россия 197198 Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13 E-mail: \*polyakov1939@mail.ru, \*\*lol.ichi@yandex.ru, \*\*\*zakutaev.a@mail.ru

Поступила в редакцию 01.07.2020; после доработки 04.10.2020 Принята к публикации 02.11.2020

В статье предложен фотометрический способ активного контроля глубины пропитки пористых оболочек объектов контроля (летательных аппаратов), движущихся со сверхвысокими (до 10 «махов») скоростями и способных к резкому изменению траектории полета. Предлагаемый способ активного контроля глубины пропитки пористых оболочек по измерению и анализу интенсивности люминесценции окрашенной границы пропитки, а также устройство для контроля глубины пропитки позволяют обеспечить высокую степень устойчивости оболочки объекта к механическим воздействиям. Новизна предлагаемого технического решения заключается в следующем: в растворенный ацетоном олигомер дополнительно вводят трифенилметановый органический краситель, чем обеспечивают контакт пропитывающего вещества с внутренней поверхностью оболочки объекта. Кроме того, в процессе пропитки оболочку объекта облучают пучком света от лазера с наружной поверхности и регистрируют изменение интенсивности люминесценции окрашенного олигомера в зависимости от глубины пропитки.

*Ключевые слова*: капиллярный эффект, пористый обтекатель, глубина пропитки, олигомер, лазер, фотоиндуцированная люминесценция.

**DOI:** 10.31857/S0130308221010061

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в различных отраслях техники широко используются такие конструкционные крупноструктурные и композиционные материалы, как бетон, горные породы, огнеупоры, пористые и пеноматериалы, стеклопластики, углепластики и боропластики. Значительное место в производстве изделий в машиностроении, судостроении, строительстве, авиакосмической и военной технике занимают такие пористые материалы, как пористые металлы (пористый алюминий) и пористые диэлектрики (пористая керамика). Основным материалом головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов радиолокационного наведения является кварцевая и алюмосиликатная керамика, стеклокерамика литийалюмосиликатного состава и термостойкие стеклокристаллические материалы. Более высокие рабочие температуры имеют керамические материалы на основе нитридов и оксидов. Оксидная керамика (оксиды алюминия и магния) позволяет изготавливать высокотемпературные обтекатели антенн и радиопрозрачные окна высокоскоростных летательных аппаратов [1].

Одним из эффективных способов получения новых композиционных материалов с заранее заданными свойствами является способ пропитки пористых материалов (технологический процесс заполнения взаимосвязанных пор пористого материала жидкими препаратами) [2]. Для капиллярной пропитки используются фенолоформальдегидные и циклоалифатические смолы, которые проникают в поры в зависимости от плотности пропитывающего вещества, от пористости керамики, толщины оболочки и числа циклов разряжение—давление [3, 4].

Высокие скорости и высокая маневренность летательных аппаратов предъявляют к обтекателю жесткие требования к изгибной прочности, что достигается последующей полимеризацией жидких олигомеров в порах керамики. Пропитка обтекателя по всей толщине изделия мелкодисперсными металлами или смолами приводит к увеличению изгибной прочности и к уменьшению радиопрозрачности для радиолокационных систем, расположенных внутри обтекателя [5]. Возникает задача обеспечения сложного профиля пропитки изделия. В месте расположения радиолокатора малая глубина пропитки, которая увеличивается по всей толщине изделия по различному закону (например, по параболе для оболочек в виде тел вращения).

Для решения указанной задачи необходимо разработать аппаратурное обеспечение и активный метод контроля сложного профиля глубины пропитки кремнийорганическими и

циклоалифатическими олигомерами оболочек из пористой керамики непосредственно во время капиллярной пропитки.

Такая задача является актуальной и важной при производстве обтекателей фюзеляжей самолетов и обтекателей ракетных систем, что позволит находить оптимальное соотношение параметров радиопрозрачности и изгибной прочности при разной управляемой глубине пропитки.

Известен способ пассивного контроля глубины пропитки изделий из пористой керамики кремнийорганическими соединениями в вязкотекучем состоянии, в котором информативным параметром служит время пропитки при известной плотности пропитывающего вещества [6]. В известном способе кремнийорганический олигомер разбавляют ацетоном для получения необходимой плотности, измеряют плотность ареометром и обеспечивают контакт с пропитываемым изделием. В зависимости от времени контакта пропитывающее вещество (олигомер) проникает на разную глубину (капиллярный эффект). Изменяя место и время контакта, осуществляют пропитку одного изделия на разную глубину. Однако этот способ имеет ряд недостатков. Прежде всего, распределение пор в керамическом изделии не всегда является однородным (регулярным), следовательно, граница пропитки по всему изделию будет отличаться от планируемой. Кроме того, пассивный метод контроля не позволяет осуществить обратную положительную связь с технологическим процессом пропитки путем использования такого косвенного параметра как время.

В настоящей работе предлагается модифицированный способ и устройство активного контроля сложного профиля глубины пропитки кремнийорганическими олигомерами оболочек из пористой керамики, которые учитывают неоднородность распределения пор в структуре материала оболочки, а в качестве индикаторной физической величины используют параметр, возможный к преобразованию в электрический сигнал. В качестве косвенной физической величины, несущей информацию о глубине пропитки, предлагается использовать параметры люминесценции, происходящей при настройке лазерного излучения на частоту квантового перехода в спектре исследуемого вещества. Для реализации способа к макромолекуле олигомера предварительно химически подшивают молекулу органического красителя (активируют олигомер), добавляют отвердитель и осуществляют полимеризацию при выбранной температуре. При возбуждении активированных красителями олигомеров в полосу поглощения красителей спектр люминесценции красителей в олигомер-полимерном окружении несет информацию о молекулярной подвижности, фазовых и мезоморфных фазовых переходах, температуре стеклования и времени желатинизации в процессе отверждения [7].

## СПОСОБ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПИТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

Сущность предлагаемого технического решения заключается в том, что для контроля глубины пропитки предварительно измеряют спектральный диапазон длин волн, где кремнийорганический олигомер имеет поглощение. Затем выбирают органический краситель, спектр поглощения которого не совпадает со спектром поглощения олигомера. Разбавляют олигомер в ацетоне для получения необходимой вязкости, которую измеряют ареометром. Активируют олигомер органическим красителем и измеряют спектр поглощения активированного красителем олигомера. Спектры поглощения измеряют известным образом на спектрофотометре, используя метод фотометрии, в котором контролируемыми параметрами являются оптическая плотность и пропускание. Подготовленным таким образом активированным кремнийорганическим олигомером пропитывают оболочку изнутри за счет капиллярного эффекта и давления. В процессе пропитки наружную сторону оболочки освещают светом от лазера, выбранного таким образом, что его длина волны излучения совпадает с максимумом поглощения органического красителя в олигомере. Пучок света от лазера распространяется по непропитанной части оболочки и его интенсивность изменяется согласно закону Бугера:

$$I_1 = I_0 \exp(-\alpha_{\lambda_1} z),$$

где  $I_0$  — интенсивность лазерного излучения на поверхности оболочки ;  $\alpha_{\lambda_1}$  — спектральный коэффициент потерь, вызванный в основном из-за рассеяния за счет пористости керамики на длине волны излучения лазера; z — расстояние до пропитанной границы;  $I_1$  — интенсивность лазерного излучения, падающего на окрашенную пропитанную границу.

Под воздействием лазерного излучения молекулы органического красителя, растворенного в олигомере, переходят в возбужденное состояние и, возвращаясь в основное состояние, избыток

энергии отдают в виде люминесценции или спонтанного излучения, которое распространяясь по непропитанной части до приемного волокна, преодолевает такое же расстояние z. На оптоволокно поступает интенсивность люминесценции:

$$I_2 = I_1 \exp(-\alpha_{\lambda_2} z),$$

где  $I_2$  — интенсивность света, поступающего на оптоволокно от люминесцирующей окрашенной границы;  $\alpha_{\lambda_2}$  — потери интенсивности люминесценции, вызванные рассеянием на максимуме длины волны люминесценции окрашенной границы; z — толщина непропитанной части оболочки.

Таким образом, на оптоволокно приемного канала поступает свет от окрашенной границы пропитки с интенсивностью:

$$I_2 = I_0 \exp(-\alpha_{\lambda_1} z) \exp(-\alpha_{\lambda_2} z) = I_0 \exp\left[-\left(\alpha_{\lambda_1} + \alpha_{\lambda_2}\right) z\right].$$

Согласно техническому решению, измеряют толщину непропитанной части оболочки z, а глубину пропитки определяют как разность между толщиной оболочки и толщиной непропитанной части. Увеличение глубины пропитки оболочки приводит к увеличению интенсивности люминесценции  $I_2$  за счет уменьшения z. При активации органическим красителем олигомера, растворенном в ацетоне окрашиваются олигомер и ацетон. Ацетон, имея меньшую плотность чем олигомер, будет создавать передний слой пропитки и несет ложную информацию о глубине пропитки. Для получения истинной информации необходимо регистрировать интенсивность люминесценции красителя в олигомере, и это возможно, так как большинство красителей, введенных в олигомер, имеет гипсохромный сдвиг (отрицательная сольватохромия) по сравнению с красителем, растворенном в ацетоне или в этаноле, что связано с более сильной стабилизацией основного состояния, чем возбужденного за счет межмолекулярного взаимодействия [7]. Например, для красителя родамин С максимальная длина волны люминесценции в олигомере — 545 нм; для красителя родамин 6Ж максимальная длина волны люминесценции в олигомере — 545 нм, в ацетоне — 585 нм; для красителя оксазин 17 максимальная длина волны люминесценции в олигомере — 500 нм, в ацетоне — 552 нм, в ацетоне — 555 нм.

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПИТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

Поставленная задача решается за счет того, что устройство, включающее оболочку из пористой керамики и емкость с пропитывающим окрашенным кремнийорганическим олигомером, содержит канал излучения с оптической системой его формирования и второй канал, обеспечивающий регистрацию и анализ выходного сигнала, выполненный с возможностью преобразования параметров люминесценции в электрический сигнал. На рис. 1 показана функциональная схема устройства, которое содержит лазер (I), например, I0 налучения 532 нм, энергия в импульсе 150 мДж, длительность импульса 10 нс, частота следования импульсов 20  $\Gamma$ 1.

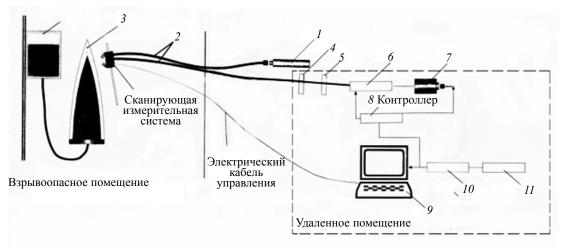


Рис. 1. Функциональная схема устройства для контроля глубины пропитки оболочек из пористой керамики (активный метод).

Лазер снабжен многомодовым оптоволокном (2) с сердцевиной из кварцевого стекла, транспортирующим излучение лазера к поверхности оболочки (3). Рассеянное возбуждающее излучение и излучение люминесценции от окрашенной границы пропитки с помощью второго оптоволокна (2) через красный светофильтр ( $\overline{4}$ ) и объектив (5) транспортируется на вход монохроматора (б). На выходе монохроматора установлен фотоэлектронный умножитель (7). С помощью светофильтра (4) частично подавляется рассеянное излучение накачки. Устройство также содержит контроллер (8), выполненный так, что он управляет шаговым двигателем дифракционной решетки монохроматора, обеспечивает электрическим питанием фотоумножитель и имеет интерфейс сопряжения с компьютером (9), который снабжен монитором (10) и принтером (11). Пропитываемая оболочка (3) соединена с установкой пропитки трубопроводом, а емкость, содержащая пропитывающее вещество, может перемещаться вертикально, изменяя уровень пропитки оболочки изнутри. Система обработки полученных данных снабжена программой с двумя меню: сканирование в диапазоне длин волн и регистрация интенсивности люминесценции в узкой полосе люминесценции красителя в олигомере. Программа также обеспечивает хранение результатов в памяти компьютера, математическую обработку и отображение результатов измерений с сохранением значений параметров работы и файлов со спектрами. Устройство обеспечивает дистанционный контроль, так как первый канал содержит лазер, излучение которого транспортируется оптоволокном к контролируемой оболочке, а второй канал содержит второе оптоволокно, транспортирующее излучение люминесценции границы на вход монохроматора. Дополнительно устройство содержит сканирующую систему, которая обеспечивает перемещение оптоволокна приемного и излучающего трактов параллельно наружной поверхности оболочки, а также устройство, обеспечивающее вращение самой оболочки для реализации сплошного контроля. При этом система контроля выполнена с возможностью создания противодавления [8].

## ОСНОВЫ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПИТКИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОБРАЗЦАХ

Образцы представляют собой диски из пористой керамики, предварительно пропитанные активированным олигомером на разную глубину в эксикаторе без последующей полимеризации. Кремнийорганический олигомер в вязкотекучем состоянии разбавляют ацетоном для получения необходимой плотности и дополнительно вводят трифенилметановый краситель, например, родамин 6Ж в концентрации (1—0,5) мг/г. При окраске олигомера, разбавленного ацетоном, определяют спектр поглощения олигомера. Краситель выбирают таким, чтобы спектр его поглощения в ацетоне не совпадал со спектром поглощения олигомера в ацетоне, а лежал в более длинноволновой области. Предварительно исследуют глубину пропитки образца активированным олигомером с использованием пассивного метода. На рис. 2 приведена зависимость глубины пропитки от времени пропитки для образца с плотностью 1,94—1,95 г/см³.



Рис. 2. Зависимость глубины пропитки кремнийорганического олигомера, растворенного в ацетоне, от времени пропитки (пассивный метод).

Показанная зависимость носит хорошо выраженный нелинейный характер, начиная с времени пропитки более 10 мин. Для малого времени пропитки зависимость близка к линейной. С увеличением плотности олигомера наблюдается тенденция к уменьшению глубины пропитки и увели-

чению времени пропитки. Указанные закономерности сохраняются и при использовании активного метода контроля.

На рис. 3a показана спектральная зависимость оптической плотности  $D_{\lambda}$  кремнийорганического олигомера, растворенного в ацетоне, от длины волны  $\lambda$  (плотность олигомера 1,95 г/см³). Характер зависимости обусловлен тем, что олигомер имеет собственную окраску, которую не представляется возможным использовать для возбуждения люминесценции в связи с низким квантовым выходом. На рис. 3b показана спектральная зависимость оптической плотности  $D_{\lambda}$  органического красителя, например, родамина b, растворенного в ацетоне, от длины волны b. Видно, что максимальное поглощение краситель в окружении ацетона имеет на длине волны, равной 532 нм (зеленая область). На рис. b показана спектральная зависимость оптической плотности b кремнийорганического олигомера, растворенного в ацетоне и активированного красителем родамином b, от длины волны b.

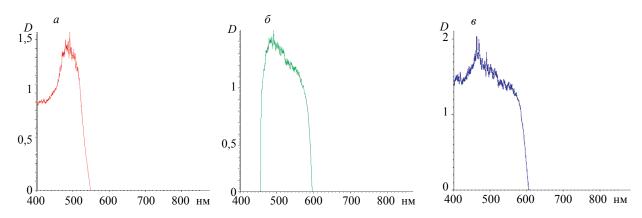


Рис. 3. Спектральная зависимость оптической плотности  $D_{\lambda}$  от длины волны  $\lambda$ : a — кремнийорганического олигомера, растворенного в ацетоне;  $\delta$  — органического красителя родамина 6Ж, растворенного в ацетоне;  $\delta$  — кремнийорганического олигомера, растворенного в ацетоне и активированного красителем родамином 6Ж.

На рис. 4 приведена функциональная схема лабораторной установки для контроля глубины пропитки кремнийорганическими олигомерами образцов из пористой керамики [9], вырезанных из оболочки. Образец накачивался с непропитанной стороны второй гармоникой ИАГ:ND<sup>3+</sup>лазера, который запускался в режиме модулированной добротности с частотой следования импульсов 20 Гц при длительности импульса 10 нс и энергии в импульсе 150 мДж (при длине волны 532 нм). Люминесценция собиралась косым сколом волокна, пропускалась через красный фильтр, подавляющий рассеянное излучение накачки, и регистрировалась на длине волны люминесценции активированного олигомера, имеющего гипсохромный сдвиг по сравнению с длиной волны люминесценции активированного ацетона.

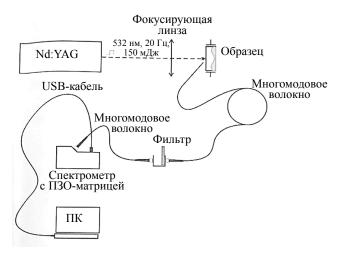


Рис. 4. Функциональная схема лабораторной установки для контроля глубины пропитки образцов из пористой керамики активным методом.

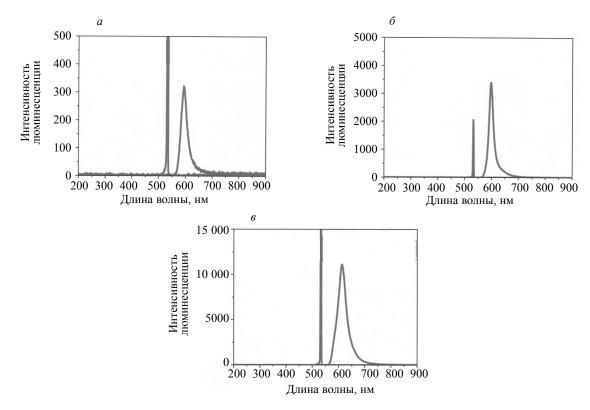


Рис. 5. Спектры люминесценции окрашенной границы при разной глубине пропитки: a - 2 мм; b - 4 мм; b - 8 мм.

На рис. 5a—e приведены спектры люминесценции, измеренные при облучении лазером образцов с неокрашенной стороны. Видно, что при увеличении глубины пропитки интенсивность люминесценции от окрашенной границы пропитки увеличивается за счет уменьшения величины непропитанной части образца. По изменению интенсивности люминесценции окрашенной границы определяют величину непропитанной части, а глубину пропитки определяют как разность между толщиной образца и толщиной непропитанной части образца [10].

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предлагаемый способ для активного контроля сложного профиля глубины пропитки кремнийорганическими соединениями изделий из пористой керамики позволяет в автоматическом режиме управлять технологическим процессом пропитки и определять глубину пропитки, а при последующей полимеризации добиваться необходимых оптимальных значений изгибной прочности и радиопрозрачности как всего изделия, так и отдельных его участков.

Лазерная спектральная установка позволяет дистанционно осуществлять технологию контроля, сканировать изделие с целью измерения люминесценции активированной красителями границы как в широком диапазоне длин волн, так и в узкой полосе. Программный комплекс обеспечивает математическую обработку результатов измерений и сохранение файлов со спектрами.

Способ контроля и устройство могут быть также использованы при пропитке другими жидкими препаратами изделий, изготовленных из материалов, имеющих взаимосвязанные поры, с использованием капиллярного эффекта, при их проектировании и производстве с заранее заданными свойствами, например, «прозрачностью» в сантиметровом, метровом и др. диапазонах длин волн. Экспериментально методика была отработана на образцах, предварительно окрашенных на разную глубину, при облучении лазером с неокрашенной стороны. Интенсивность люминесценции границы пропитки при возбуждении второй гармоникой от импульсного ИАГ:ND<sup>3+</sup>лазера на всех испытанных образцах надежно регистрировалась (в узкой полосе) на длине волны полезного сигнала 600 нм, что соответствовало длине волны люминесценции окрашенного олигомера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Русин М.Ю. Проектирование головных обтекателей из керамических и композиционных материалов / Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 64 с.
- 2. *Косинский В.В.* Получение композиционных материалов с наперед заданными свойствами способом гидростатической пропитки с нагревом // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. Запорожье. 2005. № 2. С. 86—94.
- 3. *Лордкипанидзе М.А.* Обзор способов пропитки пористого алюминия эпоксидными смолами // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Екатеринбург: Изд-во «Институт стратегических исследований», 2017. № 2. С. 38—40.
- 4. *Медведева А.Д., Мордасов Д.М., Мордасов М.М.* Классификация методов контроля пористости материалов // Вестник ТГТУ. 2012. Т. 18. № 3. Transactions TSTU. С. 749—754.
- 5. *Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В., Коновалов Г.Е.* Ультразвуковой капиллярный эффект / Под. ред. В.В. Клубовича. Минск: Наука и техника, 1981. 135 с.
- 6. Поляков В.Е., Антонов В. В., Некрасов Е.В. Контроль глубины пропитки пористой кварцевой керамики кремнийорганическими олигомерами / Тезисы докладов 17 Международной Научнотехнической конференции, 23—25 октября 2007, г. Обнинск. С. 60—62.
- 7. Поляков В.Е., Потапов А.И. Лазеры на красителях / Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СЗТУ, 1993. 130 с
- 8. Жилин А.А., Федоров А.В. Физико-математическое моделирование процессов пропитки пористых материалов // Прикладная механика и техническая физика. Новосибирск. 2009. Т. 50. № 1. С. 42—51.
- 9. *Красный Б.Л.*, *Тарасовский В.П.*, *Красный А.Б.*, *Омаров А.Ю*. Количественный анализ поровой структуры керамики с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображения // Новые огнеупоры. 2013. № 8. С. 40—44.
- 10. Поляков В.Е., Шосталь В.Ю., Закутаев А.А., Мерзляков М.А., Широбоков В.В., Лиференко В.Д., Рогачев В.А., Михайлов А.А. Способ и устройство для активного контроля сложного профиля глубины пропитки кремнийорганическими соединениями изделий из пористой керамики / Пат. 2702847 Российская Федерация. 2019. Бюл. № 29. 21 с.

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ДЕТАЛЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2021 г. Е.Н. Каблов<sup>1</sup>, О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>, И.И. Кудинов<sup>1</sup>, А.Н. Головков<sup>1</sup>, А.С. Генералов<sup>1</sup>, А.В. Князев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ), Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17

E-mail: viamlab622@gmail.com

Поступила в редакцию 23.10.2020; после доработки 13.11.2020 Принята к публикации 20.11.2020

Проведена работа по оценке эффективности выявления эксплуатационных дефектов при проведении капиллярного контроля деталей авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства, выявляющие дефекты с величиной раскрытия 1 мкм и менее. Рассмотрены два взаимодополняющих подхода качественной оценки эффективности различных наборов дефектоскопических материалов, рекомендуемых к применению при проведении капиллярного контроля в производстве и эксплуатации деталей авиационной техники, с целью выбора набора, выявляющего дефекты определенного вида с наименьшими размерами. Первый подход основан на оценке основных дефектоскопических свойств проникающих многокомпонентных жидкостей, обеспечивающих их проникновение в полости поверхностных дефектов, а второй — на экспериментальном получении параметров выявляемости дефектов с вероятностью 50 и 90 % при доверительной вероятности 50 % и с вероятностью 90 % при доверительной вероятности 95 %.

*Ключевые слова*: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, дефектоскопические материалы, образец, трещина, вероятность обнаружения.

DOI: 10.31857/S0130308221010073

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Для создания авиационной техники, имеющей конкурентоспособные показатели ресурса, необходимо более полное использование эксплуатационных возможностей материала деталей и узлов. Современные российские и международные документы по сертификации газотурбинных двигателей дополняют ранее применявшийся подход к определению ресурса их основных деталей (в частности, дисков турбины и компрессора из никелевых жаропрочных сплавов) требованием подтверждения назначенного ресурса с использованием концепции безопасного развития дефекта. Этот подход учитывает, среди прочего, вероятность пропуска дефекта при проведении неразрушающего контроля детали в условиях ремонта двигателя. Таким образом, эффективность неразрушающего контроля основных деталей двигателя стала напрямую определять его ресурс и периодичность проведения ремонта. Применение при контроле высокочувствительных методов, обнаруживающих дефекты с минимальными геометрическими размерами и с высокой вероятностью обнаружения, в этих условиях становится столь же действенным способом повышения конкурентоспособности двигателя, как и применение современных материалов с высокими показателями трещиностойкости, статической и циклической прочности [1—5].

Одним из основных высокочувствительных методов неразрушающего контроля в производстве и эксплуатации, позволяющим обнаруживать поверхностные дефекты с минимальной шириной раскрытия менее 1 мкм, является капиллярный люминесцентный метод. При проведении данного контроля часто возникает вопрос о возможности обнаружения дефекта определенной длины и глубины, которые необходимы конструкторам для проведения ресурсных и прочностных расчетов. Использование современных образцов [6] для проверки чувствительности контроля не позволяет дать даже приблизительный ответ на заданный вопрос, так как полученные в них дефекты значительно отличаются от натурных дефектов в авиационных деталях: природой образования, материалом образца и окончательной обработкой поверхности, которая в процессе изготовления детали формирует на поверхности напряженно-деформированное состояние. Выявление данных дефектов на образцах не гарантирует выявления натурных дефектов с аналогичными геометрическими характеристиками на поверхностях различных деталей.

В отечественных литературных источниках для выбора методов капиллярного контроля приведены минимально обнаруживаемые значения протяженности, глубины и ширины раскрытия дефекта у выхода на поверхность [7]. Опыт использования капиллярного контроля показывает, что данные значения не относятся к размерам гарантированно выявляемых дефектов, поэтому не могут учитываться в полной мере для анализа и сравнения методов контроля.

Поскольку образование различных дефектов носит случайный характер, а также их расположение, формы и размеры, то статистически удобно проводить вероятностную оценку их выявляемости для сравнения различных методов и методик неразрушающего контроля. Данную оценку для капиллярного контроля можно проводить по результатам экспериментальных исследований с использованием образцов или деталей с искусственными или естественными дефектами определенного типа и размера. Результатом оценки будет являться график зависимости вероятности обнаружения дефекта (P) от линейного геометрического параметра (например, длина дефекта), характеризующий конкретную технологию контроля. Для построения данной зависимости используется обобщенная линейная модель. Этот способ, распространенный в статистической обработке бинарных данных, позволяет свести задачу к линейной регрессии. Для биномиального распределения различают следующие виды обобщенных линейных моделей: logit f(X), probit f(X), cloglog f(X) и loglog f(X). Данные зависимости представляют собой сигмовидную функцию (рис. 1), асимптотически приближающаяся к нулю слева и к единице справа, которая наилучшим образом описывают исходные бинарные данные капиллярного контроля. Бинарные данные, показанные на рис. 1 точками, очевидно, принимают возможные значения: только «0», если дефект пропущен, или «1», если дефект обнаружен [8].

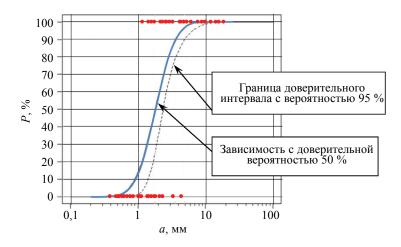


Рис. 1. Пример зависимости вероятности обнаружения дефекта (P) от его размера (a).

Полученная зависимость имеет доверительную вероятность 50%, а при прочностных расчетах в качестве достоверно обнаруживаемого дефекта рекомендуется применять, учитывать размер дефекта, выявляемого с вероятностью 90% при доверительной вероятности 95% ( $a_{90/95}$ ), поэтому получение зависимости сопровождается построением границ доверительного интервала с доверительной вероятностью 95%, показанной на рис. 1 штриховой линией [9]. Подробно алгоритм и математическая модель построения зависимостей и доверительного интервала описаны в MIL-HDBK-1823A [8].

За рубежом параметры вероятности обнаружения дефектов также широко используются для сравнения существующих методов и технологий неразрушающего контроля. В отечественных и иностранных литературных источниках приводятся кривые вероятности обнаружения дефектов капиллярными методами контроля, полученные для различных наборов дефектоскопических материалов [10], технологий капиллярного контроля с учетом применения различного оборудования, величины интенсивности ультрафиолетового излучения при осмотре объектов контроля, влияния процесса травления [11], а также с учетом влияния направления окончательной механической обработки поверхности [12].

#### ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Для построения кривых вероятности обнаружения дефектов POD(a) при доверительной вероятности 50 и 95% необходимо провести экспериментальные исследование с использованием, по крайней мере, 60 дефектов на образцах или натурных деталях [13]. Достоверность оценки кривых увеличивается с увеличением количества дефектов.

Опыт статистической обработки бинарных результатов капиллярного контроля показал, что наилучшим образом экспериментальные данные описываются с использованием обобщенных линейных статистических моделей, таких как probit f(X) или logit f(X):

probit 
$$f(X) = g(y) = \Phi^{-1}(p)$$
, (1)

где g(y) — probit функция связи;  $y = \beta_0 + \beta_1 X$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_0$  — коэффициенты линейной регрессии;  $\Phi^{-1}(p)$  — функция обратная нормальной функции распределения;  $p = N(x, \mu, \sigma)$  — функция нормального распределения;  $\mu$  и  $\sigma$  — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение нормального распределения вероятностей; X — размер дефектов (длина).

$$logit f(X) = g(y) = log (p/(1-p)),$$
(2)

где g(y) — logit функция связи;  $p = 1/(1+e^{-z})$  — логистическая функция;  $z = \beta_0 + \beta_1 X$ ;  $\beta_1$  и  $\beta_0$  — коэффициенты линейной регрессии; X — размер дефектов (длина).

Используя данные функции, строят диаграммы вероятности обнаружения дефектов с доверительной вероятностью 50 и 95%. Из этих диаграмм получают числовые параметры вероятности обнаружения дефектов, удобные для анализа полученных результатов:  $a_{50/50}$ ,  $a_{90/50}$  и  $a_{90/95}$ .

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Определение основных дефектоскопических свойств проникающих многокомпонентных жидкостей, обеспечивающих их проникновение в полости поверхностных дефектов

Оценка дефектоскопических свойств жидкостей получила широкое применение при разработке и создании проникающих многокомпонентных составов для капиллярного контроля. Дефектоскопические свойства жидкостей, такие как вязкость и смачиваемость, влияют на формирование индикаторного рисунка и обнаружение дефектов, за счет увеличения степени заполнения полостей дефектов смачивающей жидкостью [14].

В паспортах прилагаемых к отечественным и зарубежным наборам дефектоскопических материалов отсутствует информация о физических характеристиках многокомпонентных композиций жидкостей, обеспечивающих выявление дефектов с заданной чувствительностью. Данная информация была бы также полезна для качественного сравнения наборов и интерпретации полученных результатов контроля. С этой целью проведены измерения динамической вязкости, краевого угла смачивания проникающих многокомпонентных жидкостей отечественного и зарубежного производства, а также определен параметр динамического изменения диаметра пятна, растекающегося по горизонтальной поверхности контролируемого образца.

Для косвенного определения внутреннего взаимодействия слоев проникающих жидкостей, имеющих очень низкие значения динамической вязкости, использовался вискозиметр Брукфильда со специальным шпинделем и адаптером.

Для косвенного определения величины взаимодействий на межфазной границе «проникающая жидкость — поверхность образца из жаропрочного сплава» определялись такие параметры как краевой угол смачивания, с использованием оптического анализатора контактного угла смачивания, и диаметр пятна, растекшегося по горизонтальной поверхности контролируемого образца от капли объемом 2 мкл, нанесенной с помощью пипеточного дозатора.

Степень адсорбционного взаимодействия определялась путем сравнения образованных пятен в ультрафиолетовом свете длиной волны 365 нм.

# Определение параметров выявляемости дефектов выбранными наборами дефектоскопических материалов

Для оценки эффективности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочного сплава были проведены экспериментальные исследования на образцах из жаропрочного сплава с трещинами малоцикловой усталости различного размера длиной

от 0,5 до 13 мм в количестве 60 шт., с использованием постэмульгируемого набора дефектоскопических жидкостей отечественного производства (ЛЮМ1-ОВ), соответствующего 1-му классу чувствительности, согласно ГОСТ 18442 [15], в составе которого пленкообразующий проявитель, и жидкостей зарубежного производства (фирмы SHERWIN), отнесенный к 4-му классу чувствительности, согласно ISO 3452-2 [16], в составе которого используется порошковый проявитель. Дефекты на образцах получены циклическим нагружением на испытательных машинах. Так как на выявление трещин капиллярным методом влияет напряженно-деформированное состояние, после изготовления образцов с помощью рентгенодифракционного метода проведены измерения поверхностных напряжений, которые составили минус 505±130 МПа. Полученные данные соответствуют типичным значениям сжимающих напряжений на поверхностях критических зон деталей авиационных двигателей из жаропрочных сплавов. Вид образца с искусственным дефектом показан на рис. 2.

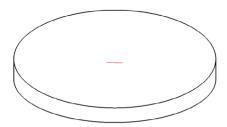


Рис. 2. Вид образца с искусственным дефектом.

Контроль комплекта образцов с трещинами МЦУ в количестве 60 шт. проводился 2-мя дефектоскопистами с использованием исследуемых наборов дефектоскопических материалов, по режимам, рекомендованным производителями и технологической документацией, описывающей процесс капиллярного контроля. Вначале контроль образцов проводился с использованием зарубежного набора, затем отечественного. После сравнительных испытаний наборов было проведено два экспертных контроля. Первый проводился с целью сравнения результатов, полученных при первичном аттестационном контроле, по технологии, приведенной в паспорте, что гарантировало определение работоспособности образцов и рассмотрение их в выборке для проведения вероятностных расчетов. Второй проводился с использованием перспективных технологий, позволяющих повысить выявляемость дефектов, за счет интенсификации заполнения полостей дефектов проникающей жидкостью [17], что определяло возможность выявления необнаруженных дефектов по стандартным технологиям на данных образцах.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

# Анализ основных физических свойств проникающих многокомпонентных жидкостей, обеспечивающих их проникновение в полости поверхностных дефектов

Значение динамической вязкости для проникающей жидкости ЛЖ-6A при температуре 26,5 °C составило 5,11 мПа·с, а для проникающей жидкости зарубежного производства — 17,9 мПа·с при температуре 26,2 °C.

Получено значение краевого угла близкое к 0° для проникающих жидкостей отечественного и зарубежного производства, что говорит о высоком адсорбционном взаимодействии с поверхностью твердого тела. Результаты эксперимента в виде значений диаметров пятен пенетрантов, растекшихся по поверхности участка образца за промежуток времени 5 мин, представлены в табл. 1. Стрелкой показано направление механической обработки поверхности образца из жаропрочного сплава.

Из табл. 1 видно, что величина взаимодействия зарубежного пенетранта с поверхностью образца выше, чем у пенетранта отечественного производства. Следует отметить, что у пятна пенетранта отечественного производства есть характерный неяркий люминесцентный «ореол», что говорит о протекании активных процессов испарения низкокипящего растворителя, входящего в состав жидкости.

Таким образом, анализируя полученные данные физических свойств, можно сделать вывод, что, обладая более высокой (в сравнении с пенетрантом отечественной разработки) вязкостью, за-

Таблица 1 Оценка адсорбционных свойств исследуемых проникающих жидкостей с поверхностью образца

Проникающая жидкость	Вид пятна в УФ освещении	Макс. размер свечения, мм
Зарубежный пенетрант		9,34
Отечественный пенетрант		7,82 (3,26)

рубежный пенетрант обеспечивает высокую степень взаимодействия с поверхностью образца, а за счет высокой яркости люминесценции повышает «видимость» индикаторного рисунка, сохраняя его за счет меньшей летучести входящих в состав растворителей.

Однако полученные данные исследуемых свойств не позволяют в полном объеме оценить их влияния на конечную характеристику дефектоскопических материалов — выявляемость дефектов.

# Анализ параметров выявляемости дефектов выбранными наборами дефектоскопических материалов

Наиболее показательные результаты контроля обнаруженных (условное обозначение — «1») и необнаруженных (условное обозначение — «0») дефектов при контроле наборами отечественного и зарубежного производства приведены в табл. 2. Также приведены результаты выявления трещин при экспертном контроле с использованием интенсификации процесса заполнения полостей дефектов проникающей жидкостью.

Таблица 2 Результаты капиллярного контроля с использованием наборов отечественного (ЛЮМ1-ОВ) и зарубежного производства участков с дефектами

<b>№</b> п/п	Набор отечественного производства	0 / 1	Наборов зарубежного производства	0 / 1	Экспертный контроль	Протяженность трещины, мм
1		0		0		0,9
2	-	1		0	-	1,7
3		1	-	0	_	5,3
4	-	1	-	1	-	7,0

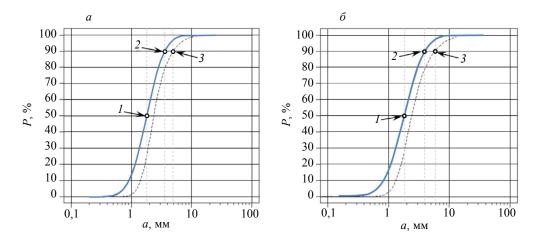


Рис. 3. Вероятность обнаружения усталостных трещин в образцах из жаропрочного сплава ( $1-a_{50/50}; 2-a_{90/50};$   $3-a_{90/95}$ ): a — отечественный набор;  $\delta$  — зарубежный набор.

По полученным данным проведены расчеты вероятности обнаружения усталостных трещин для каждого набора дефектоскопических материалов. Построены суммарные кривые вероятности по результатам контролей 2-х дефектоскопистов для каждого из наборов дефектоскопических материалов. На рис. 3 показаны диаграммы выявляемости трещин малоцикловой усталости капиллярным люминесцентным методом контроля на образцах из жаропрочного сплава с использованием наборов отечественного и зарубежного производства. Параметры вероятности обнаружения трещин МЦУ с вероятностью 50 и 90 % при доверительной вероятности 50 % и с вероятностью 90 % при доверительной вероятностью 35 % приведены в табл. 3.

Таблица 3 Параметры вероятностной оценки обнаружения трещин с использованием дефектоскопических наборов отечественного и зарубежного производства

Веродтность обизружения трешины % / при	Hoven marries vo	Длина трещины, мм		
Вероятность обнаружения трещины, % / при доверительной вероятности, %	Номер точки на рисунке	Контроль набором ЛЮМ1-ОВ	Контроль зарубежным набором	
50/50	1	1,79	1,83	
90/50	2	3,60	4,03	
90/95	3	4,95	5,78	

Следует отметить, что свечения от дефектов с большой протяженностью, полученные с использованием зарубежного набора дефектоскопических материалов, шире, а с использованием набора отечественного производства над дефектами формируется индикаторные рисунки узкие с четкими границами. По мере приближения к концам трещины наблюдалось расширение индикаторных полос, что связано с проявлением концевого капиллярного эффекта из-за сужения полости трещины к ее концам. При «сухом» методе проявления, с использованием пористого сорбента зарубежного производства, наблюдалось формирование над трещинами индикаторных рисунков узловатого характера. Резкая изменчивость ширины индикаторных полос, прерывистое строение и неравномерная интенсивность люминесценции связана с ограниченностью контакта с индикаторной жидкостью, выходящей преимущественно из отдельных точек капиллярной полости [18]. Различия в размерах индикаторного рисунка от небольших дефектов не наблюдалось, что связано с небольшим объемом индикаторной жидкости в полости трещины. Максимальный размер дефекта, пропущенный с использованием отечественного набора дефектоскопических материалов, составил 4,5 мм, зарубежного — 5,3 мм, а минимально выявленный размер составил 1,7 и 1,9 мм соответственно.

#### выводы

Проведена работа по оценке эффективности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочного сплава с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства.

Предложены два подхода качественной оценки эффективности различных наборов дефектоскопических материалов, рекомендуемых к применению при проведении капиллярного контроля в производстве и эксплуатации авиационных деталей, с целью выбора набора, выявляющего дефекты определенного вида с наименьшими размерами.

Показаны дефектоскопические свойства многокомпонентных проникающих жидкостей, входящих в набор данных материалов, влияющих на формирование индикаторного рисунка и соответственно обнаружение дефектов.

По результатам оценки параметров вероятности обнаружения трещин МЦУ на образцах из жаропрочного сплава, имеющих на поверхности остаточные сжимающие напряжения, капиллярными люминесцентными методами контроля установлено, что данные дефекты выявляются лучше с использованием постэмульгируемого отечественного набора дефектоскопических материалов ЛЮМ1-ОВ, имеющего в составе пленочный проявитель ПР-1, чем материалов зарубежного производства с использованием порошкового проявителя.

Получение меньших значений параметров вероятности обнаружения трещин МЦУ с использованием зарубежного набора, вероятно, связано, в том числе, с отсутствием достаточного технологического опыта при обработке поверхностей образцов данными дефектоскопическими материалами.

Полученные данные могут быть применены при выборе наборов для обнаружения трещин малоцикловой усталости капиллярным методом неразрушающего контроля в деталях авиационной техники из жаропрочного сплава, имеющих аналогичное состояние поверхности и геометрию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. 2014.
- 2. *Каблов Е.Н.* Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // Эксперт. 2015. № 28 (951). C. 48—51.
- 3. *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
- 4. *Каблов Е.Н.* Современные материалы основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10—15.
- 5. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. C. 460—468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468
- 6. Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С. Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. на-уч.-технич. журн. 2019. № 11. Ст. 95. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения 03.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103
- 7. Беда П.И., Выборнов Б.И. и др. Неразрушающий контроль металлов и изделий. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
- 8. MIL-HDBK-1823A «Nondestructive evaluation system reliability assessment», департамент обороны США, 2009.
- 9. ОСТ 1 01207-2012 Отраслевой (авиационный) стандарт. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования.
- 10. A Comparison of the Capability of Sensitivity Level 3 and Sensitivity Level 4 Fluorescent Penetrants to Detect Fatigue Cracks in Various Metals / Bradford H. Parker Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
  - 11. Nondestructive Testing Handbook «Liquid Penetrant Testing». V. 2. 3rd edition ASNT.
- 12. Кудинов И.И., Цыкунов Н.В., Якубин С.П. Определение размеров выявляемых трещин в дисках турбины авиационного двигателя при проведении капиллярного контроля / Всероссийская научно-техническая конференция «авиадвигатели XXI века» Сб. тезисов докладов. М.: ЦИАМ имени П.И. Баранова. 24—27 ноября, 2015. С. 502—503.
- 13. *Чертищев В.Ю*. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3. С. 65—79 DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79
- 14. *Мигун Н.П.*, *Тнусин А.Б.* Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле. Минск: Беларус. навука, 2011. 131 с. ISBN 978-985-08-1341-1.

- 15. ГОСТ 18442—80 «Неразрушающий контроль. Капиллярные методы». Изд-во стандартов, 1987. 24 с.
- 16. ISO 3452-2:2013 Non-destructive testing-Penetrant testing-Part 2: Testing of penetrant materials. 2013. 32 p.
- 17. *Ќудинов И.И., Головков А.Н., Куличкова С.И., Скоробогатько Д.С.* Оценка эффективности применения различных способов интенсификации процесса капиллярного контроля с применением отечественного набора дефектоскопических материалов // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 59—66. DOI: 10.1134/S0130308219110071
- 18. Ospennikova O.G., Kudinov I.I. et al. Research of Defectoscopic Properties of Powder Compositions for Increasing Efficiency and Reliability of Penetrant Testing of Complex Shaped // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 3. P. 291—297. [Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Куличкова С.И., Скоробогатько Д.С. Исследование дефектоскопических свойств порошковых композиций для повышения эффективности и надежности капиллярного контроля деталей сложной конфигурации // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 72—78. DOI: 10.31857/S0130308220030094]

## Правила отправки статей в журнал «Дефектоскопия»

Уважаемые авторы, напоминаем вам, что, согласно требованиям издательства ООО «ИКЦ АКАДЕМКНИГА» и РАН, с 2020 года статьи в журнал «Дефектоскопия» принимаются и отправляются на рецензирование только через портал электронной редакционно-издательской системы (РИС). Для отправки статьи Вам необходимо зарегистрироваться как автору и загрузить Вашу статью в журнал через портал РИС по адресу: https://publish.sciencejournals.ru/login.

Подробные инструкции по работе на портале будут доступны в Вашем личном кабинете.

Для корректной работы рекомендуется использовать следующие браузеры:

Google Chrome версии 60 и выше, Safari версия 11 и выше.

Редколлегия