

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-339-347

УДК 620.179.16; 004.94

Модель акустического тракта раздельно-совмещенного оптико-акустического преобразователя

Алексей Владимирович Федоров¹, Владимир Анатольевич Быченко²,
 Игорь Владимирович Беркутов³, Ирина Евгеньевна Алифанова⁴✉

^{1,2,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

³ Учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники» (ИКЦ СЭКТ), Санкт-Петербург, 197343, Российская Федерация

¹ afedor62@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>

² bychenok-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6126-3547>

³ chigivara56712@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8493-7324>

⁴ shebaairina@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7649-8007>

Аннотация

Предмет исследования. Ультразвуковые методы контроля занимают одно из ведущих мест в дефектоскопии, структурографии, при оценке прочностных характеристик материалов и напряженно-деформированного состояния изделий. Метод основан на явлении акустоупругости и позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние изделий по изменению скорости распространения продольной подповерхностной ультразвуковой волны. Для возбуждения акустических колебаний применяются раздельно-совмещенный оптико-акустический преобразователь и лазерно-ультразвуковой дефектоскоп. Конструкция раздельно-совмещенного оптико-акустического преобразователя должна обеспечивать точность измерений времени достижения продольной подповерхностной волной приемника акустических колебаний. Для анализа регистрируемых акустических сигналов и выделения из них сигнала продольной подповерхностной волны в данной работе предложена и разработана конечно-элементная модель акустического тракта раздельно-совмещенного оптико-акустического преобразователя. **Метод.** Конечно-элементная модель реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics с применением явного решателя на основе разрывного метода Галеркина. **Основные результаты.** Разработанная конечно-элементная модель позволяет визуализировать поля перемещений акустических колебаний, получать А-сканы и рассчитывать время прихода на приемник оптико-акустического преобразователя продольной подповерхностной волны. Выполнено сравнение расчетных значений времени прихода продольной подповерхностной волны на приемник оптико-акустического преобразователя с результатами натурального эксперимента. Расчеты и натурные эксперименты выполнены для стальных пластин различной толщины. Адекватность модели подтверждена с использованием критерия Фишера (F-мера). Полученные в результате моделирования А-сканы позволили идентифицировать сигналы, регистрируемые оптико-акустическим преобразователем: сигнал продольной подповерхностной волны, сигнал головной и отраженной поперечной волн, собственные шумы оптико-акустического преобразователя. **Практическая значимость.** Разработанная модель позволяет выделять среди регистрируемых сигналов оптико-акустического преобразователя сигнал продольной подповерхностной волны. Предложенная модель может найти применение при проектировании новых оптико-акустических преобразователей, а также в дефектоскопии и материаловедении.

Ключевые слова

остаточные напряжения, акустический метод, неразрушающий контроль, продольная подповерхностная волна, компьютерное моделирование

Ссылка для цитирования: Федоров А.В., Быченко В.А., Беркутов И.В., Алифанова И.Е. Модель акустического тракта раздельно-совмещенного оптико-акустического преобразователя // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 339–347. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-339-347

Model of the acoustic path of a separate-combined optical-acoustic transducer

Alexey V. Fedorov¹, Vladimir A. Bychenok², Igor V. Berkutov³, Irina E. Alifanova⁴✉

^{1,2,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ Center of Supporting the Operation of Space Technology, Saint Petersburg, 197343, Russian Federation

¹ afedor62@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>

² bychenok-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6126-3547>

³ chigivara56712@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8493-7324>

⁴ sherbairina@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7649-8007>

Abstract

Ultrasonic testing methods occupy one of the key positions in flaw detection, structurescopy, in assessing the strength characteristics of materials and the stress-strain state of products. The method is based on the phenomenon of acoustoelasticity and makes it possible to control the stress-strain state of products by changing the propagation velocity of a longitudinal subsurface ultrasonic wave. To excite acoustic waves, a separate-combined optical-acoustic transducer and a laser-ultrasonic flaw detector are used. The design of a separate-combined optical-acoustic transducer should ensure the measurements accuracy of the time it takes for a longitudinal subsurface wave to reach the receiver of acoustic oscillations. To analyze the recorded acoustic signals and extract from them the signal of a longitudinal subsurface wave, in this work, a finite element model of the acoustic path of a dual-coupled optical-acoustic transducer is proposed and developed. The finite element model was implemented in the COMSOL Multiphysics software package using an explicit solver based on the discontinuous Galerkin method. The developed finite element model makes it possible to visualize the displacement fields of acoustic oscillations, obtain A-scans, and calculate the time of arrival of a longitudinal subsurface wave at the receiver of the optical-acoustic transducer. The calculated values of the arrival time of a longitudinal subsurface wave at the receiver of an optical-acoustic transducer are compared with the results of a full-scale experiment. Calculations and full-scale experiments were performed for steel plates of various thicknesses. The adequacy of the model was confirmed using the Fisher criterion (F-measure). The A-scans obtained as a result of the simulation made it possible to identify the signals recorded by the optical-acoustic transducer: the signal of the longitudinal subsurface wave, the signals of the head and reflected transverse waves, and the intrinsic noise of the optoacoustic transducer. The developed model makes it possible to single out the signal of the longitudinal subsurface wave among the recorded signals of the optical-acoustic transducer. The proposed model can be used in the design of new optical-acoustic transducers, as well as in non-destructive testing (NDT) and materials science.

Keywords

residual stresses, acoustic method, non-destructive testing, longitudinal subsurface wave, computer simulation

For citation: Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V., Alifanova I.E. Model of the acoustic path of a separate-combined optical-acoustic transducer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 339–347 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-339-347

Введение

В настоящее время ультразвуковые методы контроля занимают одно из ведущих мест не только в дефектоскопии изделий [1, 2], но и в оценке структуры [2, 3] и прочностных характеристик материалов [2, 4], напряженно-деформированного состояния изделий [2, 5, 6]. Наиболее информативный параметр, позволяющий производить оценку свойств материала и напряженно-деформированного состояния изделий — скорость распространения ультразвуковых волн (УЗВ) разного вида (продольных, поперечных, поверхностных и др.). По полученным данным измерений скорости распространения УЗВ и плотности могут быть определены упругие модули материала [2]. Основываясь на эффекте акустоупругости¹ в методе акустического неразрушающего контроля, включающем измерение скорости распространения упругих колебаний частиц твердого тела, зависящей от физико-механических свойств или напряженно-деформированного состояния, можно оценить механические напряжения в элементах конструкции изделий [7]. Степень влияния структурных параметров материалов изделий, а также механических напряжений

на скорость распространения УЗВ, как правило, невелико. Исходя из этого, требуется разработка методов и средств измерений, обеспечивающих высокую точность как при измерении абсолютных значений скорости распространения УЗВ, так и при определении ее относительных изменений [7–9].

Одно из решений задачи повышения точности измерения скорости распространения УЗВ — применение метода, основанного на термооптическом возбуждении ультразвуковых колебаний [10]. Для реализации метода используется лазерно-ультразвуковой дефектоскоп с оптико-акустическим преобразователем (ОАП).

ОАП (рис. 1) предназначен для преобразования лазерных импульсов в акустические, передачи их в исследуемую среду и регистрации отраженных и рассеянных акустических сигналов [10]. В общем корпусе ОАП 4, объединены генератор 1 и приемник ультразвуковых колебаний 2. Генератор 1 за счет термоакустического эффекта посредством лазерного нагрева генерирует сверхкороткий (порядка десятков наносекунд) акустический импульс. С помощью преломляющей призмы 3 акустические колебания вводятся в объект контроля 5. Угол наклона призмы α соответствует минимальному углу падения продольной волны, при котором преломленная продольная волна будет распространяться по границе раздела сред, или первому критическому углу

¹ ГОСТ 23829-85 Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Введен 01.01.1987. М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с.

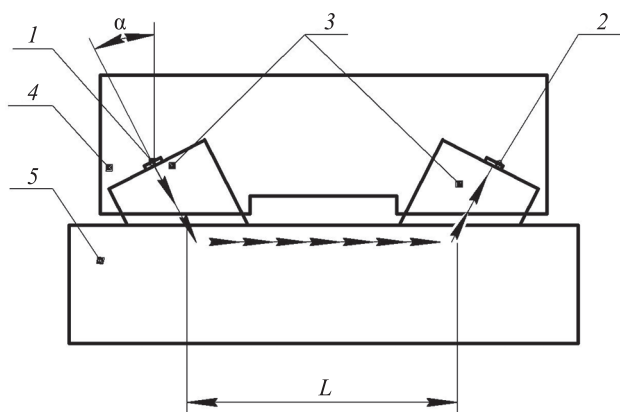


Рис. 1. Конструктивная схема оптико-акустического преобразователя:

1 — генератор акустических колебаний; 2 — приемник акустических колебаний; 3 — преломляющая призма; 4 — корпус; 5 — объект контроля.

Стрелками обозначен путь ультразвуковых колебаний

Fig. 1. Structural diagram of an optical-acoustic transducer (arrows show the path of ultrasonic waves): 1 — acoustic wave generator; 2 — receiver of acoustic waves; 3 — refractive prism; 4 — casing; 5 — object of control

[1], что является обязательным условием распространения продольной подповерхностной волны [11, 12]. Данная волна проходит в объекте контроля 5 путь L , равный базе ОАП (рис. 1), и попадает на чувствительный элемент приемника 2.

Конструкция ОАП обеспечивает точность измерений времени достижения продольной подповерхностной волной приемника акустических колебаний [8, 9].

Влияние эффектов трансформации УЗВ на результаты ультразвуковых измерений рассмотрены в работах [13–15]. Заметим, что вопросы влияния дифракционных эффектов на точность измерений скорости распространения УЗВ в зависимости от их типа не нашли должной проработки, в том числе при термооптическом возбуждении ультразвуковых колебаний.

Отметим, что проектирование и разработка приборов ультразвукового контроля, работа которых основана на исследовании рассеяния упругих волн, должна основываться на результатах анализа акустического тракта [16]. В этой связи вызывает интерес компьютерное моделирование, которое на настоящий момент стало неотъемлемой частью разработки ультразвуковых преобразователей. Компьютерное моделирование не может заменить натурный эксперимент, но при наличии адекватной модели (отражающей основные свойства реального объекта), может сократить затраты на проведение предварительных экспериментальных исследований, изготовление макетных средств и настроечных образцов.

Цель работы — разработка конечно-элементной модели акустического тракта ОАП, которая позволит: — анализировать регистрируемые с помощью ОАП акустические сигналы; — выделить сигнал продольной подповерхностной волны из всех регистрируемых сигналов.

Конечно-элементная модель

Конечно-элементная модель акустического тракта ОАП разработана в программном комплексе COMSOL Multiphysics с помощью интерфейса Elastic Waves, Time Explicit, предназначенного для моделирования упругих волн во временной области с помощью явного решателя на основе разрывного метода Галеркина [17].

Геометрия расчетной области представлена на рис. 2. При разработке конечно-элементной модели введены следующие допущения: плоская геометрия расчетной области; генератор акустических колебаний 1 заменен зондирующим импульсом акустических колебаний; объект контроля имеет бесконечную длину. Генератор ОАП 1 описывается функцией $F(t)$:

$$F(t) = \sin(2\pi ft) \cdot \exp\left(-\frac{T_0^2}{t_0}\right),$$

где f — частота ультразвуковых колебаний; T_0 — период колебаний; t — время распространения колебаний. Функция $F(t)$ описывает короткий радиоимпульс, представляющий синусоидальные колебания с колоколообразной огибающей.

Расчетная область 3, 4 описывается уравнением Ламе, позволяющим определить характеристики распространения произвольного упругого возмущения в изотропном твердом теле [18]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \text{grad div} \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u},$$

где ρ — плотность среды; $\mathbf{u} = (u_x, u_y)$ — вектор смещения частиц; λ и μ — константы, характеризующие упругость среды (постоянные Ламе), Δ — оператор Лапласа. Все компоненты смещения представляются дифференциальными уравнениями, имеющими вид классического волнового уравнения:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2},$$

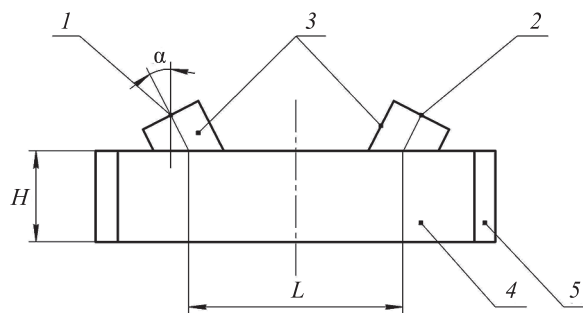


Рис. 2. Геометрия расчетной области оптико-акустического преобразователя: 1 — генератор акустических колебаний; 2 — приемник акустических колебаний; 3 — преломляющая призма; 4 — объект контроля; 5 — идеально-поглощающие слои

Fig. 2. Geometry of the computational area of the optical-acoustic transducer: 1 — acoustic wave generator, 2 — acoustic wave receiver, 3 — refractive prism, 4 — object of control, 5 — ideally absorbing layers

где c — скорость распространения ультразвуковых колебаний в среде.

Продольные волны распространяются со скоростью $c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$, а поперечные волны — $c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$.

Для уменьшения количества отраженных сигналов программный комплекс позволяет ввести в модель идеально-поглощающие слои 5. Таким образом вводится допущение, что объект контроля имеет бесконечную длину.

Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1.

Размер конечно-элементной треугольной сетки выбран из условия не более $\lambda/5$, где λ — длина волны для получения наилучшего разрешения при приемлемых временных затратах на проведение расчета. Расчет проведен по времени от 0 до $60 T_0$ с шагом $T_0/20$, где T_0 — период колебаний. Выполнен анализ результатов моделирования:

- перемещение частиц $\mathbf{u}(x, y, t)$ в расчетной области в целом;
- перемещение частиц $\mathbf{u}(x, y, t)$ по времени на приемнике 2 (рис. 2) — А-скан;
- время прихода сигналов на приемник ОАП.

Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования (рис. 3) для толщины объекта контроля 0,02 м. Интенсивность цвета отражает распределение полей перемещений $\mathbf{u}(x, y, t)$ в каждой точке расчетной области модели.

В начальный момент времени генерируется продольная УЗВ, которая распространяется в призме генератора (1, рис. 3, а). На границе раздела призма-объект контроля наблюдается явление преломления УЗВ (1, рис. 3, б). Частично колебания отражаются от границы раздела призма-объект контроля, затем многократно отражаются от границ призмы и т. д. (2, рис. 3, с).

По границе раздела со скоростью продольной волны распространяется неоднородная поверхностная волна с углом ввода 90° (3, рис. 3, с-е). Продольная волна (1, рис. 3, а, б), падающая под первым критическим углом, и неизбежно сопутствующие ей продольные волны, падающие с углами, отличными от первого критического, в материале объекта контроля трансформируются в поле продольной подповерхностной волны (4, рис. 3, с-ф) [11].

Поле продольной подповерхностной волны влечет за собой распространение боковой поперечной волны, отходящей в нижней среде от границы под третьим [1] критическим углом (5, рис. 3, с-ф) [11].

В результате трансформации продольной волны в объекте контроля также распространяется поперечная волна с углом ввода, равным третьему критическому углу (6, рис. 3, с-г).

Продольная подповерхностная волна распространяется со скоростью несколько большей, чем скорость продольной волны [1, 11], и первая достигает границы раздела объект контроля-приемник (4, рис. 3, е).

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Table 1. Initial data for simulation

Параметр		Элемент моделирования	
		Призма	Объект контроля
Материал		оргстекло	сталь
Плотность ρ , кг/м ³		1190	7700
Параметры Ламе	μ	0,33	0,35
	λ , ГПа	268	8,48
Толщина H , м		—	0,01; 0,02; 0,03; 0,04
Угол ввода колебаний α , град		27,5	
База ОАП L , м		0,03	

Следом за ней границы раздела достигает поверхностная волна (3, рис. 3, е).

На границе раздела вновь наблюдаются явления преломления и трансформации, и в призме приемника распространяется только продольная волна (7, рис. 3, ф, г) значительно меньшей амплитуды (контраст рис. 3, ф намеренно увеличен, чтобы волна 7 была различима). В некоторый момент времени продольная волна 7 достигает приемник акустических колебаний (рис. 3, г).

Поперечная волна достигает донной поверхности объекта контроля (6, рис. 3, г) и отражается от нее (8, рис. 3, h). При определенных соотношения базы L ОАП и толщины объекта контроля H , отраженная поперечная волна также может быть зафиксирована приемником ОАП.

На рис. 4 приведен пример А-скана (изменение амплитуды колебаний частиц твердого тела на приемнике ОАП по времени), полученного по результатам моделирования для объекта контроля толщиной 0,02 м.

Результаты эксперимента

Выполним эксперимент с использованием прямоугольных образцов со следующими параметрами: габаритные размеры — $0,07 \times 0,07$ м; толщины — 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 м; материал — сталь 40Х13. Измерения проведены с помощью ОАП ПЛУ-6Н-02 (ООО «ЛИНКС 2000», Россия) (рис. 5) и лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М (ООО «ЛИНКС 2000», Россия). В составе УДЛ-2М использован лазер с диодной накачкой (длительность импульса — 70–80 нс, энергия в импульсе — 100 мкДж, частота повторения импульсов — 1000 Гц).

Поочередно на каждый образец был установлен ОАП ПЛУ-6Н-02, с помощью которого проведено 20 измерений времени прихода продольной подповерхностной волны на приемник. С помощью лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М сформирован А-скан (рис. 6).

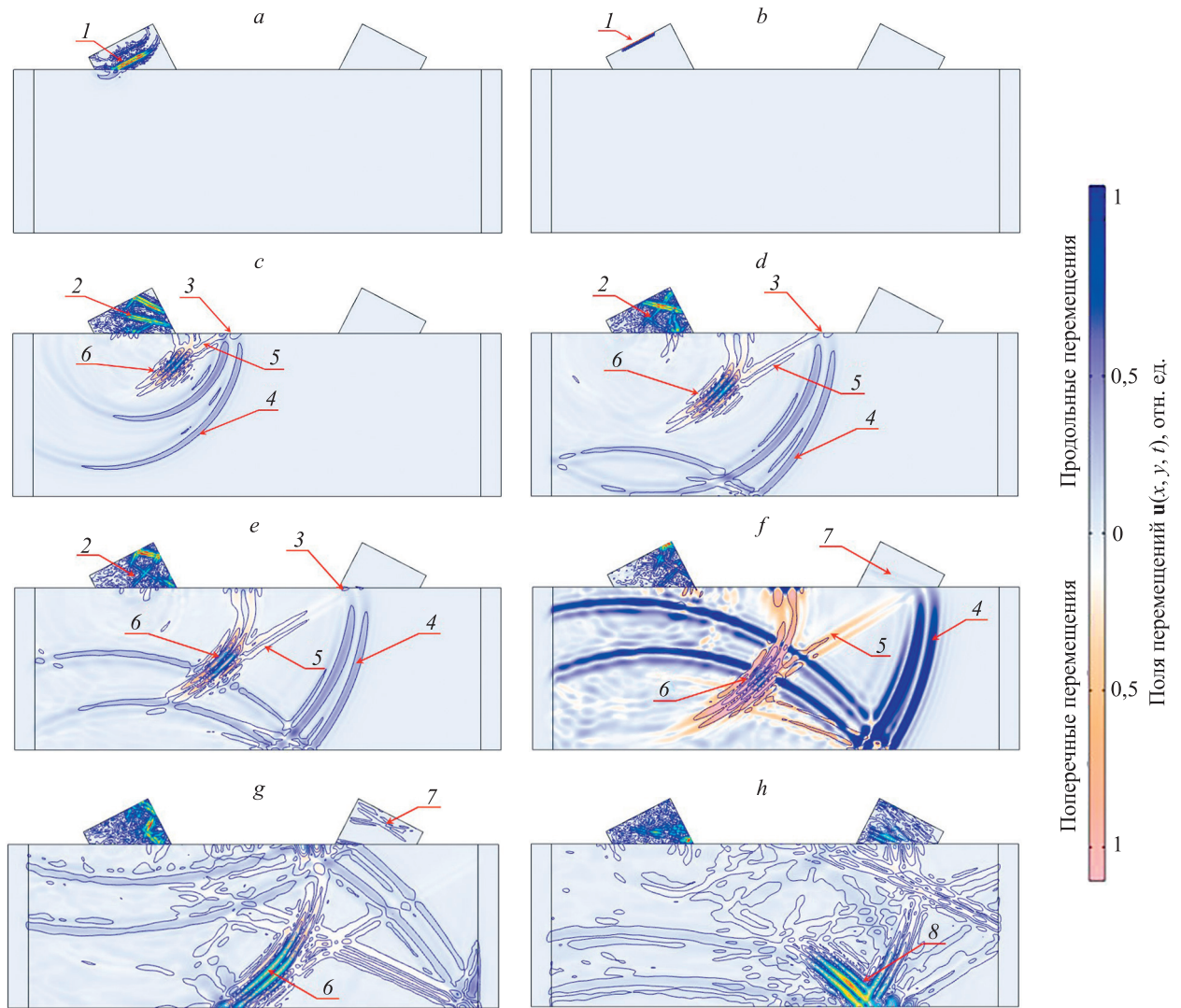


Рис. 3. Распределение полей перемещений $u(x, y, t)$ в моменты времени: 0,2 мкс (а); 2 мкс (б); 4,5 мкс (с); 6 мкс (д); 7 мкс (е); 8 мкс (ф); 10 мкс (г); 13 мкс (h).

1 — продольная волна в призме генератора; 2 — многократно переотражаемые волны в призме генератора; 3 — поверхностная волна; 4 — фронт продольной подповерхностной волны; 5 — поперечная волна, связанная с распространением продольной подповерхностной волны; 6 — поперечная волна, связанная с трансформацией продольной волны; 7 — продольная волна в призме приемника; 8 — поперечная волна, отраженная от донной поверхности объекта контроля

Fig. 3. Distribution of displacement fields $u(x, y, t)$ at times 0.2 μ s (a); 2 μ s (b); 4.5 μ s (c); 6 μ s (d); 7 μ s (e); 8 μ s (f); 10 μ s (g); 13 μ s (h).

1 — longitudinal wave in the generator prism; 2 — repeatedly re-reflected waves in the prism of the generator; 3 — surface wave; 4 — longitudinal subsurface wave front; 5 — transverse wave associated with the propagation of a longitudinal subsurface wave; 6 — transverse wave associated with the transformation of the longitudinal wave; 7 — longitudinal wave in the prism of the receiver; 8 — transverse wave reflected from the bottom surface of the test object

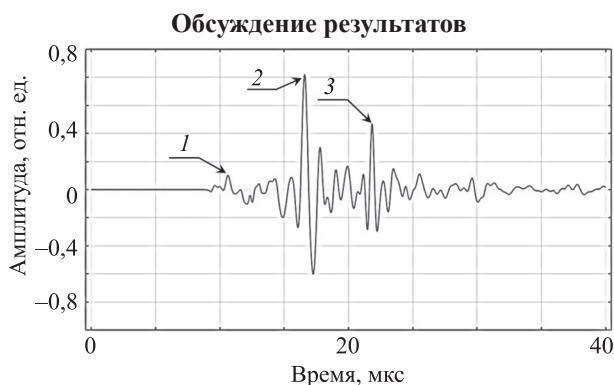


Рис. 4. А-скан, полученный по результатам моделирования на объекте контроля толщиной 0,02 м: 1 — продольная подповерхностная волна; 2 — поверхностная волна; 3 — поперечная волна, отраженная от донной поверхности

Fig. 4. A-scan obtained from the results of modeling on a test object with a thickness of 0.02 m: 1 — longitudinal subsurface wave; 2 — surface wave; 3 — transverse wave reflected from the bottom surface

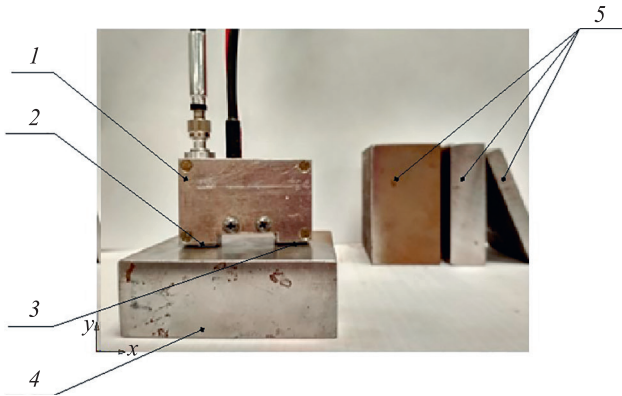


Рис. 5. Общий вид оптико-акустического преобразователя ПЛУ-6Н-02 и образцов: 1 — корпус; 2 — призма генератора; 3 — призма приемника; 4 — образец толщиной 0,03 м; 5 — образцы толщиной 0,01, 0,02 и 0,04 м

Fig. 5. View of the optical-acoustic transducer ПЛУ-6Н-02 and samples: 1 — casing; 2 — generator prism; 3 — receiver prism; 4 — sample of 0.03 m thick; 5 — samples with a thickness of 0.01, 0.02 and 0.04 m

А-сканы, полученные в результате моделирования и при проведении эксперимента (рис. 4, 6), имеют отличия, обусловленные следующими причинами:

- вычислительные средства не позволяют уменьшить шаг моделирования по времени, поэтому длительность сигналов, полученных при моделировании, больше, чем при проведении эксперимента;
- конечно-элементная модель ОАП имеет идеальную конструкцию (генератор и приемник акустических колебаний изолированы друг от друга, соединительные элементы не оказывают влияния и др.) в отличие от реального ОАП, поэтому на рис. 6 наблюдаются собственные шумы ОАП (4, рис. 6), которые отсутствуют на рис. 4;
- справочные исходные данные для моделирования (табл. 1) не совсем соответствуют реальным свойствам материалов преломляющей призмы ОАП и образцов, поэтому время регистрации акустических сигналов при моделировании и при проведении эксперимента отличается.

Тем не менее, полученная модель позволила идентифицировать сигналы, регистрируемые с помощью ОАП ПЛУ-6Н-02 и выделить собственный шум ОАП (4, рис. 6).

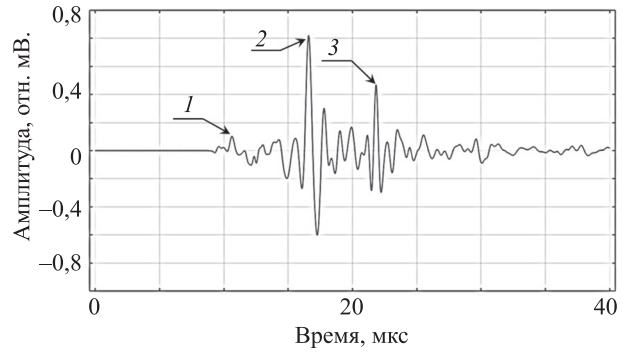


Рис. 6. А-скан, полученный в результате эксперимента при толщине образца 0,02 м: 1 — продольная подповерхностная волна; 2 — поверхностная волна; 3 — поперечная волна, отраженная от донной поверхности; 4 — собственный шум оптико-акустического преобразователя

Fig. 6. A-scan obtained as a result of the experiment with a thickness of the sample of 0.02 m: 1 — longitudinal subsurface wave; 2 — surface wave; 3 — transverse wave reflected from the bottom surface; 4 — inherent noise of the optical-acoustic transducer

В табл. 2 приведены значения времени прихода продольной подповерхностной волны на приемник ОАП, полученные по результатам моделирования и эксперимента.

Важнейший этап разработки математической модели — оценка ее адекватности, достоверности отображения в модели заданных свойств объекта-оригинала (акустического тракта ОАП). Адекватность целесообразно оценивать критерием, который определяет в количественной мере различие свойств, отображаемых в модели или рассчитываемых с ее помощью, и свойств объекта-оригинала [19]. Один из методов оценки согласованности расчетных значений и результатов экспериментов — *F*-тест. Примем нулевую гипотезу: предположение о том, что между результатами моделирования и эксперимента разница равна нулю и различия между ними носят не систематический, а случайный характер. Гипотеза подтверждается в том случае, если критерий Фишера *F*, рассчитанный для двух выборок времени прихода продольной подповерхностной волны на приемник ОАП (табл. 2), не превысит критического значения критерия Фишера $F_{кр}$, определяемого по справочным таблицам для четырех значений в каждой выборке $F_{кр} = 6,39$ при доверительной вероятности $p = 0,05$ [20].

Таблица 2. Времена прихода продольной подповерхностной волны на приемник оптико-акустического преобразователя по результатам моделирования и эксперимента, полученные на образцах разной толщины

Table 2. The arrival times of a longitudinal subsurface wave at the optical-acoustic transducer receiver according to the simulation results and experimental results obtained on the samples of different thicknesses

Параметры		Значения в выборке			
Толщина объекта контроля, м		0,01	0,02	0,03	0,04
Время прихода продольной подповерхностной волны на приемник ОАП, мкс	по результатам моделирования	10,67	10,63	10,64	10,62
	по результатам эксперимента	10,07 ± 0,1	10,13 ± 0,1	10,15 ± 0,1	10,11 ± 0,1

Таблица 3. Промежуточные расчеты для определения критерия Фишера
 Table 3. Intermediate calculations for determining the Fisher criterion

Значение параметра	Результаты	
	моделирования	эксперимента
Максимальное значение в выборке σ_{imax} , мкс	10,67	10,15
Минимальное значение в выборке σ_{imin} , мкс	10,62	10,07
Количество значений в выборке	4	4
Дисперсия, мкс	0,0125	0,0200
Критическое значение критерия Фишера $F_{кр}$ (при $p = 0,05$)	6,39	
Рассчитанное значение критерия Фишера F	2,56	

Вычислим критерий Фишера:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 — дисперсии времени прихода продольной подповерхностной волны по результатам моделирования и эксперимента, причем σ_1 — большая.

Рассчитаем дисперсии времени прихода продольной подповерхностной волны:

$$\sigma = \frac{\sigma_{imax} - \sigma_{imin}}{K},$$

где $\sigma_{imax}, \sigma_{imin}$ — максимальное и минимальное значения в выборке; K — количество значений в выборке.

Исходные данные и промежуточные расчеты для F -теста приведены в табл. 3.

Критерий Фишера, вычисленный по формуле (1), составил $F = 2,56, F < F_{кр}$. Следовательно, подтверждается нулевая гипотеза, т. е. разработана адекватная конечно-элементная модель акустического тракта ОАП, отражающая его основные свойства.

Литература

1. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. 4-е изд., перераб. СПб.: СВЕН, 2014. 312 с.
2. Ключев В.В. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Карабутов А.А., Нгуен Суан Мань, Фам Мань Хао, Черепецкая Е.Б., Шибаев И.А. О возможности контроля структуры и свойств фибробетона методом лазерно-ультразвуковой структуроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 32–41.
4. Stepanova K.A., Kinzhagulov I.Y., Yakovlev Y.O., Kovalevich A.S., Ashikhin D.S., Alifanova I.E. Applying laser-ultrasonic and acoustic-emission methods to nondestructive testing at different stages of deformation formation in friction stir welding // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. N 3. P. 191–200. <https://doi.org/10.1134/S1061830920030122>
5. Marusina M.Y., Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V. Evaluation of the influence of external factors in ultrasonic testing of stress-strain states // Measurement Techniques. 2017. V. 59. N 11. P. 1165–1169. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1109-3>
6. Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E., Berkutov I.V., Bychenok V.A., Tkacheva N.V., Mayorov A.L. Development of acoustic methods of control of the stress-strain state of threaded connection // Measurement Techniques. 2018. V. 61. N 3. P. 297–302. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1424-3>
7. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана конечно-элементная модель акустического тракта раздельно-совмещенного оптико-акустического преобразователя. Качественная адекватность модели подтверждена посредством сравнения А-сканов, полученных в результате моделирования и эксперимента. Количественная адекватность подтверждена с помощью F -теста по результатам натурального эксперимента по измерению времени прихода продольной подповерхностной волны на приемник оптико-акустического преобразователя.

Разработанная конечно-элементная модель позволила проанализировать регистрируемые оптико-акустическим преобразователем акустические сигналы и выделить сигнал продольной подповерхностной волны. В дальнейшем модель может быть использована при проектировании новых оптико-акустических преобразователей.

References

1. Kretov E.F. *Ultrasonic Flaw Detection in Power Engineering*. St. Petersburg, SVEN Publ., 2014, 312 p. (in Russian)
2. Kliuev V.V. *Non-Destructive Testing. V.3. Ultrasonic Examination*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 864 p. (in Russian)
3. Karabutov A.A., Nguen Xuan Man, Pham Manh Hao, Cherepetskaya E.B., Shibaev I.A. The possibility of controlling the structure and properties of fiber-reinforced concrete method of laser-ultrasonic structuroscopy. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2016, no. 7, pp. 32–41. (in Russian)
4. Stepanova K.A., Kinzhagulov I.Y., Yakovlev Y.O., Kovalevich A.S., Ashikhin D.S., Alifanova I.E. Applying laser-ultrasonic and acoustic-emission methods to nondestructive testing at different stages of deformation formation in friction stir welding. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 191–200. <https://doi.org/10.1134/S1061830920030122>
5. Marusina M.Y., Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V. Evaluation of the influence of external factors in ultrasonic testing of stress-strain states. *Measurement Techniques*, 2017, vol. 59, no. 11, pp. 1165–1169. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1109-3>
6. Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E., Berkutov I.V., Bychenok V.A., Tkacheva N.V., Mayorov A.L. Development of acoustic methods of control of the stress-strain state of threaded connection. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 297–302. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1424-3>
7. Nikitina N.E. *Acoustoelasticity. Practical Experience*. Nizhny Novgorod, TALAM Publ., 2005, 208 p. (in Russian)

8. Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V., Alifanova I.E., Khoshev A.E. Methodology for assessing the uncertainty of measurements of mechanical stresses by the ultrasonic method with the help of an optical-acoustic separate-combined transducer // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2127. N 1. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012036>
9. Федоров А.В., Быченко В.А., Беркутов И.В., Алифанова И.Е. Методика оценки неопределенности измерений механических напряжений ультразвуковым методом с помощью оптико-акустического раздельно-совмещенного преобразователя // *Контроль. Диагностика*. 2021. Т. 24. № 7(277). С. 56–61. <https://doi.org/10.14489/td.2021.07.pp.056-061>
10. Карабутов А.А. Лазерно-ультразвуковой дефектоскоп. Патент RU2381496C1. Бюл. 2010. № 4.
11. Разыграев Н.П. Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами // *Дефектоскопия*. 2020. № 9. С. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0130308220090018>
12. Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г. Особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние геометрических параметров объекта // *Приборы и методы измерений*. 2018. Т. 9. № 4. С. 325–336. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336>
13. Петров К.В. Зеркально-теневой метод контроля цилиндрических изделий с использованием электромагнитно-акустических преобразователей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Ижевск, 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2020/retrov/retrov-k.v.-dissertaciya.pdf>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 19.01.2022).
14. Тапков К.А. Научное обоснование методики оценки остаточных напряжений в дифференцированно-упрочненных рельсах на основе явления акустоупругости и математического моделирования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова. Ижевск, 2020 [Электронный ресурс]. URL: <http://udman.ru/ru/scientific-activity/dissertation-council/protection/dissertatsiya-tapkova-kirilla-aleksandroviicha/> Тапков%20К.А.%20-%20Диссертация.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 19.01.2022).
15. Беркутов И.В. Исследование и разработка метода акустической тензометрии специальных резьбовых соединений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / СПбГУ ИТМО. СПб., 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009876980> (дата обращения: 19.01.2022).
16. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
17. Янкин С. DG-FEM: новая технология для масштабных расчетов распространения акустических и упругих волн в COMSOL Multiphysics® [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.ru/video/dg-fem-new-technology-for-acoustic-and-elastic-wave-modeling-on-large-scales-in-comsol-webinar-ru>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 19.01.2022).
18. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: учебное пособие. М.: Наука, 1977. 736 с.
19. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Оценка адекватности компьютерной модели оптико-электронной системы ее заданным свойствам // *Известия вузов. Приборостроение*. 2009. Т. 52. № 9. С. 63–67.
20. Орлов В.Ю., Волков Е.М. Основы статистической обработки результатов научного эксперимента: метод. указания. Ярославль: ЯрГУ, 2014. 68 с.
8. Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V., Alifanova I.E., Khoshev A.E. Methodology for assessing the uncertainty of measurements of mechanical stresses by the ultrasonic method with the help of an optical-acoustic separate-combined transducer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2127, no. 1, pp. 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012036>
9. Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V., Alifanova I.E. Methodology for evaluation the uncertainty of measurement of mechanical stress by the ultrasonic method with the help of an optical-acoustic separate-combined transducer. *Testing. Diagnostics*, 2021, vol. 24, no. 7(277), pp. 56–61. (in Russian). <https://doi.org/10.14489/td.2021.07.pp.056-061>
10. Karabutov A.A. Laser ultrasonic flaw detector. *Patent RU2381496C1*. 2010. (in Russian)
11. Razygraev N.P. Physics, terminology and technology in ultrasonic testing with head waves. *Defektoskopiya*, 2020, no. 9, pp. 3–19. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0130308220090018>
12. Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V., Zhavoronkov K.G. Features of the surface and subsurface waves application for ultrasonic evaluation of physicomechanical properties of solids. Part 1. Influence of the geometrical parameters. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 325–336. (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336>
13. Petrov K.V. *Shadow-mirror technique for testing cylindrical products using electromagnetic acoustic transducers*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 2020. Available at: <https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2020/retrov/retrov-k.v.-dissertaciya.pdf> (accessed: 19.01.2022). (in Russian)
14. Tapkov K.A. *Scientific substantiation of the methodology for estimating the residual stresses in differentially hardened rails based on the acoustoelasticity phenomenon and mathematical simulation*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 2020. Available at: <http://udman.ru/ru/scientific-activity/dissertation-council/protection/dissertatsiya-tapkova-kirilla-aleksandroviicha/> Тапков%20К.А.%20-%20Диссертация.pdf (accessed: 19.01.2022). (in Russian)
15. Berkutov I.V. *Research and development of the acoustic tensometry method for special threaded connections*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. ITMO University, 2018. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009876980> (accessed: 19.01.2022). (in Russian)
16. Ermolov I.N. *Theory and Practice of Ultrasonic Testing*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 240 p. (in Russian)
17. Iankin S. *DG-FEM: new technology for large scale calculations of acoustic and elastic wave propagation in COMSOL Multiphysics®*. Available at: <https://www.comsol.ru/video/dg-fem-new-technology-for-acoustic-and-elastic-wave-modeling-on-large-scales-in-comsol-webinar-ru> (accessed: 19.01.2022). (in Russian)
18. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Equations of Mathematical Physics*. Moscow, Nauka Publ., 1977, 736 p. (in Russian)
19. Torshina I.P., Yakushenkov Y.G. Valuation of adequacy for computer model of opto-electronic system. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, vol. 52, no. 9, pp. 63–67. (in Russian)
20. Orlov V.Iu., Volkov E.M. *Basics of the Statistical Processing of Scientific Experiment Results*. Yaroslavl, Yaroslavl State University Publ., 2014, 68 p. (in Russian)

Авторы

Федоров Алексей Владимирович — доктор технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, orcid.org/0000-0003-0612-922X, afedor62@yandex.ru

Быченко Владимир Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, orcid.org/0000-0002-6126-3547, bychenok-vladimir@mail.ru

Authors

Alexey V. Fedorov — D.Sc., Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, orcid.org/0000-0003-0612-922X, afedor62@yandex.ru

Vladimir A. Bychenok — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, orcid.org/0000-0002-6126-3547, bychenok-vladimir@mail.ru

Беркутов Игорь Владимирович — кандидат технических наук, руководитель центра неразрушающего контроля, Учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники» (ИКЦ СЭКТ), Санкт-Петербург, 197343, Российская Федерация, [sc 56487628800](https://orcid.org/0000-0001-8493-7324), <https://orcid.org/0000-0001-8493-7324>, chigivara56712@mail.ru

Алифанова Ирина Евгеньевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57217058499](https://orcid.org/0000-0002-7649-8007), <https://orcid.org/0000-0002-7649-8007>, shebaairina@mail.ru

Igor V. Berkutov — PhD, Head of the Center for Non-Destructive Testing, Center of Supporting the Operation of Space Technology, Saint Petersburg, 197343, Russian Federation, [sc 56487628800](https://orcid.org/0000-0001-8493-7324), <https://orcid.org/0000-0001-8493-7324>, chigivara56712@mail.ru

Irina E. Alifanova — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57217058499](https://orcid.org/0000-0002-7649-8007), <https://orcid.org/0000-0002-7649-8007>, shebaairina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2021
Одобрена после рецензирования 20.01.2022
Принята к печати 17.03.2022

Received 21.12.2021
Approved after reviewing 20.01.2022
Accepted 17.03.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»