

Модель формирования акустических характеристик твердых сред с упорядоченной трещиноватостью

К. Е. Аббакумов^{1✉}, А. В. Вагин¹, А. А. Вьюгинова¹, И. Г. Сидоренко¹, С. С. Сергеев²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-российский университет", Могилев, Республика Беларусь

✉ keabbakumov@etu.ru

Аннотация

Введение. Появление новых конструкционных материалов и совершенствование имеющихся технологий изготовления из них новых видов изделий приводят к появлению новых видов нарушений сплошности. В связи с этим актуальной для целей неразрушающего контроля и структурометрии является задача разработки новых моделей нарушений сплошности, учитывающих ранее не принимавшиеся во внимание параметры.

Цель работы. Теоретическое описание процессов распространения упругих волн через среду, содержащую упорядоченную решетку микротрещин с граничными условиями в приближении "линейного скольжения", модернизированными с учетом параметров микровыступов шероховатых границ микротрещин. Формирование базы данных для экспериментальных исследований при определении физико-механических характеристик конструкционных материалов.

Материалы и методы. Акустические характеристики материалов определялись на основе вывода и решений дисперсионных уравнений, описывающих образование и распространение в упругих средах с упорядоченной трещиноватостью эффективных продольных и поперечных, а также поверхностных волн.

Результаты. Результаты моделирования процессов формирования упругих волн показали, что увеличение концентрации микротрещин приводит к уменьшению значений фазовых скоростей эффективных продольных, поперечных и поверхностных волн и повышению коэффициентов затухания при заданных значениях частоты ультразвука и параметров материала.

Заключение. Учетные параметры модели: среднее значение радиуса микросферы, замещающей микровыступ поверхности, и параметр шероховатости R_z существенно влияют на формирование физико-механических характеристик материалов, определяемых по результатам ультразвуковых измерений. Разработанная модель может рекомендоваться в качестве научной базы для интерпретации результатов ультразвуковых измерений.

Ключевые слова: упругая твердая среда, упорядоченная трещиноватость, шероховатость поверхностей микротрещин, ультразвуковые измерения, эффективные скорости объемных волн, физико-механические характеристики конструкционных материалов

Для цитирования: Модель формирования акустических характеристик твердых сред с упорядоченной трещиноватостью / К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин, А. А. Вьюгинова, И. Г. Сидоренко, С. С. Сергеев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 94–102. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-94-102

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2023; принята к публикации после рецензирования 07.11.2023; опубликована онлайн 29.12.2023

Formation Model for Acoustic Characteristics of Solid Media with Ordered Fracturing

Konstantin E. Abbakumov^{1✉}, Anton V. Vagin¹, Alena A. Vjuginova¹,
Irina G. Sidorenko¹, Sergey S. Sergeev²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Inter-State Educational Institution of Higher Education
"Belarusian-Russian University", Mogilev, Republic of Belarus

✉ keabbakumov@etu.ru

Abstract

Introduction. The development of new structural materials and improvement of existing technologies for the production of new products on their basis lead to the emergence of new types of medium discontinuities. Therefore, the development of new models of discontinuities that take the previously ignored parameters into account seems to be relevant for the purposes of nondestructive testing and structural measurements. This concerns, e.g., the roughness of adjacent surfaces of microcrack ordered sets.

Aim. Theoretical substantiation for the processes of elastic waves propagation through an elastic medium containing an ordered lattice of microcracks with boundary conditions in the linear slip approximation, modified by taking into account the parameters of micro-convexities of microcrack rough boundaries. Database formation for experimental studies aimed at determining the physical and mechanical characteristics of structural materials.

Materials and methods. The acoustic characteristics of materials were determined based on the derivation and solutions of dispersion equations describing the formation and propagation of effective longitudinal, transverse, and Rayleigh surface elastic waves in elastic media with ordered cracking. Their values were also used to determine the effective speed of Rayleigh surface waves.

Results. The conducted simulation of elastic wave formation processes showed that an increase in the concentration of microcracks leads to a decrease in the phase velocities of effective longitudinal, transverse, and surface waves, as well as to an increase in the attenuation coefficients at given ultrasound frequencies and material parameters.

Conclusion. The radius of the microsphere that replaces the surface micro-convexity and the roughness parameter R_z have a significant impact on the formation of physical and mechanical characteristics of materials, which are determined by the results of ultrasonic measurements. The developed model can be recommended as a basis for interpreting the results of ultrasonic measurements.

Keywords: elastic solid medium, ordered cracking, roughness of microcrack surface, ultrasonic measurements, effective speed of longitudinal and transverse waves, physical and mechanical characteristics of structural materials

For citation: Abbakumov K. E., Vagin A. V., Vjuginova A. A., Sidorenko I. G., Sergeev S. S. Formation Model for Acoustic Characteristics of Solid Media with Ordered Fracturing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 94–102. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-94-102

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.09.2023; accepted 07.11.2023; published online 29.12.2023

Введение. В настоящее время вопросам моделирования свойств разнообразных несплошностей (дефектов) уделяется значительное внимание из-за возможности использования этих моделей для описания свойств как новых видов несплошностей, сопровождающих новые виды технологий изготовления перспективных конструкционных материалов, так и несплошностей материалов, изготавливаемых

по традиционным технологиям. Этому вопросу, например, посвящены материалы [1–20]. В частности, в [20] разработана модель взаимодействия плоских упругих продольных волн с упругой средой, содержащей ориентированные микротрещины, обладающие особенностью граничных условий в приближении "линейного скольжения". Определен, в приближении теории волн Блоха и Флокé, вид дисперсии

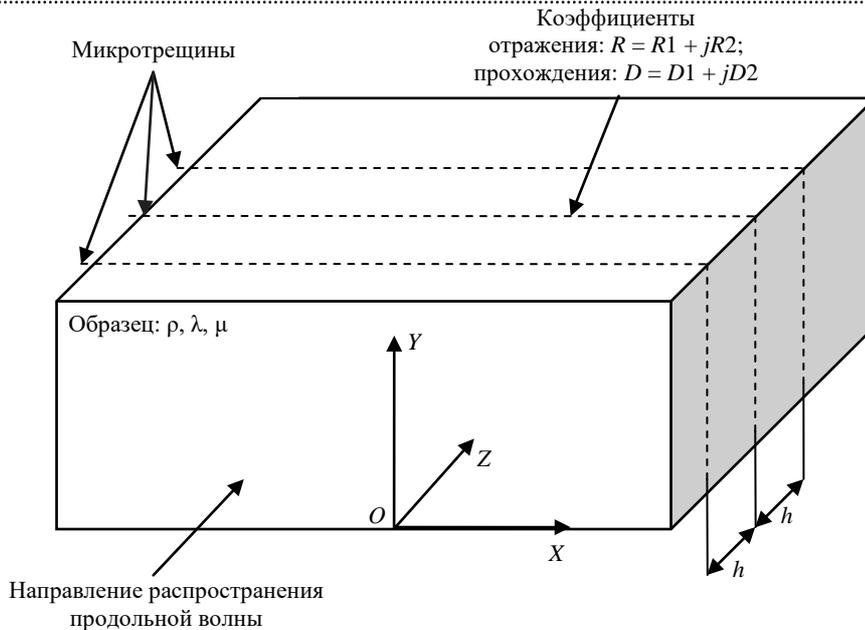


Рис. 1. Схема образования эффективной продольной волны при прохождении ультразвука через области металла с ориентированной трещиноватостью и фрагмент записи граничных условий в приближении "линейного скольжения"

Fig. 1. Formation scheme of an effective longitudinal ultrasonic wave through metal areas with oriented cracking and a fragment of recording boundary conditions in the linear slip approximation

онного уравнения. Получены и проанализированы результаты его решения, определяющие характер зависимостей фазовой скорости распространения и коэффициента затухания эффективной продольной (и поперечной) волны от параметров микрошероховатости берегов трещин и других параметров модели. Как показал опыт использования результатов работы [20], выбранная для расчетов система параметров оказывается не всегда удобной из-за их зависимости друг от друга в рамках применяемой модели замещения естественных шероховатостей поверхностей микротрещин микровыступами сферической формы. В рамках данной статьи предлагается устранить этот недостаток и одновременно распространить результаты работы [20] и на случай формируемой в микротрещиноватой среде эффективной поверхностной волны.

Следуя постановке задачи в [20], с учетом введенной модели трещиноватой среды (рис. 1) в качестве независимых параметров выбирались: a – радиус кривизны замещающей микровыступ сферы; R_z – параметр шероховатости сопрягаемых поверхностей микротрещин.

Модернизация вывода дисперсионных уравнений. Рассматривался процесс распространения плоской продольной волны в

направлении оси Z декартовой системы координат (рис. 1). Во всем объеме среды образца с параметрами: ρ – плотность; λ , μ – коэффициенты Ламэ [4] считались расположенными плоскостные протяженные неоднородности, параллельные друг другу и плоскости XOY . Каждая из этих неоднородностей обладала комплексными коэффициентами отражения: $R = R_1 + jR_2$ и прохождения: $D = D_1 + jD_2$, где R_1 , D_1 и R_2 , D_2 – их вещественные и мнимые части соответственно. Расстояние между несплошностями полагалось равным h . Для гармонических волновых процессов с частотой ω предполагалось существенное превосходство длины продольной волны над расстоянием между несплошностями: $\lambda \gg h$ (низкочастотное приближение).

Особенностью строения микротрещин предполагалось взаимодействие их границ в приближении "линейного скольжения" [12, 16], в которых коэффициенты контактной нормальной и тангенциальной жесткостей с учетом параметров a и R_z принимали вид:

$$KGN(k) = \frac{\rho c_1^3}{2} \frac{\xi(a, R_z)}{fd(a, R_z)^2 [1 - \xi(a, R_z)]}; \quad (1)$$

$$\text{KGT}(k) = \frac{\rho c_t^3}{2} \frac{\xi(a, R_z)}{fd(a, R_z)^2 [1 - \xi(a, R_z)]}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала; c_l и c_t – скорости объемных продольной и поперечной волн соответственно; $\xi(a, R_z) = 1 - \frac{2(1 - 2\pi/9)aR_z - R_z^2}{2aR_z - R_z^2}$ – коэффициент перфорации; f – частота ультразвука; $d(a, R_z) = 2\sqrt{2aR_z - R_z^2}$ – среднее расстояние между микровыступами.

Результаты численных исследований.

В качестве примера на рис. 2, а, б приведены результаты вычислений по формулам (1), (2). В качестве материала выбрана углеродистая сталь. Частота ультразвука составляла 1 МГц.

Видно, что нормальная контактная жесткость превосходит тангенциальную во всем диапазоне изменений учитываемых параметров и при заданной частоте ультразвука для известного материала.

Как и для другой системы параметров, нормальная жесткость превосходит тангенциальную, а рост радиуса замещающего сферического микроконтакта и параметра шероховатости приближают свойства граничной области микротрещин к условиям "свободной" границы.

Далее, по аналогии с [20], зависимости (1), (2) подставлялись в выражения для коэффициентов отражения и прохождения [20]. На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости для модулей коэффициентов отражения и прохождения для продольных и поперечных волн при их нормальном падении.

Полученные зависимости для вещественных и мнимых частей коэффициентов отражения и прохождения использовались при составлении дисперсионных уравнений, определяющих значения фазовых скоростей эффективных продольной и поперечной волн и значения соответствующих коэффициентов затухания (рис. 4).

Аналогичные вычисления проводились и для объемной поперечной волны, результаты которых представлены на рис. 5 и 6.

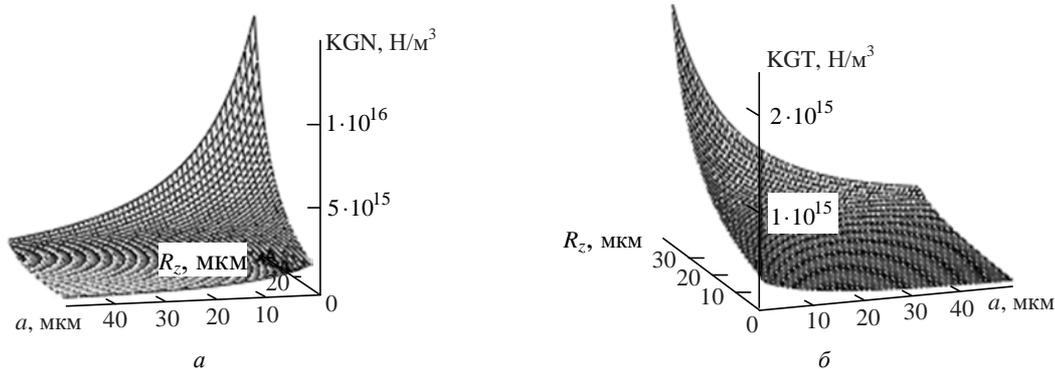


Рис. 2. Зависимости контактных жесткостей от радиуса замещающего сферического выступа: а – нормальной; б – тангенциальной
 Fig. 2. Dependences of boundary stiffness on the radius of the replacement spherical convexity: а – normal; б – tangential

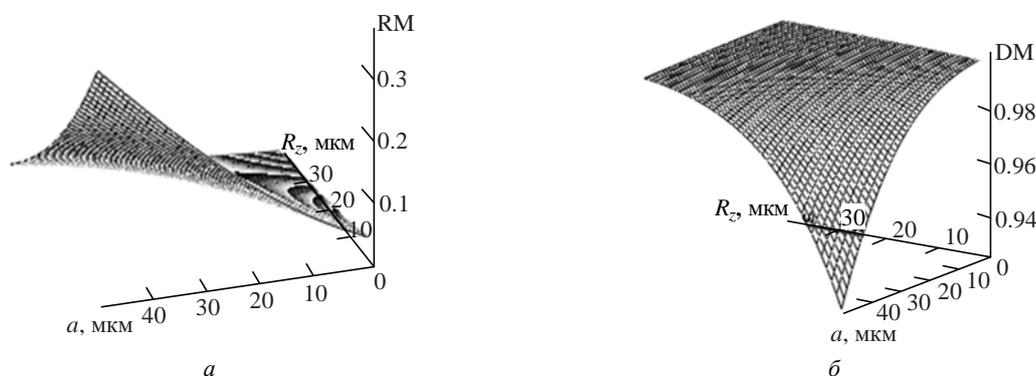


Рис. 3. Зависимости модулей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) от радиуса замещающего сферического выступа и параметра шероховатости для продольной волны

Fig. 3. Dependences of modules of reflection (а) and transmission (б) coefficients on the radius of the replacement spherical convexity and roughness parameter for longitudinal wave

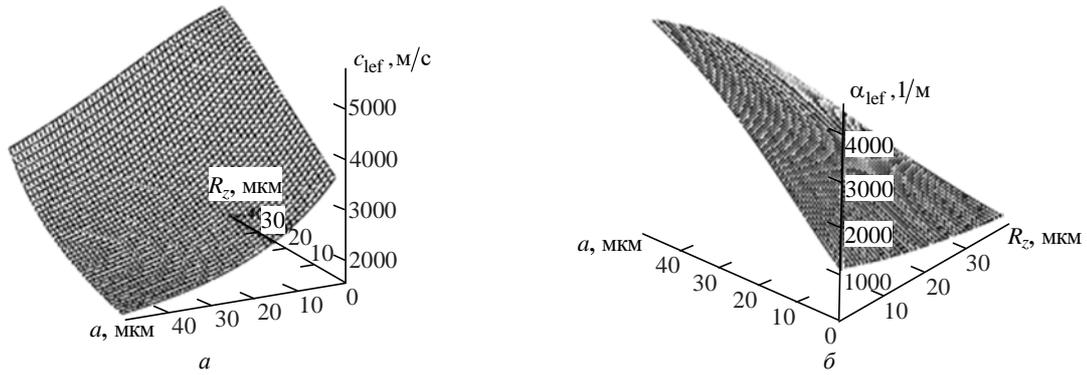


Рис. 4. Зависимости фазовой скорости эффективной продольной волны (а) и ее коэффициента затухания (б) от радиуса замещающего сферического выступа и параметра шероховатости. Частота ультразвука – 1 МГц; материал – сталь

Fig. 4. Dependences of effective longitudinal wave phase velocity (a) and its attenuation coefficient (b) on the radius of the replacement spherical convexity and roughness parameter. Ultrasound frequency – 1 MHz; material – steel

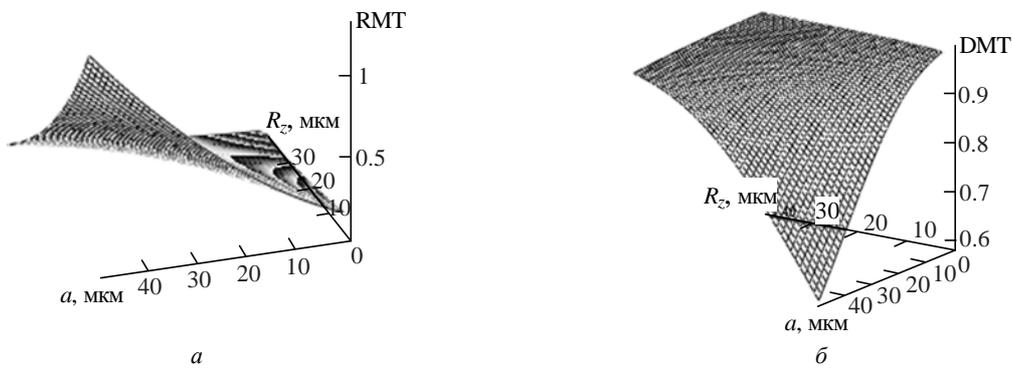


Рис. 5. Зависимости модулей коэффициентов отражения (а) и прохождения (б) от радиуса замещающего сферического выступа и параметра шероховатости для поперечной волны

Fig. 5. Dependences of modules of reflection (a) and transmission (b) coefficients on the radius of the replacement spherical convexity and roughness parameter for transverse wave

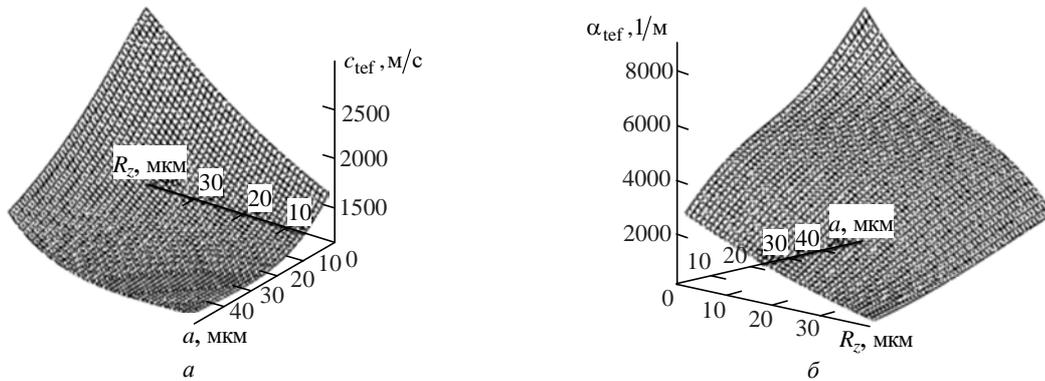


Рис. 6. Зависимости фазовой скорости (а) и коэффициента затухания эффективной поперечной волны (б) от радиуса замещающего сферического выступа и параметра шероховатости

Fig. 6. Dependences of the phase velocity (a) and the attenuation coefficient (b) of the effective transverse wave on the radius of the replacement spherical convexity and roughness parameter

Анализ результатов показал, что наличие микротрещин заметно сказывается как на значениях фазовых скоростей продольной и поперечной волн, так и на значениях их коэффициентов затухания. При этом увеличение концентрации микротрещин способствует уменьшению значений фазовых скоростей и

повышению коэффициентов затухания при заданных значениях частоты ультразвука и параметров материала. Фазовая скорость эффективной продольной волны выше, чем у поперечной, а коэффициент затухания поперечной волны может превосходить коэффициент затухания продольной волны.

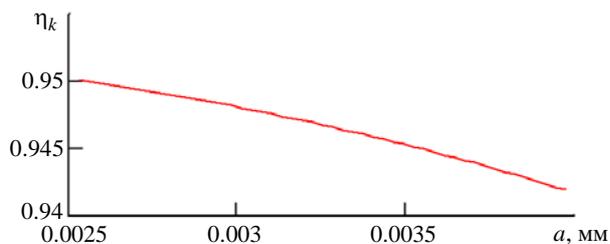


Рис. 7. Зависимость фазовой скорости эффективной поверхностной волны от радиуса замещающего сферического выступа при заданном значении параметра шероховатости

$R_z = 200 \cdot 10^{-6}$ м; частота ультразвука $f = 1$ МГц;

материал – сталь

Fig. 7. Dependence of the phase velocity of the surface wave on the radius of the replacement spherical convexity – a at the roughness value – $R_z = 200 \cdot 10^{-6}$ m;

ultrasound frequency $f = 1$ MHz; material – steel

Полученные соотношения для фазовых скоростей объемных продольной и поперечной волн были использованы для численного решения дисперсионного уравнения, определяющего значения фазовой скорости поверхностной волны (волны Рэлея) в соответствии с [15]. На рис. 7 в качестве примера приведены результаты численного решения дисперсионного

уравнения для определения скорости эффективной поверхностной волны по отношению к скорости эффективной поперечной.

Как следует из результатов анализа полученных графиков, рост концентрации микротрещин сопровождается уменьшением значения фазовой скорости эффективной поверхностной волны.

Выводы. Описанная в статье модель с учетом новой системы независимых параметров в значительно большей степени удовлетворяет требованиям практики при обосновании задач определения физико-механических характеристик конструкционных материалов при интерпретации результатов ультразвуковых измерений.

Представленные в настоящей статье аналитические и численные результаты совместно с [20], обладая самостоятельным значением, могут также быть положены в основу структурометрических задач по отношению как к известным, так и к новым материалам, имеющим перспективы использования как в гражданской технике, так и в технике специального назначения.

Авторский вклад

Аббакумов Константин Евгеньевич – общая идея разработки теоретических предложений для моделирования.

Вагин Антон Владимирович – вывод аналитических соотношений.

Вьюгинова Алена Александровна – компьютерное моделирование; формирование структуры статьи.

Сидоренко Ирина Геннадьевна – обработка результатов моделирования и частных численных оценок.

Сергеев Сергей Сергеевич – формирование структуры статьи; анализ результатов моделирования.

Author's contribution

Konstantin E. Abbakumov, general idea of developing theoretical proposals for modeling.

Anton V. Vagin, derivation of analytical relations.

Alena A. Vjuginova, computer modeling; formation of article structure.

Irina G. Sidorenko, processing of simulation results and partial numerical estimates.

Sergey S. Sergeev, formation of the structure of the article; analysis of simulation results.

Список литературы

1. Петрашень Г. И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
2. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Киев: Наук. думка, 1986. 536 с.
3. Горбачевич Ф. Ф. Отражение и преломление упругих волн на границе раздела сред. Апатиты: Кольский филиал РАН, 1985. 98 с.
4. Achenbach J., Kitachara M. Reflection and transmission of an obliquely incident wave by an array of spherical cavities // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. Vol. 80, № 4. P. 1209–1214. doi: 10.1121/1.393812
5. Reusseau M. Floquet wave properties in a periodically layered medium // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. Vol. 86, № 6. P. 2369–2378.
6. Jose M. Carcione anisotropic Q and velocity dispersion of finely layered media // Geophysical Prospecting. 1992. Vol. 40. P. 761–783.
7. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1996. 184 с.
8. Luk'yashko O. A., Saraikin V. A. Transient one-dimensional wave processes in a layered medium // J. of Mining Science. 2007. Vol. 43. P. 145–158. doi: 10.1007/s10913-007-0017-3
9. Dynamics of structural interfaces: Filtering and focussing effects for elastic waves / M. Brun, S. Guenneau, A. B. Movchan, D. Bigoni // J. Mech. Physics Solids. 2010. Vol. 58, iss. 9. P. 1212–1224.

doi: 10.1016/j.jmps.2010.06.008

10. Panasyuk O. N. Propagation of Quasishear Waves in Prestressed Materials with Unbonded Layers // Int. Appl. Mech. 2011. Vol. 47. P. 276–282. doi: 10.1007/s10778-011-0458-x

11. Панасюк О. Н. Анализ влияния граничных условий на распространение волн в слоистых композитных материалах // Прикладная механика. 2014. № 4. С. 52–58.

12. Аббакумов К. Е., Цаплев В. М. Волновые задачи акустических методов неразрушающего контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. 336 с.

13. Experimental research into possibilities and peculiarities of ultrasonic testing of additive manufactured parts / N. P. Aleshin, V. V. Murashov, N. A. Shchipakov, I. S. Krasnov, D. S. Lozhkova // Russian J. of Nondestructive testing. 2016. Vol. 52. P. 685–690. doi: 10.1134/S1061830916120020

14. Potapov A. I., Mahov V. E. Physical basics of evaluating elastic characteristics of anisotropic composites by ultrasonic method // Russian J. of Nondestructive testing. 2017. Vol. 53. P. 785–799. doi: 10.1134/S1061830917110080

15. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.

16. Abbakumov K. E. Scattering of plane elastic waves on a microrough interface between solid media // Russian J. of Nondestructive testing. 2017. Vol. 53. P. 475–484. doi: 10.1134/S1061830917070026

17. Khlybov A. A. Studying the Effect of Microscopic Medium Inhomogeneity on the Propagation of Surface Waves // Russian J. of Nondestructive testing. 2018. Vol. 54. P. 385–393. doi: 10.1134/S1061830918060049

18. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Байтеряков А. В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2022. 152 с.

19. Аббакумов К. Е., Вагин А. В., Сидоренко И. Г. Акустические характеристики графитовых включений в листах из медного сплава, полученного по технологии двойного вакуумного переплава // Сб. статей 8-й Междунар. науч.-техн. конф. "Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов", Могилев, 29–30 сент. 2022. Могилев: Изд-во Белорус.- Рос. ун-та, 2022. С. 11–16.

20. Abbakumov K. E., Vagin A. V., Sidorenko I. G. Acoustic Characteristics of Solid Elastic Media with Oriented Microcracking // Russian J. of Nondestructive testing, 2023, Vol. 59, iss. 4. P. 393–403. doi: 10.1134/S1061830923700316

Информация об авторах

Аббакумов Константин Евгеньевич – доктор технических наук (2000), профессор (2001) кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 172 научных работ. Сфера научных интересов – волновые процессы в сложноструктурированных средах; дифракция ультразвука на телах сложной формы; ультразвуковые измерения; акустические методы неразрушающего контроля.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: keabbakumov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6055-2366>

Вагин Антон Владимирович – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – распространение упругих волн в стратифицированных средах; ультразвуковые измерения; специальное приборостроение.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: avvagin@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1875-544X>

Вьюгинова Алена Александровна – кандидат технических наук (2013), доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 65 научных работ. Сфера научных интересов – ультразвуковые технологии и оборудование; ультразвуковые излучающие системы; ультразвуковые преобразователи; ультразвуковые измерения; акустические методы неразрушающего контроля.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aavyuginova@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4677-7689>

Сидоренко Ирина Геннадьевна – инженер по направлению "Приборостроение" (2010), ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – волновые процессы в сложноструктурированных средах; ультразвуковые измерения; акустические методы неразрушающего контроля.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: igsidorenko@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6027-7939>

Сергеев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук (1984), доцент, заведующий кафедрой "Физические методы контроля" Межгосударственного образовательного учреждения высшего образования "Белорусско-российский университет". Автор 130 научных работ. Сфера научных интересов – основы акустооптического метода неразрушающего контроля; совершенствование волоконно-оптических и акустических методов и средств контроля и измерений.

Адрес: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-российский университет", пр. Мира, 43, Могилев, 212000, Республика Беларусь

E-mail: sss.bru@tut.ru

References

1. Petrashen' G. I. *Rasprostranenie voln v anizotropnykh uprugikh sredakh* [Wave Propagation in Anisotropic Elastic Media]. Leningrad, Science, 1980, 280 p. (In Russ.)
2. Guz' A. N. *Uprugie volny v telakh s nachal'nymi napryazheniyami* [Elastic Waves in Solids with Initial Stresses]. Kiev, Scientific thought, 1986, 536 p. (In Russ.)
3. Gorbacevich F. F. *Otazhenie i prelomlenie uprugikh voln na granitse razdela sred* [Reflection and Refraction of Elastic Waves at the Interface Media]. Apatites, Kola branch of the Russian Academy of Sciences, 1985, 98 p. (In Russ.)
4. Achenbach J., Kitachara M. Reflection and Transmission of an Obliquely Incident Wave by an Array of Spherical Cavities. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1986, vol. 80, no. 4, pp. 1209–1214. doi: 10.1121/1.393812
5. Reusseau M. Floquet Wave Properties in a Periodically Layered Medium. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1989, vol. 86, no. 6, pp. 2369–2378.
6. Jose M. Carcione Anisotropic Q and Velocity Dispersion of Finely Layered Media. *Geophysical Prospecting*. 1992, vol. 40, pp. 761–783.
7. Murav'ev V. V., Zuev L. B., Komarov K. L. *Skorost' zvuka i struktura staley i splavov* [Speed of Sound and Structure of Steels and Alloys]. Novosibirsk, Science, Siberian Publishing Company RAS, 1996, 184 p. (In Russ.)
8. Luk'yashko O. A., Saraikin V. A. Transient One-Dimensional Wave Processes in a Layered Medium. *J. of Mining Science*. 2007, vol. 43, pp. 145–158. doi: 10.1007/s10913-007-0017-3
9. Brun M., Guenneau S., Movchan A. B., Bigoni D. Dynamics of Structural Interfaces: Filtering and Focusing Effects for Elastic Waves. *J. Mech. Physics Solids*. 2010, vol. 58, iss. 9, pp. 1212–1224. doi: 10.1016/j.jmps.2010.06.008
10. Panasyuk O. N. Propagation of Quasishear Waves in Prestressed Materials with Unbonded Layers. *Int. Appl. Mech.* 2011, vol. 47, pp. 276–282. doi: 10.1007/s10778-011-0458-x
11. Panasyuk O. N. *Analiz vliyaniya granichnykh uslovii na rasprostranenie voln v sloistykh kompozitnykh materialakh* [Analysis of the Boundary Conditions Influence on Wave Propagation in Layered Composite Materials]. *Applied mechanics*. 2014, no. 4, pp. 52–58. (In Russ.)
12. Abbakumov K. E., Caplev V. M. *Volnovye zadachi akusticheskikh metodov nerazrushayushchego kontrolya* [Wave Problems of Acoustic Methods of Non-destructive Testing]. SPb, Publ. house, SPbGETU "LETI", 2015, 336 p. (In Russ.)
13. Aleshin N. P., Murashov V. V., Shchipakov N. A., Krasnov I. S., Lozhkova D. S. Experimental Research into Possibilities and Peculiarities of Ultrasonic Testing of Additive Manufactured Parts. *Russ. J. of Nondestructive testing*. 2016, vol. 52, pp. 685–690. doi: 10.1134/S1061830916120020
14. Potapov A. I., Mahov V. E. Physical Basics of Evaluating Elastic Characteristics of Anisotropic Composites by Ultrasonic Method. *Russian J. of Nondestructive testing*. 2017, vol. 53, pp. 785–799. doi: 10.1134/S1061830917110080
15. Viktorov I. A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound Surface Waves in Solids]. Moscow, Science, 1981, 287 p. (In Russ.)
16. Abbakumov K. E. Scattering of Plane Elastic Waves on a Microrough Interface between Solid Media. *Russ. J. of Nondestructive testing*. 2017, vol. 53, pp. 475–484. doi: 10.1134/S1061830917070026
17. Khlybov A. A. Studying the Effect of Microscopic Medium Inhomogeneity on the Propagation of Surface Waves. *Russ. J. of Nondestructive testing*. 2018, vol. 54, pp. 385–393. doi: 10.1134/S1061830918060049
18. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Bajret'yakov A. V. *Strukturno-chuvstvitel'nye akusticheskie parametry konstruksionnykh staley* [Structure-Sensitive Acoustic Parameters of Structural Steels]. Ichevsk.: Publ. house of Izhevsk State Technical University n. a. M. T. Kalashnikov, 2022, 152 p. (In Russ.)
19. Abbakumov K. E., Vagin A. V., Sidorenko I. G. *Akusticheskie kharakteristiki grafitovykh vklyuchenii v listakh iz mednogo splava, poluchennogo po tekhnologii dvojnogo vakuumnogo pereplava* [Acoustic Characteristics of Graphite Inclusions in Copper Alloy Sheets Obtained by Double Vacuum Remelting Technology]. Collection of Papers of 8th Intern. Scientific and Technical Conf. "Modern Methods and Instruments for "Modern Methods and Instruments for Quality Inspection and Diagnostics of the Condition of Objects", Mogilev, 29–30 Sept. 2022. Publ. house of Belarusian-Russian Uni-

versity, 2022, pp.11–16. (In Russ.)

20. Abbakumov K. E., Vagin A. V., Sidorenko I. G.
Acoustic Characteristics of Solid Elastic Media with

Oriented Microcracking. Russ. J. of Nondestructive testing, 2023, vol. 59, iss. 4, pp. 393–403. doi: 10.1134/S1061830923700316

Information about the authors

Konstantin E. Abbakumov, Dr Sci. (2000), Professor (2001) of the Electroacoustics and Ultrasonic Engineering Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 172 scientific publications. Area of expertise: area of wave processes in complex-structured media; ultrasound diffraction on solids of complex shape; acoustic methods of nondestructive testing and measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: keabbakumov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6055-2366>

Anton V. Vagin, Master in Instrument Engineering (2020), Postgraduate Student, Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: propagation of elastic waves in stratified media, ultrasonic measurements, special instrumentation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: avvagin@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1875-544X>

Alena A. Vjuginova, Cand. Sci. (2013), Associate Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 65 scientific publications. Area of expertise: ultrasonic technologies and equipment; ultrasonic emitting systems; ultrasonic transducers; acoustic methods of nondestructive testing and measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aavyuginova@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4677-7689>

Irina G. Sidorenko – Engineer in Instrument Engineering (2010), Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: area of wave processes in complex-structured media; acoustic methods of nondestructive testing and measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: igsidorenko@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0001-6027-7939>

Sergey S. Sergeev – Cand. Sci. (1984), Associate Professor, the head of the Department of Physical Control Methods of Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University". The author of 130 scientific publications. Area of expertise: area of fundamentals of the acousto-optical method of nondestructive testing; improvement of fiber-optic and acoustic methods and means of control and measurement.

Address: Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", 43 Mira Ave, Mogilev 212000, Republic of Belarus

E-mail: sss.bru@tut.by
