

УДК: 534.2: 620.179.16

OECD: 1.03.AA

Характеристики волновых процессов в консолидированных средах с учетом контактных явлений между частицами вещества

Аббакумов К.Е.^{1*}, И.Б.Ч.², Сидоренко И.Г.²¹ Д.т.н., профессор, зав. кафедрой, ² Ассистент^{1,2} Кафедра «Электроакустика и ультразвуковая техника», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В работе рассмотрены особенности формирования информационных сигналов при распространении упругих волн в мелкозернистой консолидированной среде. Получено аналитическое выражение для волнового сопротивления объемных продольных и поперечных волн, полагаемое в основу для вычисления фазовых скоростей эффективных продольных и поперечных волн и свойственных им коэффициентам затухания. Полученные выражения проанализированы с использованием численных оценок для актуальных значений параметров ультразвуковых волн и физико-механических свойств среды. Показано заметное изменение фазовых скоростей и коэффициентов затухания в консолидированных средах по сравнению с монолитными, которое должно учитываться при оценке величин отраженных и прошедших сигналов через соответствующие границы. Приведены результаты численных оценок изменения коэффициентов отражения и прохождения для продольной и поперечной волны через плоскую границу раздела монолитной и консолидированной сред на примере системы «сталь - гранулированный металлургический шлак» в зависимости от частоты и величины коэффициента перфорации, как параметра микрошероховатой границы зерен шлакового наполнителя.

Ключевые слова: зернистость, консолидированные частицы, продольные волны, поперечные волны, затухание упругих волн.

Characteristics of wave processes in consolidated media taking into account contact conditions between particles of substance

Abbakumov K.E.^{1}, I.B.Ch.², Sidorenko I.G.²**¹ DSc, professor, head of department, ² Assistant**^{1,2} The department of Electroacoustic and Ultrasound Techniques, Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia*

Abstract

The features of the formation of information signals during the propagation of elastic waves in a fine-grained consolidated medium are considered. An analytical expression for the wave impedance of bulk longitudinal and shear waves, which is taken as the basis for calculating the phase velocities of effective longitudinal and shear waves and the attenuation coefficients is obtained. The obtained expressions are analyzed using numerical estimates for the actual values of the parameters of ultrasonic waves and the physical and mechanical properties of the medium. A noticeable change in phase velocities and attenuation coefficients in consolidated media compared to monolithic ones has been shown, which should be taken into account when

assessing the values of reflected and transmitted signals through the corresponding boundaries. The results of numerical estimates of the change in the reflection and transmission coefficients for longitudinal and transverse waves through the plane interface between monolithic and consolidated media are given on the example of the system "steel - granular metallurgical slag" depending on the frequency and value of the perforation coefficient, as a parameter of the microrough grain boundary of the slag filler.

Keywords: *granularity, consolidated particles, longitudinal waves, shear waves, elastic wave attenuation.*

Введение

Как показал опыт проектирования средств ультразвукового контроля, наилучшие результаты обеспечиваются на основании анализа уравнений измерительных тактов приборов контроля и измерений при условии внедрения в их состав подходящей замещающей модели обнаруживаемой и оцениваемой неоднородности [1]. В то же время известно, что подлежащие обнаружения несплошности могут обладать значительным разнообразием своего строения, а определение их параметров может потребовать проведения специальных измерений и исследований на их основе.

В частности в работе [2] при исследовании выявляемости в листах из медных сплавов, получаемых по технологии двойного вакуумного переплава, внутренних расслоений, заполненных графитоподобным веществом, было установлено, что допустимая сходимост теоретических и экспериментальных результатов может быть обеспечена в предположении значительного по величине затухания продольных (а также и поперечных) волн. Что не соответствовало значениям коэффициента затухания известным из справочных данных, полученным для монолитного графита.

Для устранения возникшего противоречия была выдвинута гипотеза о немонолитном «гранулированном» характере строения вещества, заполняющего расслоения в медных сплавах. Данные углубленного металлографического и рентгеноструктурного анализов позволили утверждать, что некоторое число видов неметаллических и других включений в изделиях металлургического и прокатного производства может состоять из отдельных, раздробленных частиц округлой или более сложной формы, соприкасающихся между собой при различной степени сжатия. При чем, округлая форма, наиболее характерна из-за сглаживающего характера воздействия деформирующих напряжений при прокатных технологиях. Деформированные частицы возникающей таким образом эффективной «зернистой» среды могут проявлять, как дискретные колебательные системы с сосредоточенными параметрами, резонансный характер, на что было указано, например, в работе [3]. Из-за этого уровень информационных сигналов от подобных несплошностей может значительно отличаться по сравнению с несплошностями из изотропных, монолитных материалов, что ограничивает возможности использования модели «идеальной» прослойки с плоскими гранями [4, 5]. Важным критерием допустимости подобного подхода является превышение длин продольных и поперечных волн над размерами микрочастиц - длинноволновое (низкочастотное) приближение.

Следуя методике [3], представляет интерес оценить влияние не только «резонансных» свойств совокупностей микровключений, но и учесть имеющиеся при этом потери и различие по отношению к упругим волнам различных типов, а, также, другие, включая различия в распределении по размерам рассеивателей технологического происхождения.

1. Постановка и решение задачи

Следуя рекомендациям [6...10], и принимая во внимание выражение для статической контактной жесткости DG в контактах между зёрнами,

$$DG = \frac{4\mu a}{1 - \nu}, \quad (1)$$

где μ - модуль сдвига материала зёрен, ν - коэффициент Пуассона, a - радиус контактного пятна, имеющего форму круга, а также с учетом комплексности скорости распространения продольной волны $c_{lk} = c_1 + ic_2$, и определении коэффициента затухания продольной волны как $a_{lk}(\omega) = \frac{\omega \cdot c_2}{c_1^2 + c_2^2}$, можно показать, что выражения для эффективной фазовой скорости и коэффициента затухания продольной волны примут следующий вид:

$$c_{lk}(\omega) = \frac{32\pi^2 \rho \omega^3}{27Q \cdot DG} (r_{max}^4 - r_{min}^4) \left(1 + \frac{\eta}{\omega}\right), \quad (2)$$

$$\alpha_{lk}(\omega) = \frac{\omega \cdot \left[\frac{DG}{\pi\omega\rho} \left(\frac{1}{r_{min}^2} - \frac{1}{r_{max}^2} \right) - \frac{32\pi^2 \rho \omega^3}{27Q \cdot DG} (r_{max}^4 - r_{min}^4) \frac{\eta}{\omega} \right]}{\left(\frac{32\pi^2 \rho \omega^3}{27Q \cdot DG} (r_{max}^4 - r_{min}^4) \left(1 + \frac{\eta}{\omega}\right) \right)^2 + \left[\frac{DG}{\pi\omega\rho} \left(\frac{1}{r_{min}^2} - \frac{1}{r_{max}^2} \right) - \frac{32\pi^2 \rho \omega^3}{27Q \cdot DG} (r_{max}^4 - r_{min}^4) \frac{\eta}{\omega} \right]^2} \quad (3)$$

где ω - круговая частота; ρ - плотность материала микрочастиц; Q - механическая добротность эквивалентного осциллятора; r_{max} и r_{min} - максимальный и минимальный радиусы в распределении микрочастиц по размерам; η - коэффициент потерь эквивалентного осциллятора; DG - статическая контактная жесткость по формуле (1).

При рассмотрении взаимодействия поперечной волны с тонким слоем зернистой среды сохранялось значение волнового размера. С учетом $k = c_t/c_l$ - отношения скоростей поперечной и продольной волн в основной неповрежденной среде, можно показать (с учетом [8...11]), что выражения для скорости распространяющейся в зернистой среде поперечной волны и её коэффициента затухания примут вид:

$$c_{tk}(\omega) = \frac{32\pi^2 2\rho\omega^3 k^4}{27Q \cdot DG} (r_{max}^4 - r_{min}^4) \left(1 + \frac{\eta}{\omega}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_{tk}(\omega) = \frac{\omega \cdot [A1 - B1 \cdot \eta/\omega]}{[A1(1 + \eta/\omega)]^2 + [B1 - A1 \cdot \eta/\omega]^2} \quad (5)$$

где $A1 = \frac{DG}{\pi\omega\rho k^2} (1/r_{min}^2 - 1/r_{max}^2)$, $B1 = \frac{32\pi^2 \rho \omega^3 k^4}{27Q \cdot DG} (r_{max}^4 - r_{min}^4) \frac{\eta}{\omega}$.

Численные оценки с помощью полученных соотношений (2...5) проводились для широкого диапазона изменения учитываемых параметров, в первую очередь частоты и размеров включений, а их результаты представлены на рис. 1.

По данным [6] величина контактной жесткости принималась равной $DG = 5 \cdot 10^6$ Н/м, а плотность $\rho = 2.65 \cdot 10^3$ кг/м³ (и другие параметры монолитного графита [12]).

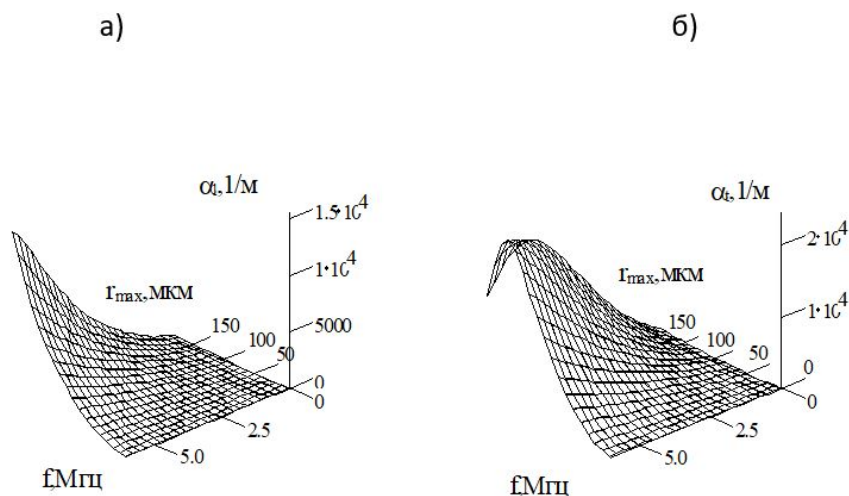


Рис. 1. Зависимости коэффициентов затухания продольных-(а), и поперечных-(б) волн от размеров консолидированных частиц и частоты; r_{min}/r_{max}

В качестве примера, иллюстрирующего значения порядка величины коэффициента затухания, обусловленного контактными явлениями множества консолидированных рассеивателей, и возможности проявления “резонансных” свойств консолидированных включений, на рис. 1 представлены результаты вычислений по формулам (3, 5) значений коэффициента затухания для продольных и поперечных волн, распространяющихся через тонкий слой консолидированных включений с параметрами монолитного графита [13].

Из графиков видно, что затухание поперечных волн по величине может превосходить затухание продольных волн, что ожидалось. Абсолютные значения коэффициента затухания могут достигать в мегагерцовом диапазоне частот несколько десятков и более 1/м. Особую важность, при этом, приобретает значение закона распределения микрочастиц по размерам, определению которого необходимо уделять особое внимание.

В тексте уже отмечалось, что в [3, 11] модель эквивалентных осцилляторов строилась для округлых микрочастиц с “ровными” границами. Можно предположить, что в условиях силового воздействия при металлургических переделах, вызывающих увеличение степени раздробленности микрочастиц вещества расслоения их поверхности могут обрести дополнительную микрошероховатость, учтенную в [12], способную вызвать дополнительную динамическую контактную жесткость в нормальном KGN и тангенциальном KGT направлениях [12]:

$$DG1 = DGN + KGN, \quad (6)$$

$$DG2 = DGN + KGT. \quad (7)$$

Тогда выражения для скоростей эффективных продольной и поперечной волн, соответственно, примут (без учета потерь в эквивалентном осцилляторе) вид:

$$c_{l,g} = \frac{32\pi^2 \rho \omega^3 (r_{max}^4 - r_{min}^4)}{27Q \cdot DG1}, \quad (8)$$

$$c_{t,g} = \frac{32\pi^2 \rho \omega^3 (r_{max}^4 - r_{min}^4) (c_t/c_l)^4}{27Q \cdot DG1}. \quad (9)$$

По формулам (8, 9) проводились вычисления для значений параметров изотропной среды в виде металлургического шлака: $\rho_m = 2400 \text{ кг/м}^3$, $c_l = 4000 \text{ м/с}$; $c_t = 2600 \text{ м/с}$ [14], для размеров включений ($r_{max} = 0,5 \text{ мм}$; $r_{min} = 0,05 \text{ мм}$), контактного пятна ($\alpha = 0,005 \text{ мм}$) и среднего расстояния между сферическими выступами ($d = 0,5 \text{ мм}$). Значение добротности эквивалентных осцилляторов составляло $Q = 50$. В качестве параметра зависимостей выбиралось значение коэффициента перфорации ξ .

На рис. 2 представлена зависимость фазовой скорости продольной волны в консолидированной среде от частоты:

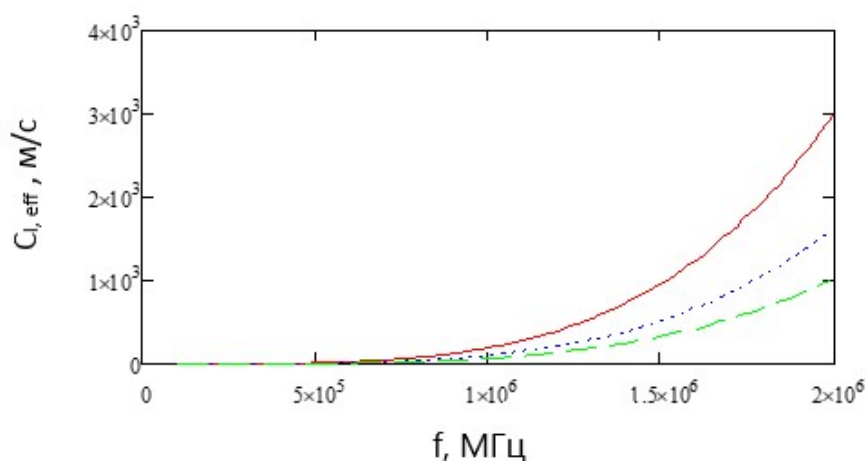


Рис. 2. Зависимость фазовой скорости продольной волны в гранулированной среде от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации:
(—) — $\xi = 0,85$; (···) — $\xi = 0,75$; (- · -) — $\xi = 0,65$

На рис. 3 представлена зависимость фазовой скорости поперечной волны в консолидированной среде от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации.

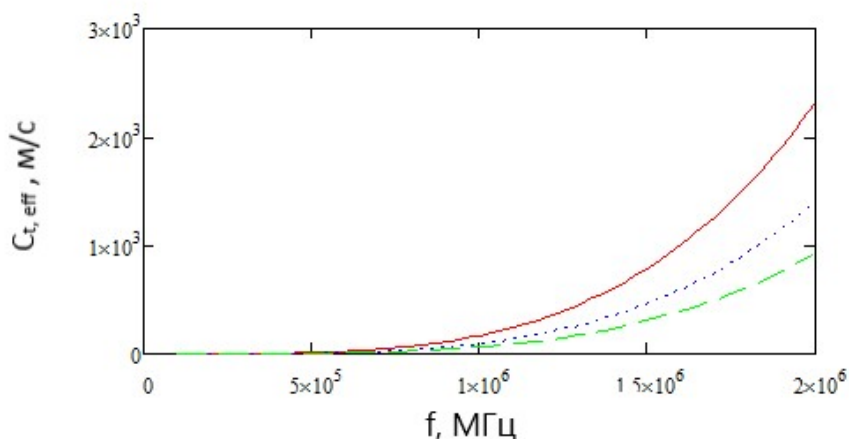


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости поперечной волны в консолидированной среде от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации:
(—) — $\xi = 0,85$; (···) — $\xi = 0,75$; (- · -) — $\xi = 0,65$

Как видно из графиков в случаях продольной и поперечной волн, значения скоростей увеличиваются с ростом частоты и уменьшаются с уменьшением коэффициента

перфорации. Во всем диапазоне частот и значений параметров микровключений значения фазовых скоростей в гранулированной среде оказывались меньше чем в исходной сплошной монолитной среде.

Подстановка выражений (6) и (7) в (4), (5) позволила получить соотношения для определения влияния параметров динамической жесткости на величину коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в гранулированной среде:

$$\alpha_{l,g} = \frac{\omega \cdot \left(\frac{DG1}{\pi\omega\rho} \cdot \left(\frac{1}{r_{min}^2} - \frac{1}{r_{max}^2} \right) \right)}{\left[\frac{32\pi^2\rho\omega^3}{27Q \cdot DG1} \cdot (r_{max}^4 - r_{min}^4) \right]^2 + \left[\frac{DG1}{\pi\omega\rho} \cdot \left(\frac{1}{r_{min}^2} - \frac{1}{r_{max}^2} \right) \right]^2}, \quad (10)$$

$$\alpha_{l,g} = \frac{\omega \cdot \left(\frac{DG2}{\pi\omega\rho} \cdot \left(\frac{1}{r_{min}^2} - \frac{1}{r_{max}^2} \right) \right)}{\left[\frac{32\pi^2\rho\omega^3 \cdot \left(\frac{c_t}{c_l} \right)^4}{27Q \cdot DG2} \cdot (r_{max}^4 - r_{min}^4) \right]^2 + \left[\frac{DG2}{\pi\omega\rho} \cdot \left(\frac{1}{r_{min}^2} - \frac{1}{r_{max}^2} \right) \right]^2}. \quad (11)$$

Используя формулы (10, 11), осуществлялась численная оценка влияния параметров динамической контактной жесткости на величину коэффициента затухания эффективных продольной и поперечной волн. Численные оценки проводились для того же материала и аналогичных значений учитываемых параметров. Результаты вычислений зависимостей коэффициентов затухания продольной и поперечной волн от частоты при заданных значениях величины контактного пятна и величины коэффициента перфорации представлены на рис. 4, 5.

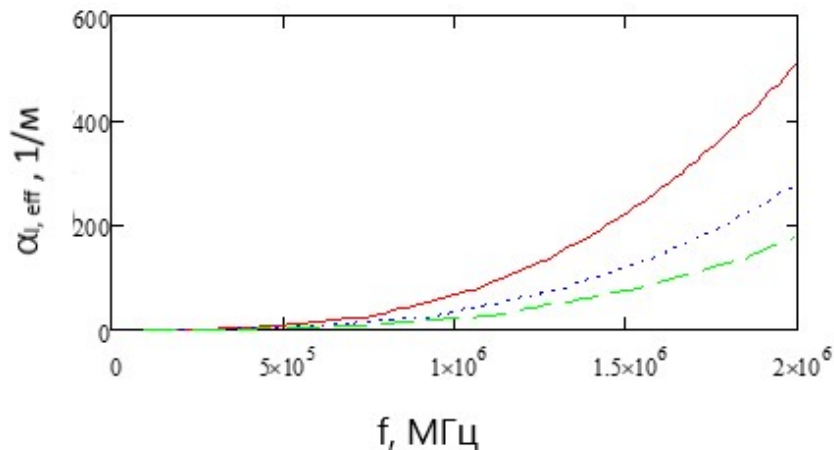


Рис. 4. Зависимость величины коэффициента затухания продольной волны в гранулированной среде от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) — $\xi = 0,85$; (---) — $\xi = 0,75$; (---) — $\xi = 0,65$

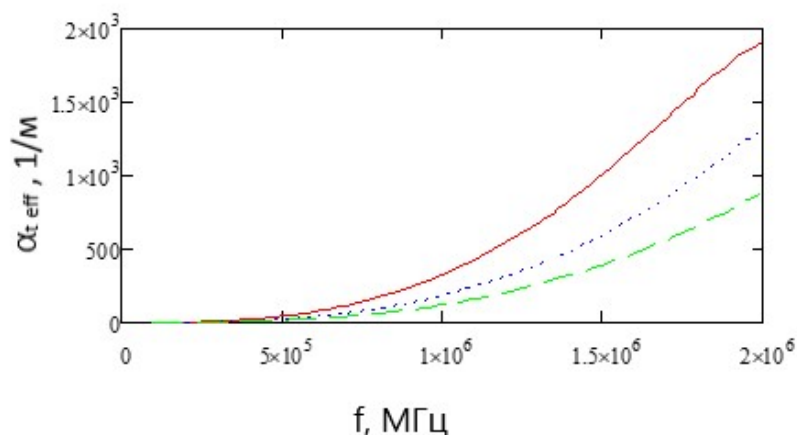


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента затухания поперечной волны в гранулированной среде от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) — $\xi = 0,85$; (···) — $\xi = 0,75$; (---) — $\xi = 0,65$

Как следует из графиков абсолютное значение коэффициентов затухания для обоих типов волн возрастает с ростом частоты и убывает с уменьшением коэффициента перфорации. Отметим, что величина коэффициентов затухания в гранулированной среде может более чем на порядок превосходить для сопоставимых параметров значение коэффициентов затухания в монолитной изотропной среде.

Изменение физических параметров гранулированной среды нужно учитывать при оценке отражающей способности и звукопрозрачности плоской границы раздела и плоскопараллельных прослоек, которые могут приобретать частотную зависимость.

В качестве примера приведены результаты вычисления коэффициентов отражения и прохождения для упругих напряжений по известным формулам [4].

На рис. (6) представлены результаты вычислений коэффициентов отражения продольных и поперечных волн при нормальном падении плоской упругой волны для границы "сталь-металлургический шлак" в зависимости от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации.

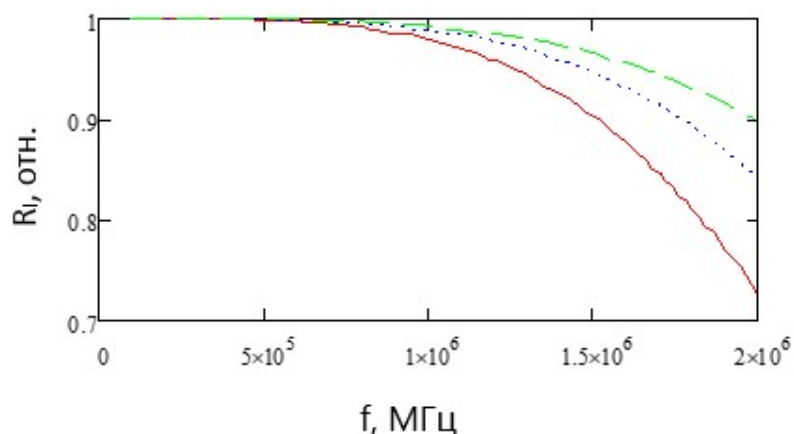


Рис. 6. Зависимость величины коэффициента отражения продольной волны от границы "сталь-гранулированный шлак" от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) — $\xi = 0,85$; (···) — $\xi = 0,75$; (---) — $\xi = 0,65$

Как следует из графиков, коэффициент отражения продольной волны убывает с ростом частоты и коэффициента перфорации. Для сравнения коэффициент отражения от границы "сталь - монолитный шлак" не зависит от частоты и составляет 0,652.

На рис. 7 представлены зависимости коэффициента отражения поперечной волны от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации.

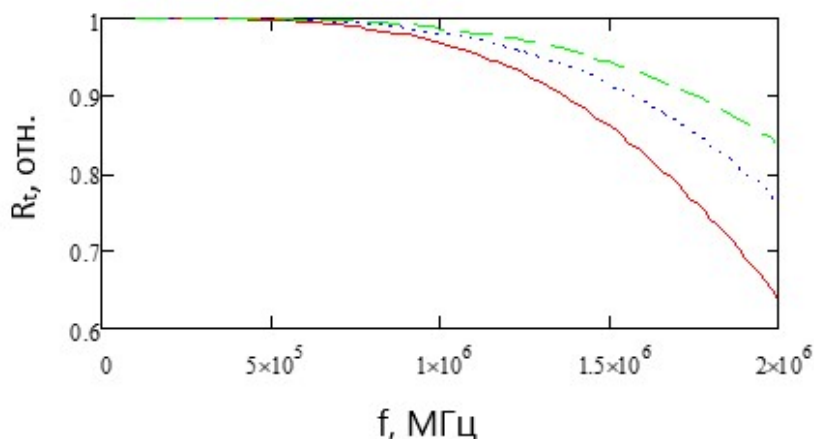


Рис. 7. Зависимость величины коэффициента отражения поперечной волны от границы "сталь-гранулированный шлак" от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) — $\xi = 0,85$; (\cdots) — $\xi = 0,75$; (---) — $\xi = 0,65$

Аналогично случаю продольной волны коэффициент отражения поперечной волны убывает с ростом частоты и коэффициента перфорации. Для сравнения коэффициент отражения поперечной волны от границы "сталь - монолитный шлак" не зависит от частоты и составляет 0,603.

На рис. 8, 9 представлены зависимости коэффициента прохождения продольной и поперечной волн, соответственно, через границу "сталь - гранулированный шлак" от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации.

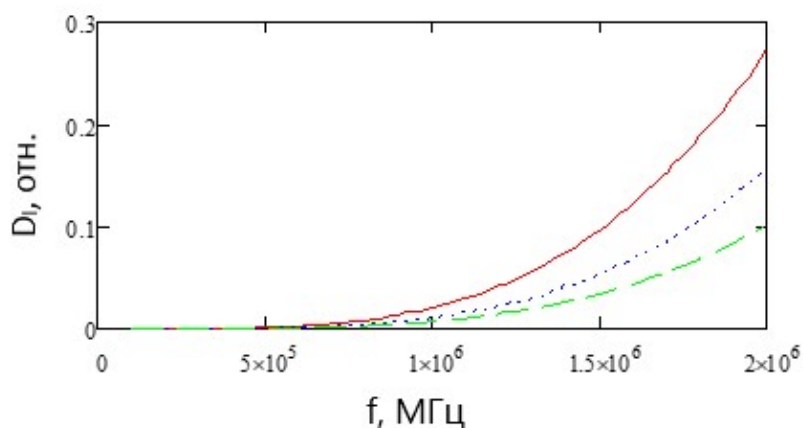


Рис. 8. Зависимость величины коэффициента прохождения продольной волны через границы "сталь-гранулированный шлак" от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) — $\xi = 0,85$; (\cdots) — $\xi = 0,75$; (---) — $\xi = 0,65$

Как следует из графиков, абсолютное значение коэффициента прохождения продольной волны возрастает с ростом частоты и коэффициента перфорации.

Для сравнения коэффициент прохождения продольной волны через границы "сталь - монолитный шлак" не зависит от частоты и составляет 0,348.

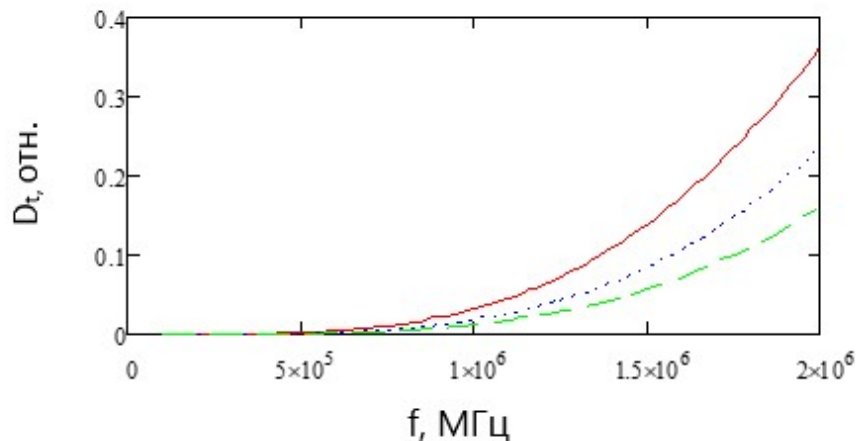


Рис. 9. Зависимость величины коэффициента прохождения поперечной волны через границы "сталь-гранулированный шлак" от частоты при заданных значениях коэффициента перфорации: (—) — $\xi = 0,85$; (···) — $\xi = 0,75$; (---) — $\xi = 0,65$

Аналогично случаю продольной волны коэффициент прохождения поперечной волны возрастает с ростом частоты и коэффициента перфорации. Для сравнения коэффициент прохождения поперечной волны через границы "сталь - монолитный шлак" не зависит от частоты и составляет 0,397.

Сравнение численных результатов в сопоставимых случаях позволяет утверждать, что гранулированная среда сильнее отражает и слабее пропускает ультразвук по сравнению с монолитной средой.

Заключение

Изложенное подтверждает состоятельность гипотезы о немонолитном строении вещества, заполняющего расслоения, в результате воздействия деформирующих усилий при металлургических переделах.

Существенным становится, также, соотношение между максимальным и минимальным значениями размеров элементарных рассеивателей, образующих множественную совокупность. Абсолютное значение коэффициента затухания может быть весьма значительным, и быстро нарастает с ростом частоты и увеличением размеров частиц. При определенных соотношениях между длиной распространяющейся волны и размерами включений рассматриваемые зависимости от частоты могут обладать экстремумами. Подобное явление должно таким образом учитываться при оценке отражающих свойств и звукопрозрачности неоднородности, состоящей из раздробленного вещества и контактирующих друг с другом частиц его заполнения.

Список литературы

1. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля/Под общ. ред. И. Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.

2. Аббакумов К.Е., Голубев А.С., Полуниин Н.Н. Акустические свойства дефекта типа раскатанного включения графита в листах из медных сплавов//Дефектоскопия.- 1980.- №7.- С.40-45.
3. Быков В.Г. Поглощение упругих волн в тонком слое зернистой среды//Акуст. журн.- 1997.-Т.43, №3.- С.323-328.
4. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред.- М.: Наука.- 1989.-416с.
5. Кобелев Ю.А. К вопросу о поглощении звуковых волн в тонком слое//Акуст. журн.- 1987.-Т.33, №3.- С.507-509.
6. Файзулин И.С., Шапиро С.А. О затухании упругих волн в горных породах, связанном с рассеянием на дискретных неоднородностях//Докл. АН СССР.-1987.- Т.295, вып. 12.- С. 341-343.
7. Winkler K.W. Contact in granular porous materials: comprasion between theory and experiment//Geophys. Res. Lett. – 1983, V. 10, N 11.–P. 1073-1076.
8. Справочник по триботехнике: В 3 т./Под общ. ред. М. Хебды. - М.: Машиностроение, 1989.- Т.1: Теоретические основы.-400с
9. Ландау Л.Л., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965.– 202 с.
10. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. – М.: Наука, 1981. – 540 с. – Из содерж.:[формула интеграла].-С.28.
11. Аббакумов К.Е. Рассеивающие свойства металлоизделий в задачах ультразвуковой дефектоскопии: дисс.д-ра техн. наук. СПб: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000 г.
12. Аббакумов К.Е. Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред.//Дефектоскопия, 2017, №7, С.3-13
13. Papadakis E. P. Ultrasonic attenuation caused by Rauleigh scattering by graphite modules in modular cast inn//J.Acoust.Soc.Amer.-1981.-V.70,N3.-P.782
14. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб, Изд-во "СВЕН", 2007 г.

References

1. Ul'trazvukovye preobrazovateli dlja nerazrushajushhego kontrolja/Pod obshh. red. I. N. Ermolova. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 280 s.
2. Abbakumov K.E., Golubev A.S., Polunin N.N. Akusticheskie svojstva defekta tipa raskatannogo vkljuchenija grafita v listah iz mednyh splavov//Defektoskopija.- 1980.- №7.- С.40-45.
3. Bykov V.G. Pogloshhenie uprugih voln v tonkom sloe zernistoj sredy//Akust. zhurn.- 1997.-Т.43, №3.- С.323-328.
4. Brehovskih L.M., Godin O.A. Akustika sloistyh sred.- М.: Nauka.- 1989.-416s.
5. Kobelev Ju.A. K voprosu o pogloshhenii zvukovyh voln v tonkom sloe//Akust. zhurn.- 1987.-Т.33, №3.- С.507-509.
6. Fajzulin I.S., Shapiro S.A. O zatuhanii uprugih voln v gornyh porodah, svjazannom s rassejaniem na diskretnyh neodnorodnostjah//Dokl. AN SSSR.-1987.- Т.295, vyp. 12.- С. 341-343.
7. Winkler K.W. Contact in granular porous materials: comprasion between theory and experiment//Geophys. Res. Lett. – V. 10, N 11.–P. 1073-1076.
8. Spravochnik po tribotehnike: V 3 t./Pod obshh. red. M. Hebdy. - М.: Mashinostroenie, 1989.- Т.1: Teoreticheskie osnovy.-400s
9. Landau L.L., Lifshic E.M. Teorija uprugosti. – М.: Nauka, 1965.– 202 s.

10. Prudnikov A.P., Brychkov Ju.A., Marichev O.I. *Integraly i rjady*. – М.: Nauka, 1981. – 540 s. – Iz soderzh.: [formula integrala].-S.28.
11. Abbakumov K.E. Scattering properties of metal products in problems of ultrasonic flaw detection: Dissertation,. Dr. tech. sciences. SPb, ETU "LETI", 2000.
12. Abbakumov K.E. Scattering of a Plane Elastic Waves on a Microrough Interface between Solid Media//Defectosopiya, 2017,№ 7, P. 3-13.
13. Papadakis E. P. Ultrasonic attenuation caused by Rauleigh scattering by graphite modules in modular cast inn//J.Acoust.Soc.Amer.-1981.-V.70,N3.-P.782-787.
14. Kretov E.F. Ultrasonic flaw detection in power engineering. SPb, SVEN, 2007.