

К. Е. АББАКУМОВ, *д-р техн. наук, проф.*

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

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОИСТЫХ СРЕД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ПРИБЛИЖЕНИИ «ЛИНЕЙНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ»

Аннотация. Рассмотрены частные случаи моделей конструкционных материалов (технологических сред), обладающих слоистой структурой, применительно к задачам неразрушающего контроля и определения физико-механических характеристик. В длинноволновом приближении получены в явном виде выражения дисперсионных уравнений, используемых для определения фазовых скоростей эффективных упругих волн, распространяющихся в изучаемых слоисто-неоднородных структурах. Их отличительной особенностью являлись нарушения условий акустического контакта на границах трещиноподобных несплошностей. При формировании граничных условий использовалось приближение «линейного скольжения», позволяющее учитывать наличие микрошероховатостей на прилегающих участках поверхностей микротрещин. На основании численных решений дисперсионных уравнений проводились исследования зависимости фазовых скоростей упругих волн от параметров материалов приграничных областей, результаты которых и обсуждаются в статье.

Ключевые слова: конструкционные материалы, слоистые среды, эффективные упругие волны, фазовые скорости, дисперсионные уравнения.

В современных условиях научно-технического прогресса широкое распространение получают новые конструкционные материалы. Отличительной особенностью их строения являются комбинированные структуры, получающиеся путем внедрения разнообразных объектов в основной материал, что позволяет получать вещества с новыми характеристиками, используемыми при изготовлении как традиционных, так и новых изделий. Для решения задач структурометрии, важных с целью определения на основании результатов ультразвуковых измерений физико-механических характеристик новых материалов, представляет интерес получение аналитических соотношений, связывающих характеристики упругих волн с параметрами структуры моделируемых сред.

В [1] рассмотрена модель слоисто-неоднородной среды, образованной двумя монолитными веществами. Показано, что подобная неоднородность должна учитываться при формировании граничных условий в приближении "линейного скольжения", а, значит, будет оказывать влияние на волновые процессы, формируемые в окрестностях подобных границ. Основными параметрами, учитывающими эти особенности, являются контактные жесткости [1].

Другой практически важный случай будет возникать в случае, когда одна из сред, образующих слоистую структуру, оказывается консолидированной (гранулированной). Из теории известно, что акустические характеристики

подобных сред могут значительно отличаться от случая монолитного вещества, таким образом, учитываться при формировании сходных граничных условий [1, 2]. Вариант такой среды и рассматривался в настоящей работе.

Ранее, по аналогии с работой [2], было показано, что для модели замещения гранул среды упругими сферами при плотной "гексагональной упаковке" значения фазовых скоростей эффективной продольной clr и поперечной ctr волн, соответственно, распространяющихся в консолидированной среде могут быть вычислены с использованием следующих соотношений:

$$clr = \frac{32 \cdot \rho \cdot \omega^2}{27 \cdot Q \cdot DG} \cdot (r_{\text{макс}}^4 - r_{\text{мин}}^4), \quad ctr = \frac{32 \cdot \rho \cdot \omega^2}{27 \cdot Q \cdot DG} \cdot (r_{\text{макс}}^4 - r_{\text{мин}}^4) \cdot \sqrt{\frac{1-2 \cdot \nu}{2 \cdot (1-\nu)}}, \quad (1)$$

где: ρ – плотность монолитной среды, ω – циклическая частота, Q – механическая добротность, $r_{\text{макс}}$, $r_{\text{мин}}$ – максимальный и минимальный размеры замещающих микросфер, DG – статическая контактная жесткость, определяемая выражением: $DG = 4 \cdot \mu \cdot a / (1-\nu)$, где: " μ " – модуль сдвига, " a " – радиус контактного пятна на поверхностях замещающих сфер, ν – коэффициент Пуассона [3].

Следует отметить, что при выводе формул (9) [3] особое значение имело распределение гранул вещества по размерам. В данном случае функция плотности вероятности распределения по размерам, по рекомендации [3], имела вид: $f(r) = 1/r^4$. Далее при вычислениях использовались следующие значения параметров модели: $Q_l = 25$, $Q_t = 15$ – добротности замещающих колебательных систем для продольных и поперечных волн, соответственно; $r = 1 \cdot 10^{-3}$ м – радиус максимального замещающего включения (сферы); $\alpha = 0,2$ – отношение размеров минимального и максимального включений; $a = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м – радиус контактного пятна.

В качестве примера проводились вычисления по формулам (4, 5) для материалов слоев 1 и 2 соответственно: $\rho_1 = 2500$ кг/м³, $c_{l1} = 4000$ м/с, $c_{t1} = 1600$ м/с (плотный металлургический шлак); $\rho_2 = 7800$ кг/м³, $c_{l2} = 5920$ м/с, $c_{t2} = 3230$ м/с (углеродистая сталь) [1]; частота ультразвука – 1 МГц, пространственный период в направлении оси Y слоистой структуры – $h_1 + h_2 = 1$ мм. При указанных значениях параметров модели значения эффективных скоростей составили: для продольных волн $clr = 2182$ м/с; для поперечных волн $ctr = 581$ м/с.

На первом этапе рассматривалась модель плоскостной среды в виде чередующихся слоев с заданными характеристиками. На рис.1 представлен фрагмент модели такой среды с обозначенными параметрами. Как следует из рисунка, исследуемая среда представляет собой периодическую структуру в виде комбинации слоев материалов с различными свойствами (плотностью и коэффициентами Ламэ), соответственно: ρ_3 , λ_3 , μ_3 – толщиной h_1 и ρ_2 , λ_2 , μ_2 – толщиной h_2 , общей толщиной $h = h_1 + h_2$.

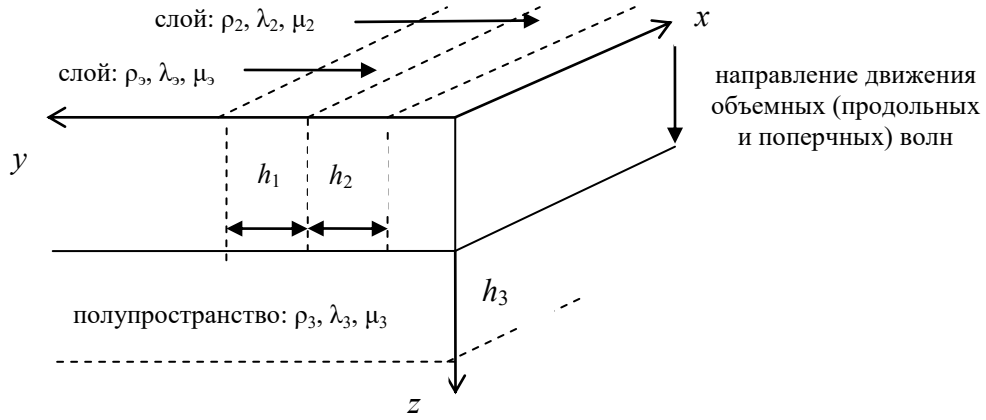


Рис. 1. Система координат и схема движения объемных волн вдоль слоев, образующих плоскостойкую структуру

После преобразований с учетом малости волновых размеров слоев h_1 и h_2 можно показать, что дисперсионное уравнение (1) преобразуется в алгебраическое, решения которого для значений фазовых скоростей продольной волны имеет вид:

$$clnp = \sqrt{\frac{1 + n(1-n) \cdot \frac{(\rho_1 ctr^2 - \rho_2 c_{l2}^2) \cdot [\rho_1 (clr^2 - ctr^2) - \rho_2 (c_{l2}^2 - c_{t2}^2)]}{\rho_1 \cdot clr^2 \cdot \rho_2 \cdot c_{l2}^2}}{[\rho_1 \cdot n + \rho_2 \cdot (1-n)] \cdot \left[\frac{n}{\rho_1 \cdot clr^2} + \frac{1-n}{\rho_2 \cdot c_{l2}^2} \right]}}, \quad (2)$$

где: $n = h_1 / (h_1 + h_2)$, $1 - n = h_2 / (h_1 + h_2)$ – относительные толщины слоев.

Проведя аналогичные действия по отношению к поперечной волне с упругим смещением вдоль оси "Y" (в плоскости YX) при тех же допущениях можно найти выражение для фазовой скорости эффективной поперечной волны

$$ctn = \sqrt{\frac{n \cdot \rho_1 \cdot ctr^2 + (1-n) \cdot \rho_2 \cdot c_{t2}^2}{\rho_1 \cdot n + \rho_2 \cdot (1-n)}}. \quad (3)$$

Результаты вычислений по формулам (2), (3) представлены на рисунках 2 и 3. Как следует из графиков, приведенные зависимости носят монотонный характер, что согласуется с физическими представлениями. Полученные зависимости для фазовых скоростей использовались далее для оценки влияния структурных особенностей на модули контактных жесткостей, используемых при формировании граничных условий в приближении "линейного скольжения". С этой целью полученные выражения (2), (3) подставлялись в формулы [1]. Результаты вычислений представлены на рис. 3(а, б). для нормальной и тангенциальной контактных жесткостей. Как следует из анализа построенных графических зависимостей, во всем диапазоне изменений

учитываемых параметров отмечаются значимые отличия в величинах контактных жесткостей, которые могут влиять на волновые процессы в приграничных областях.

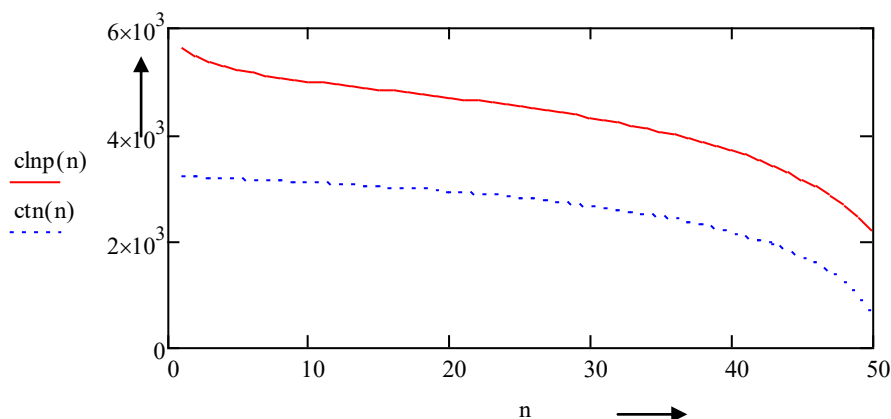


Рис. 2. Зависимости фазовой скорости продольной (—) и поперечной (---) волн от относительной толщины слоев в неоднородной структуре при волновом движении вдоль слоев

Другой важный в плане прикладного использования вариант слоистой среды формируется в случае ортогонального распространения волнового процесса по отношению к слоям. Система координат и схема движения волн в направлении, ортогональном слоям, представлены на рис. 4

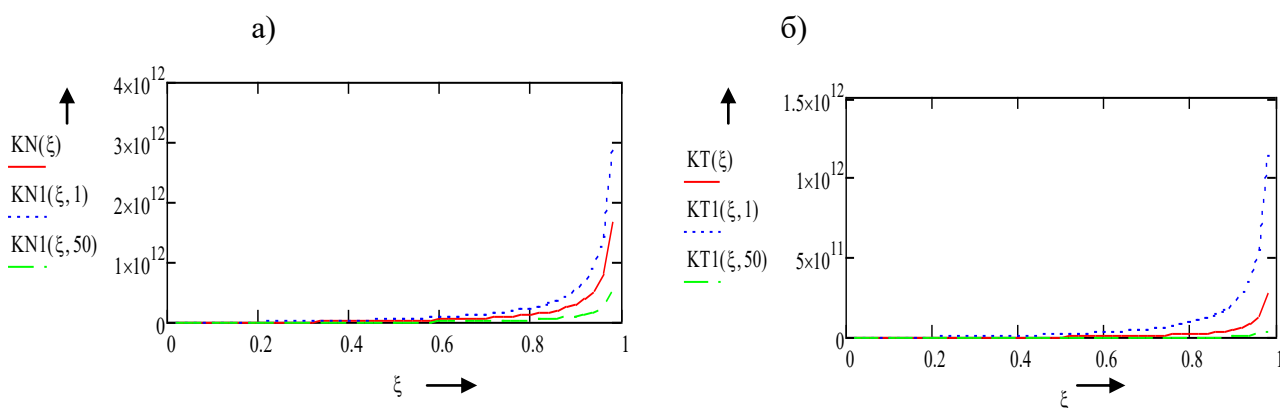


Рис. 3. Зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) контактных жесткостей от коэффициента перфорации: (—) – контакт монолитных сред; (---) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n = 0,1$; (•••) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n = 0,9$; распространение волны вдоль слоев

Вычисление фазовой скорости продольной волны, следуя рекомендациям [2], осуществлялось на основании выражения (4):

$$clnh = \sqrt{\frac{1}{(\rho_1 \cdot n + \rho_2 \cdot (1-n)) \cdot \left(\frac{n}{\rho_1 \cdot (clr)^2} + \frac{(1-n)}{\rho_2 \cdot (c_{t2})^2} \right)}}, \quad (4)$$

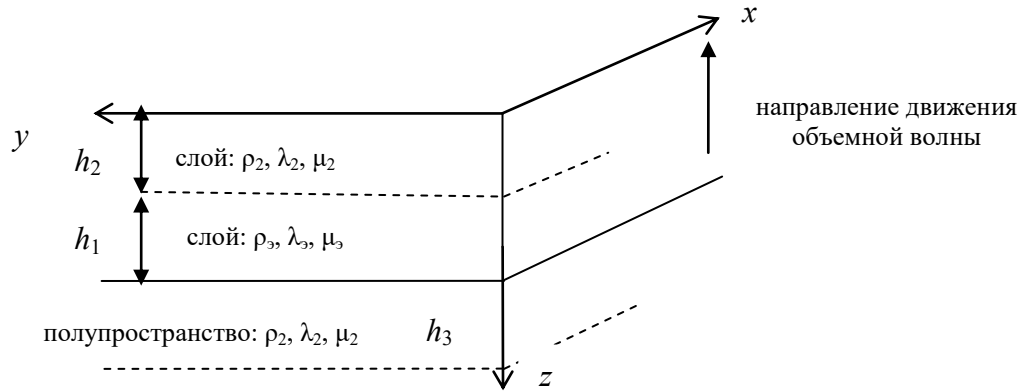


Рис. 4. Система координат и схема движения объемных волн поперек слоев, образующих плоскостойкую структуру

Вычисление фазовой скорости поперечной волны осуществлялось на основании выражения (5):

$$ctn2 = \sqrt{\frac{n \cdot \mp 1 \cdot ctr^2 + (1 - n) \cdot c_{t2}^2}{\rho_1 \cdot n + \rho_2 \cdot (1 - n)}}, \quad (5)$$

Результаты вычислений по формулам (4). (5) представлены на рис.6. Сравнение графиков на рис. (2) и (6) позволяет сделать вывод о более значимом воздействии особенностей структуры на волновой процесс при его движении поперек слоев.

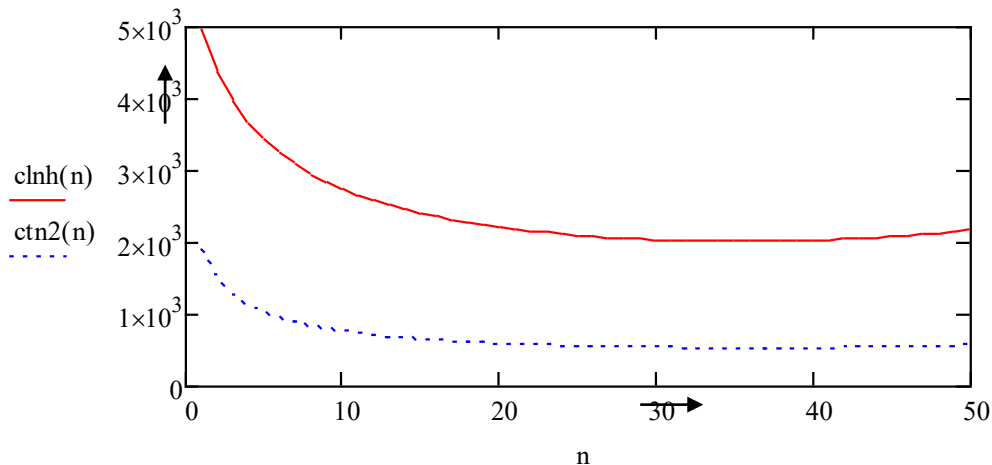


Рис. 6. Зависимости фазовой скорости продольной (—) и поперечной (---) волн от относительной толщины слоев в неоднородной структуре при волновом движении ортогонально слоям

Влияние рассматриваемых структурных особенностей на контактные жесткости учитывалось при подстановке выражений (4), (5) в выражения (1). Результаты вычислений приведены на рис. 7 (а, б)

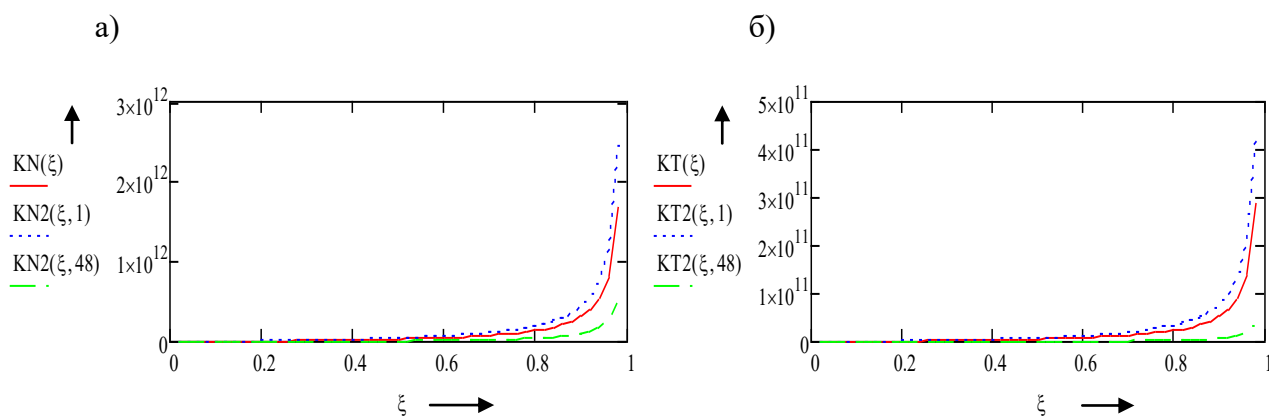


Рис. 7. Зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) контактных жесткостей от коэффициента перфорации: (—) – контакт монолитных сред; (---) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n = 0,1$; (•••) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n = 0,9$; распространение волны ортогонально слоям

Список литературы

1. Аббакумов К. Е. Акустические характеристики твердых упругих сред с ориентированной трещиноватостью/ К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин, И. Г. Сидоренко // Дефектоскопия. – 2022. – №7. – С.1-13.
2. Бреховских Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховский, О. А. Годин. – Москва: Наука, 1989. – 416 с.
3. Быков В. Г. Поглощение упругих волн в тонком слое зернистой среды/ В. Г. Быков // Акустический журнал. – 1997. – Т.43, №3. – С. 323–328.

Контакты:

keabbakumov@etu.ru (Аббакумов Константин Евгеньевич)