

УДК 534.231.1

**О ПРОХОЖДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ  
ЧЕРЕЗ КОНТАКТНЫЙ СЛОЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

*Цветянский В. Л.*

Рассмотрено прохождение ультразвуковых колебаний через контактный слой, образованный неровностями контактирующих поверхностей и веществом, создающим акустический контакт. Предложена модель в виде совокупности плоскопараллельных слоев определенных толщин, для которой получены выражения формы и спектра прошедших и отраженных волн в случае монохроматических и импульсных сигналов.

При акустических исследованиях твердых тел важную роль в передаче ультразвуковых колебаний играет переходной (контактный) слой, образованный неровностями контактирующих поверхностей и веществом (клеем или смазкой), заполняющим зазоры между ними и создающим акустический контакт. Несмотря на малые толщины контактных слоев, их влияние на результаты исследований чрезвычайно велико, что подтверждается многочисленными экспериментами [1—4].

Воспользуемся моделью контактного слоя, учитывающей микрогеометрию контактирующих поверхностей [5]. Для построения модели реальный контактный слой разобьем на  $N$  уровней. Вероятность существования в контактном слое участков, имеющих одинаковую толщину  $d_i$ , определяется отношением суммы их длин к длине границы контакта. В таком приближении реальный контактный слой можно представить состоящим из плоскопараллельных участков. Каждый участок имеет определенную толщину  $d_i$  и относительную длину  $L_i$ , численно равную разности вероятностей существования контактного вещества на  $i$ -м и  $i+1$ -м уровнях.

Решение будем искать в геометрическом приближении при выполнении следующих условий: контактирующие поверхности имеют плавные неровности, волновые поля исследуются в зоне Фраунгофера, когда точка наблюдения достаточно удалена от контактного слоя, т. е. набеги фаз от разных плоскопараллельных участков до точки наблюдения равны. Оба этих условия, как правило, выполняются при экспериментальных исследованиях.

Если известен закон распределения неровностей контактирующих поверхностей, то построение модели значительно упрощается. Например, для нормального закона распределения неровностей поверхностей [6]

$$(1) \quad L_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_i} e^{-t^2/2} dt - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_{i+1}} e^{-t^2/2} dt,$$

где

$$t_i = \frac{H_{\max} - 2d_i}{2H_{\text{СК}}}; \quad H_{\max} = H_{\max 1} + H_{\max 2}, \quad H_{\text{СК}} = \sqrt{H_{\text{СК}1}^2 + H_{\text{СК}2}^2}.$$

Здесь  $H_{\max 1}$ ,  $H_{\max 2}$ ,  $H_{\text{ск}1}$ ,  $H_{\text{ск}2}$  — соответственно максимальные и средние квадратичные неровности контактирующих поверхностей. Отметим, что значения интегралов (интегралов вероятностей) табулированы [7].

Пусть через контактный слой нормально проходит плоская волна давления

$$(2) \quad p(t) = p_0 e^{j(k_3 z - \omega t)}.$$

Выражения для прошедшей и отраженной волн по аналогии с прохождением волн через плоскопараллельный слой запишем следующим образом:

$$(3) \quad p'(t) = \hat{W} p_0 e^{j(k_1 z - \omega t)},$$

$$(4) \quad p''(t) = \hat{V} p_0 e^{j(-k_3 z - \omega t)}.$$

Здесь  $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ ,  $k_2 = 2\pi/\lambda_2$ ,  $k_3 = 2\pi/\lambda_3$  — соответственно волновые числа для среды, в которую проходит волна, контактного слоя и среды, из которой падает волна,  $\omega$  — круговая частота,  $\hat{W}$  и  $\hat{V}$  — соответственно эффективные коэффициенты прозрачности и отражения по давлению, учитывающие микрогеометрию контактирующих поверхностей.

Поскольку распределение неровностей в контактирующих поверхностях носит случайный характер, то распределение участков модели также носит случайный характер. Тогда коэффициенты  $\hat{W}$  и  $\hat{V}$  можно рассчитать, воспользовавшись выражением для среднего значения дискретной случайной величины [8]:

$$(5) \quad \hat{W} = |\hat{W}| e^{j\hat{\varphi}} = \sum_{i=1}^N |W_i| e^{j\varphi_i},$$

$$(6) \quad \hat{V} = |\hat{V}| e^{j\hat{\psi}} = \sum_{i=1}^N |V_i| e^{j\psi_i} L_i,$$

где  $W_i$  и  $V_i$  — комплексные коэффициенты прозрачности и отражения плоскопараллельного слоя толщиной  $d_i$ , определенные по известным формулам [9]. Из (3) — (6) получим:

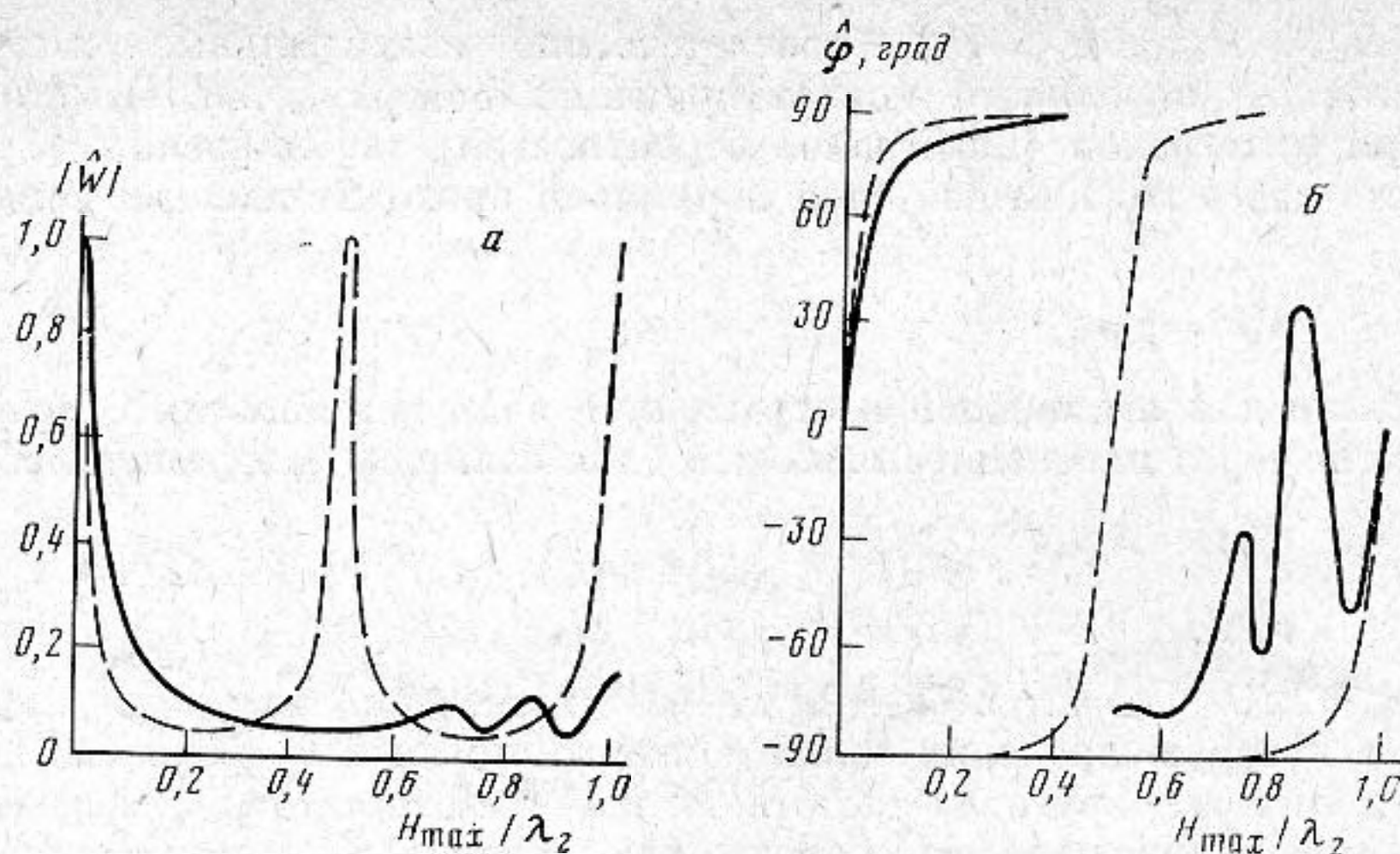
$$(7) \quad p'(t) = \sum_{i=1}^N p_0 |W_i| e^{j(k_1 z - \omega t - \varphi_i)} L_i,$$

$$(8) \quad p''(t) = \sum_{i=1}^N p_0 |V_i| e^{j(-k_3 z - \omega t - \psi_i)} L_i.$$

На фиг. 1, а, б приведены зависимости модуля  $|\hat{W}|$  и фазы  $\hat{\varphi}$  эффективного коэффициента прозрачности от относительной толщины контактного слоя  $H_{\max}/\lambda_2$  (сплошная линия), здесь же для сравнения приведены аналогичные зависимости (пунктирная линия), рассчитанные для плоскопараллельного слоя толщиной, равной полусумме максимальных высот контактирующих поверхностей. (Таким слоем обычно моделируют контактный слой [2, 4].) Результаты расчетов представлены для системы сталь — трансформаторное масло — сталь ( $z_1 = z_3 = 45,6 \cdot 10^9$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $z_2 = 1,25 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $c_1 = c_3 = 5,85 \cdot 10^3$  м/с,  $c_2 = 1,38 \cdot 10^3$  м/с). Здесь  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  и  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  — соответственно импедансы и скорости звука в 1, 2 и 3-й средах.

Аналогичные результаты получены для систем сталь — эпоксидная смола — сталь, плавленый кварц — трансформаторное масло — сталь, плавленый кварц — эпоксидная смола — сталь.

Анализ зависимостей, представленных на фиг. 1, позволяет предположить, что в реальном контактном слое значительно сглажены скачки  $|\hat{W}|$ . Таким образом, опасение, что малейшее изменение толщины контактного



Фиг. 1. Зависимость модуля (а) и фазы (б) коэффициента прозрачности от относительной толщины контактного слоя (монокроматический сигнал)

слоя может привести к существенному изменению чувствительности измерительной аппаратуры [10], возможно, лишено оснований. Фаза  $\hat{\varphi}$  изменяется подобно фазе коэффициента прозрачности плоскопараллельного слоя при сравнительно небольших относительных толщинах контактного слоя ( $0,5 H_{\max}/\lambda_2$ ). Однако в диапазоне  $(0,5-1,0) H_{\max}/\lambda_2$  наблюдаются осцилляции. Этот факт нужно иметь в виду при фазовых измерениях скорости звука и выборе рабочих частот и качества поверхностей исследуемых тел.

Воспользовавшись формулами (5), (6), можно по аналогии с [3] оценить систематическую погрешность измерений скорости звука, вносимую контактным слоем и определяемую временем прохождения колебаний через контактный слой  $\Delta t = \hat{\varphi}/\omega$ . Методика расчетов и результаты приведены в [11]. Отметим, что значительно позднее, используя описанную в [5] модель контактного слоя, эту же погрешность измерений рассчитал автор работы [12].

Рассмотрим теперь прохождение ультразвуковых импульсов через контактный слой. Эта задача важна при исследовании физико-механических характеристик и дефектоскопии твердых тел, а также при изучении механизмов их разрушения методом акустической эмиссии.

Запишем падающий ультразвуковой импульс в виде

$$(9) \quad p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\omega) e^{-j\omega t} d\omega,$$

где  $p(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{j\omega t} dt$  — спектральная плотность. Тогда по аналогии

с монохроматическими колебаниями получим для прошедшего и отраженного импульсов:

$$(10) \quad p'(t') = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N W_i(\omega) p(\omega) e^{-j\omega t'} L_i d\omega,$$

$$(11) \quad p'(t'') = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N V_i(\omega) p(\omega) e^{-j\omega t''} L_i d\omega,$$

где

$$t' = t - \frac{H_{\max} - d_1}{c_1}, \quad t'' = t - 2 \frac{H_{\max} - d_1}{c_2}.$$

Здесь

$$W_1(\omega) = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)(z_2 + z_3)} e^{-jk_2 d_1} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) e^{-2jk_2 d_1} \right]^n,$$

$$V_1(\omega) = \left[ - \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) + \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) e^{-2jk_2 d_1} \right] \times$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) e^{-2jk_2 d_1} \right]^n,$$

где суммирование по  $n$  учитывает многократное отражение импульса в слое [9]. По аналогии с выражениями для импульсов, прошедших через плоскопараллельный слой [13], из (10) и (11) имеем:

$$p'(t') = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)(z_2 + z_3)} \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \right]^n L_i \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} p(\omega) \exp \left\{ -j\omega \left[ t' - (2n+1) \frac{d_i}{c_2} \right] \right\} d\omega =$$

(12)

$$= \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)(z_2 + z_3)} \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \right]^n \times$$

$$\times p \left[ \left[ t' - (2n+1) \right] \frac{d_i}{c_2} \right] L_i,$$

$$p''(t'') = - \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \right]^n L_i \times$$

(13)

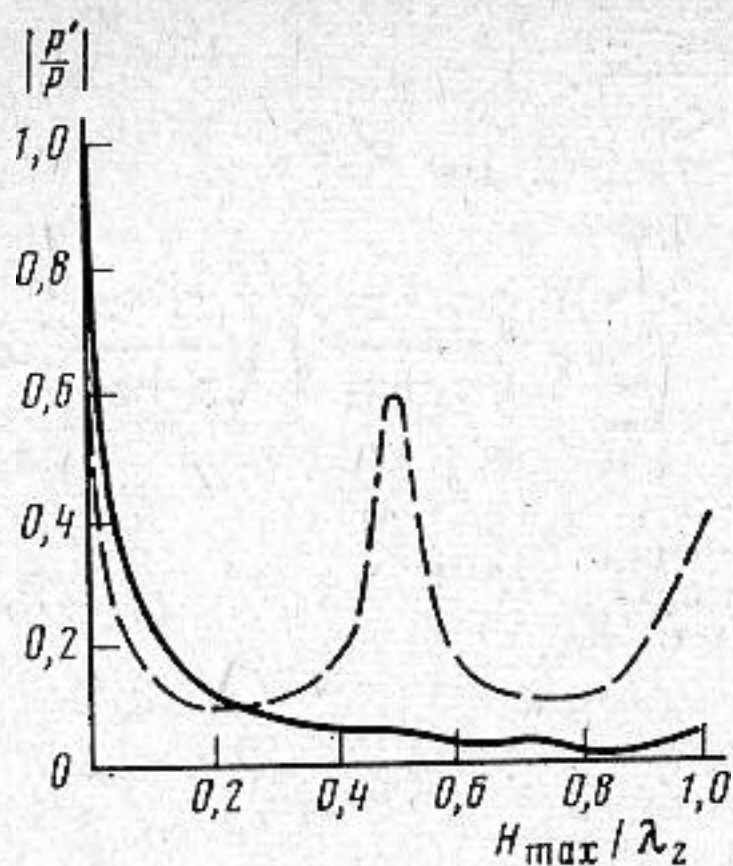
$$\times \int_{-\infty}^{\infty} p(\omega) \exp \left\{ -j\omega \left[ t'' - 2n \frac{d_i}{c} \right] \right\} d\omega +$$

$$+ \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \right]^n L_i \times$$

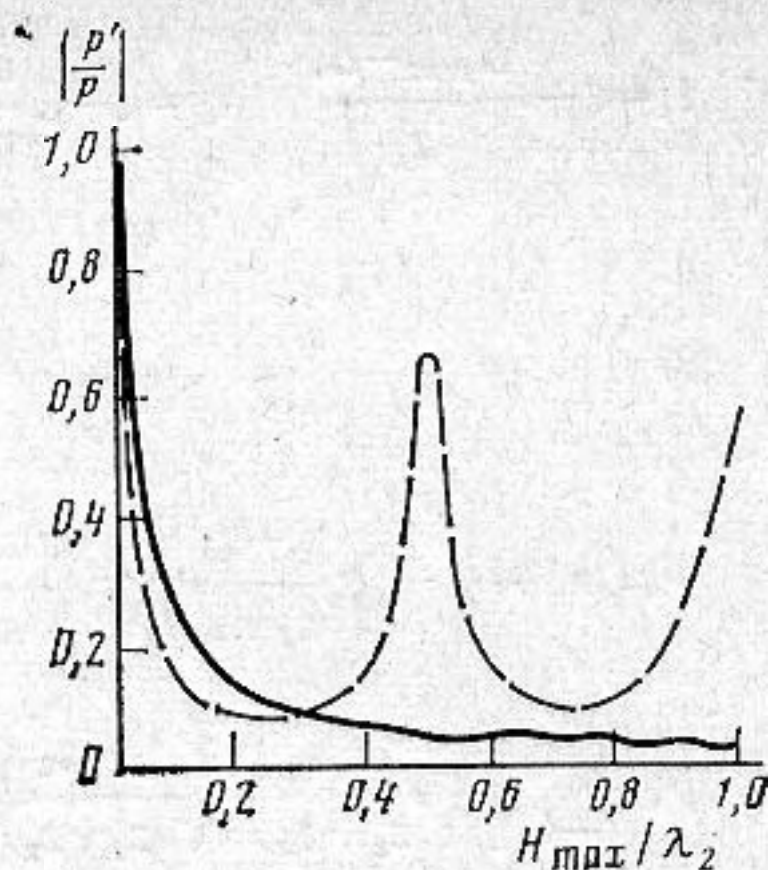
$$\times \int_{-\infty}^{\infty} p(\omega) \exp \left\{ -j\omega \left[ t'' - (2n+2) \frac{d_i}{c} \right] \right\} d\omega =$$

$$= - \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) \right]^n \left\{ \left( \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2} \right) p \left[ t'' - 2n \frac{d_i}{c_2} \right] - \right.$$

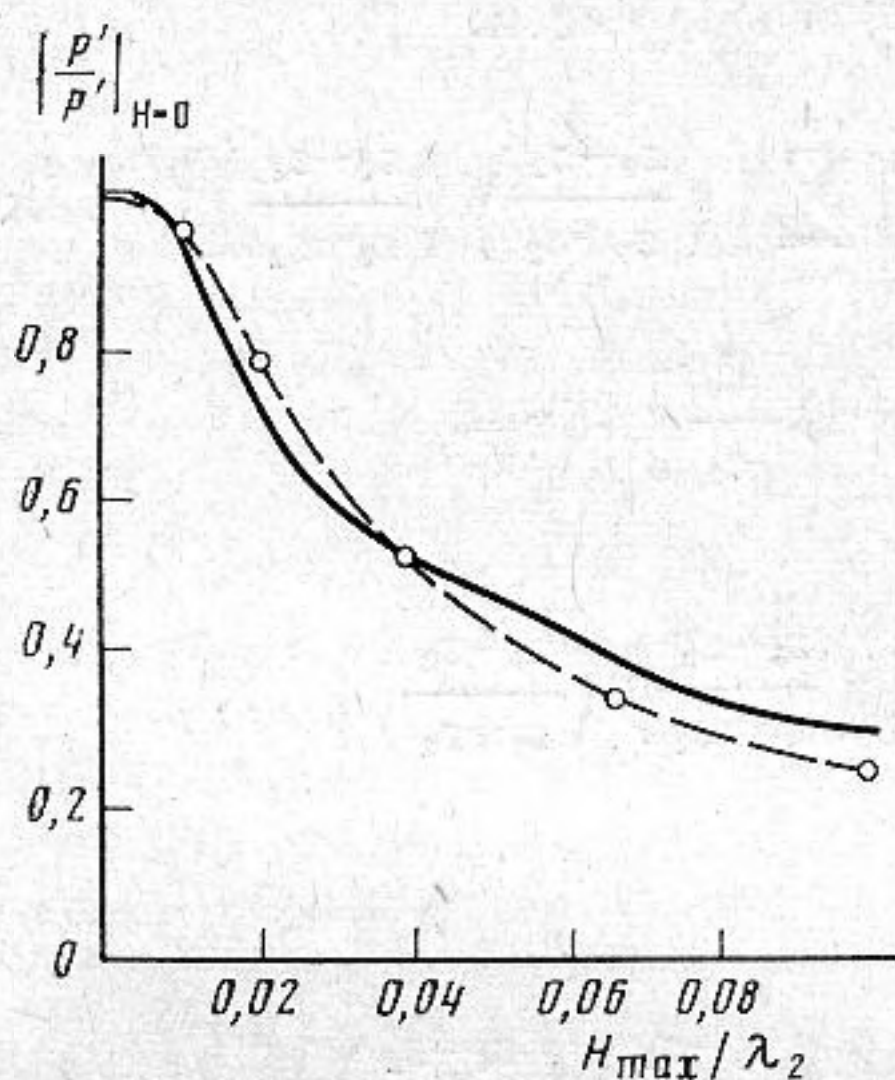
$$\left. - \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right) p \left[ t'' - (2n+2) \frac{d_i}{c_2} \right] \right\} L_i.$$



Фиг. 3



Фиг. 2



Фиг. 4

Фиг. 2. Зависимость модуля отношения максимальных амплитуд прошедшего сигнала и падающего колокольного импульса с синусоидальным заполнением от относительной толщины контактного слоя

Фиг. 3. Зависимость модуля отношения максимальных амплитуд прошедшего сигнала и падающего отрезка синусоиды от относительной толщины контактного слоя

Фиг. 4. Прозрачность контактного слоя для импульсных сигналов в системе сталь — трансформаторное масло — сталь

На фиг. 2 и 3 в качестве примера представлены зависимости модуля отношения максимальных амплитуд прошедшего через контактный слой и падающего импульсов от относительной толщины контактного слоя (сплошные линии). Здесь же для сравнения приведены аналогичные зависимости для плоскопараллельного слоя (пунктирные линии). Результаты расчетов приведены для системы сталь — эпоксидная смола — сталь ( $z_1 = z_3 = 45,6 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $z_2 = 2,8 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>·с,  $c_1 = c_3 = 5,85 \cdot 10^6$  м/с,  $c_2 = 2,5 \cdot 10^3$  м/с) для отрезка синусоиды и колокольного импульса с синусоидальным заполнением.

Из графиков видно, что  $|p'/p|$  является монотонно убывающей функцией при прохождении импульсов через шероховатый слой. При малых шероховатостях ( $H_{\max}/\lambda_2 < 0,25$ ) прозрачность контактного слоя, рассчитанная по указанной модели, выше, чем для эквивалентного плоскопараллельного слоя. Этот факт подтверждается экспериментально [3, 4]. Однако начиная с  $H_{\max}/\lambda_2 > 0,25$  сказывается рассеяние на микронеровностях, которое растет с ростом  $H_{\max}/\lambda_2$ , и прозрачность шероховатого слоя становится меньшей, чем эквивалентного плоскопараллельного слоя.

Сравним результаты расчетов с реальным экспериментом. Для этого воспользуемся результатами измерений, описанных в [14]. В этой работе

исследовано прохождение ультразвуковых импульсных сигналов (колокольный импульс с синусоидальным заполнением) в системе сталь — трансформаторное масло — сталь. Неровности в контактном слое распределены по гармоническому закону. На фиг. 4 приведены экспериментальная (пунктирная линия) и рассчитанная по формуле (12) (сплошная линия) зависимости относительной амплитуды прошедшего сигнала от  $H_{\max}/\lambda_2$ . Как видно из графиков, теоретические и экспериментальные результаты хорошо совпадают.

По формулам (12), (13) легко рассчитываются форма и спектр прошедших и отраженных импульсов, что дает возможность учесть искажения, вносимые контактными слоями при определении типов дефектов путем анализа эхо-сигналов и сигналов акустической эмиссии. Кроме того, можно, рассчитав временную задержку импульса в контактном слое, оценить погрешности импульсных измерений скорости звука и координат дефектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
2. Колесников А. Е. Ультразвуковые измерения. М.: Изд-во стандартов, 1970.
3. Щукин В. А., Яковлев Л. А. Влияние контактирующих слоев на точность измерения скорости звука в твердых телах. — Акуст. ж., 1963, т. 9, № 3, с. 390—392.
4. Соколинский А. Г., Сухаревский Ю. М. Магниево-ультразвуковые линии задержки. М.: Сов. радио, 1966.
5. Цветянский В. Л., Залесский В. В. Влияние микрогеометрии поверхности на распространение упругих колебаний при акустических исследованиях твердых тел. — Изв. Сев.-Кавказск. научного центра высшей школы. Естественные науки, 1976, № 4, с. 58—61.
6. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1974.
8. Брант З. Статистические методы анализа наблюдений. М.: Мир, 1975.
9. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1974.
10. Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1965.
11. Цветянский В. Л., Залесский В. В. Влияние микрогеометрии поверхности на точность измерения скорости ультразвука в твердых телах. — В кн.: Вопросы современной ультразвуковой спектроскопии. Матер. III Всес. конф. Каунас, 1976, с. 67—70.
12. Максимов В. Н. Измерение скорости ультразвука в твердых телах с учетом статистических характеристик контактных слоев. — Акуст. ж., 1979, т. 14, № 2, с. 299—301.
13. Меркулов Л. Г., Вережкин В. М. Прохождение и отражение ультразвукового импульса для плоскопараллельной пластины в жидкости. — Дефектоскопия, 1965, № 5, с. 13—21.
14. Кулик А. А. Потери ультразвука на границе ввода и приема при контактной дефектоскопии металлов. — Дефектоскопия, 1973, № 1, с. 102—108.

Научно-исследовательский институт  
механики и прикладной математики  
Ростовского государственного университета

Поступила в редакцию  
15.I.1980  
После исправления  
9.IX.1980