ЛИТЕРАТУРА

[1] Ахиезер А. И., Любарский Г. Я.//ДАН СССР. 1951. 80. С. 193. [2] Ахиезер А. И., Половин Р. В.//ЖЭТФ. 1956. 30. С. 696. [3] Mori W. B.// IEEE Trans. Plasma Sci. 1987. 15, N 2. P. 88. [4] Katsouleous T., Mori W. B.// Phys. Rev. Let. 1988. 61. P. 90. [5] Алешин И. М., Дрофа М. А., Кузьменков Л. С.//Физика плазмы. 1993. 19, № 8. С. 999. [6] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика, ч. 1. М., 1976. С. 190. [7] Кривицкий В. С., Владимиров С. В.//ЖЭТФ. 1991. 100. С. 1493. [8] Алешин И. М.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. 33, № 4. С. 84.

Поступила в редакцию
21.04.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 5

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.222

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОВЫСТУПОВ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

О. В. Руденко, Чинь Ань Ву*)
(кафедра акустики)

Показано, что коэффициенты отражения волн первой и второй гармоник от поверхности поджатого контакта как функции прижимающего давления несут информацию о статистических характеристиках размеров микровыступов. Построена модель контакта как ансамбля пружинок различной длины. Предложен способ обработки экспериментальных данных. Получена оценка характерных размеров элемента шероховатости, отвечающая классу чистоты образца.

Класс чистоты контактирующих поверхностей определяет долговечность машин и механизмов, имеет важное значение для многих современных технологий. Фактическая площадь контакта измеряется по его электропроводности, сближению шероховатых поверхностей под действием нагрузки, по наблюдению оптических или иных

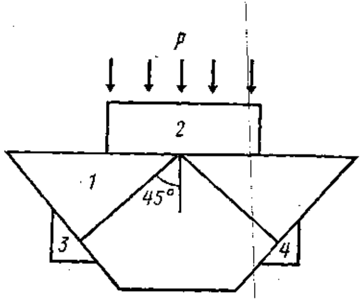

Рис. 1

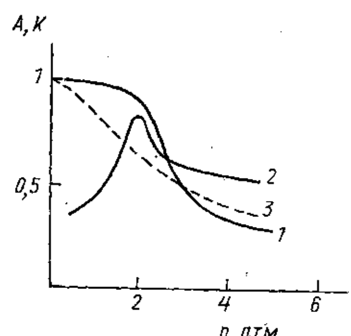

Рис. 2

физических явлений в контактной области [1]. Каждый из этих методов эффективен в определенных условиях, например для проводящих или оптически прозрачных материалов.

Известно, что акустические методы диагностики благодаря своей простоте и универсальности наиболее широко используются в приложениях. Поэтому при наблюде-

*) Вьетнам.

нии новых акустических явлений имеет смысл оценить перспективы их использования для целей диагностики.

В работе [2] проведен следующий эксперимент (рис. 1). К поверхности полированной стеклянной подложки *1*, имевшей 14-й класс чистоты, прижимались образцы стекла *2* с различным качеством поверхности. Ультразвуковой пучок от излучателя *3* падал под углом 45° на плоскость контакта и после отражения регистрировался приемником *4*. Зависимость коэффициента отражения K для амплитуды 1-й гармоники от приложенного давления изображена на рис. 2 (кривая *1*). Видно, что при малых p контакта фактически нет, поверхность подложки свободна и $K=1$. С ростом p поверхности подложки и образца сближаются, улучшая акустическое качество контакта. При этом все большая часть энергии волны проходит в образец *2*, а коэффициент отражения K уменьшается. В области падения K наблюдается максимум амплитуды отраженной второй гармоники A (кривая *2* на рис. 2), сам факт появления которой обусловлен нелинейными свойствами шероховатой границы [3, 4].

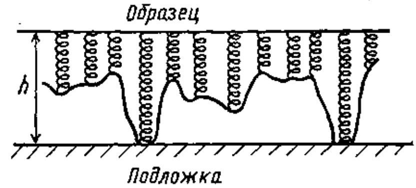

Рис. 3

Эти данные могут быть использованы для определения статистических характеристик шероховатости, в частности для восстановления функции распределения микровыступов по высоте.

Предлагается простая модель контакта, иллюстрируемая рис. 3. Микровыступам сопоставляется ансамбль равномерно расположенных одинаковых пружинок с разными длинами l_i. Пружина деформируется под действием силы F_i по закону Гука, когда ее длина больше толщины контакта h:

$$F_i=k(l_i-h)\Theta(l_i-h). \tag{1}$$

Здесь k — жесткость, Θ — единичная функция Хевисайда. Переходя к давлению $p=F_i/\Delta S_i$ (где ΔS_i — площадь контактной поверхности на одну пружину) и суммируя по всем i, получим

$$p=E\left\langle\frac{l_i-h}{l_i}\Theta(l_i-h)\right\rangle=E\int_h^{l_0}\frac{l-h}{l}W(l)\,dl. \tag{2}$$

Здесь E — модуль Юнга, l_0 — максимальная длина пружины, W — вероятностное распределение пружин по их длинам.

Пусть в отсутствие волны $h=h_0$, $p=p_0$. При включении источника ультразвука под действием переменного давления p' происходят небольшие изменения толщины контакта ξ. Полагая в (2) $p=p_0+p'$, $h=h_0+\xi$, с точностью до величин второго порядка малости по малым возмущениям p', ξ получим связь между ними:

$$p'\approx-\left[E\int_{h_0}^{l_0}\frac{W(l)}{l}\,dl\right]\xi+\left[E\,\frac{W(h_0)}{h_0}\right]\frac{\xi^2}{2}. \tag{3}$$

Связь (3) является нелинейной, хотя рассматривался ансамбль линейных пружин.

Ограничимся здесь анализом отраженной волны только на основной частоте. Поскольку длина волны $\lambda\gg h_0$, будем считать область контакта бесконечно тонким упругим слоем, упругость которого $\varkappa$ определяется коэффициентом при ξ в формуле (3):

$$\varkappa=E\int_{h_0}^{l_0}\frac{W(l)}{l}\,dl. \tag{4}$$

Коэффициент отражения от такого слоя [5] (с учетом падения под углом 45°) равен

$$|K|^2=\left[1+\left(\frac{\sqrt{2}\,\varkappa}{\omega\rho c}\right)^2\right]^{-1}. \tag{5}$$

Здесь ω — круговая частота, ρ — плотность среды, c — скорость звука.

Решим вначале прямую задачу, принимая в качестве W известное в статистической радиофизике β-распределение:

$$W = B^{-1}\left(\frac{l}{l_0}\right)^{a-1}\left(1-\frac{l}{l_0}\right)^{b-1}\cdot\frac{1}{l_0},\quad B(a,\ b)=\frac{\Gamma(a)\,\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)}. \tag{6}$$

В частном случае $a=b=2$ из (2), (4) получаем

$$p_0 = E\left(1-\frac{h_0}{l_0}\right)^3,\quad \varkappa = \frac{3}{l_0}E\left(1-\frac{h_0}{l_0}\right)^2. \tag{7}$$

Выражая $\varkappa$ через p_0 и подставляя результат в (5), получим

$$|K|^2 = \left[1+\left(\frac{3\sqrt{2}\,E}{\omega\rho c l_0}\right)^2\left(\frac{p_0}{E}\right)^{4/3}\right]^{-1}. \tag{8}$$

Требуя совпадения (8) с кривой *1* на рис. 2 в точке $p_0=3$ атм и принимая для стекла $\rho=2{,}3\cdot10^3$ кг/м^3, $c=3{,}2\cdot10^3$ м/с, $E=2{,}4\cdot10^{10}$ кг·м$^{-1}$·с$^{-2}$, для ультразвука на частоте 20 МГц придем к разумной оценке $l_0\approx3{,}5\cdot10^{-2}$ мкм. Соответствующая кривая *3*, рассчитанная по (8), изображена на рис. 2. При выборе других значений a, b удается получить кривые, идущие ближе к экспериментальной зависимости. Однако заниматься поиском подходящего W нет необходимости, потому что удается решить обратную задачу.

Схема решения такова. Дифференцируя интегралы (2), (4) по h, получим

$$\frac{dp}{dh} = -\varkappa,\quad \frac{d\varkappa}{dh} = -E\,\frac{W(h)}{h}. \tag{9}$$

В формулах (9) и далее для простоты будем писать: $h_0=h$, $p_0=p$. Из (9) находим выражение для функции распределения:

$$W(l) = \frac{1}{E}\,l\,\frac{d^2p}{dl^2}. \tag{10}$$

Чтобы найти $p(l)$ и рассчитать $W(l)$ по формуле (10), аппроксимируем экспериментальную зависимость $|K|^2$, отвечающую кривой *1* на рис. 2, выражением

$$|K|^2 = [1+f^2(p/p_*)]^{-1}. \tag{11}$$

Вид функции f и значение характерного давления p_* определяются по данным эксперимента. Из сравнения (11) с теоретической зависимостью (5) с учетом (9), (10) следует ($P=p/p_*$):

$$\frac{dP}{dl} = -\frac{\omega\rho c}{\sqrt{2}\,p_*}f(P),\quad W = \frac{1}{2E}\left(\frac{\omega\rho c}{\sqrt{2}\,p_*}\right)^2 l\left(\frac{df^2}{dP}\right)_{P=P(l)}. \tag{12}$$

В частном случае $f(P)=P^n$ получаем такую функцию распределения:

$$W(l) = \frac{p_*}{E}\,\frac{n}{(1-n)^2}\left[\frac{\omega\rho c l_0}{\sqrt{2}\,p_*}(1-n)\right]^{\frac{1}{1-n}}\frac{l}{l_0^2}\left(1-\frac{l}{l_0}\right)^{\frac{1}{1-n}-2}. \tag{13}$$

Эта функция имеет вид β-распределения (6) с параметром $B(2,\ n/(1-n))$. Теперь из (13) можно оценить характерную высоту микровыступов:

$$l_0 = \frac{\sqrt{2}\,p_*}{\omega\rho c\,(1-n)}\left[\frac{1}{B}\,\frac{E}{p_*}\,\frac{(1-n)^2}{n}\right]^{1-n}. \tag{14}$$

Выбирая $n=0{,}9$, $p_*=1{,}5$ атм, получим оценку ($B^{-1}=90$) $l_0\approx0{,}5\cdot10^{-2}$ мкм. С данными независимых измерений профиля шероховатой поверхности лучше согласуется случай $n=2/3$, $p_*=1{,}3$ атм ($B^{-1}=6$). При этом $l_0\approx3{,}44\cdot10^{-2}$ мкм.

В заключение отметим, что для более точного определения статистических характеристик неровностей необходимо обработать данные измерений отраженной волны на частоте второй гармоники (кривая *2* на рис. 2). Эти результаты будут опубликованы в последующих работах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-15453).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Демкин Н. Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М., 1970. [2] Северин Ф. М. Нелинейные явления при отражении звука от границы раздела твердых тел: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1990. [3] Северин Ф. М., Солодов И. Ю., Шкуланов Ю. Н.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1988. **29**, № 4. С. 94. [4] Richardson T.//Intern. J. Eng. Sci. 1979. **17**, N 1. P. 73. [5] Исакович М. А. Общая акустика. М., 1973.

Поступила в редакцию
24.05.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 5

УДК 621.394

ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ СИММЕТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК УСКОРЕНИЙ С ОБЩЕЙ ИНЕРЦИОННОЙ МАССОЙ

О. С. Тонаканов
(кафедра акустики)

Предлагается конструкция и приводятся основные параметры приемника ускорений, имеющего три канала приема, ориентированных перпендикулярно друг другу. Приемник может найти применение в гидроакустике и сейсмометрии.

Методы исследования колебаний в акустике и сейсмологии зачастую имеют общие задачи и в определенной части совпадают. Так, использование в акустике кроме приемников звукового давления еще и приемников градиента давления позволяет расширить объем получаемой информации о структуре звуковых полей, местонахождении источников звука. Приемник градиента давления соколеблющегося типа имеет в своей основе определенным образом ориентированные (как правило, по осям декартовой системы координат) датчики смещения, скорости или ускорения, обладающие независимыми от частоты дипольными характеристиками направленности.

Выбор типа датчика и его конструкции является одной из основных задач при разработке приемников такого типа. Собственно датчик (одно- или многоканальный) представляет собой первичный преобразователь механических колебаний, будь то звуковая волна или колебания грунта, как правило, в электрические. Поэтому датчик градиентного приемника соколеблющегося типа может играть роль сейсмоприемника. В литературе широко освещены принципы построения градиентных сейсмоприемников, методы их калибровки и их функционирование в различных условиях [1—5]. Наиболее предпочтительными являются трехканальные приемники с автономными датчиками на каждом канале. Частичное объединение их конструктивных элементов представляет определенный практический интерес.

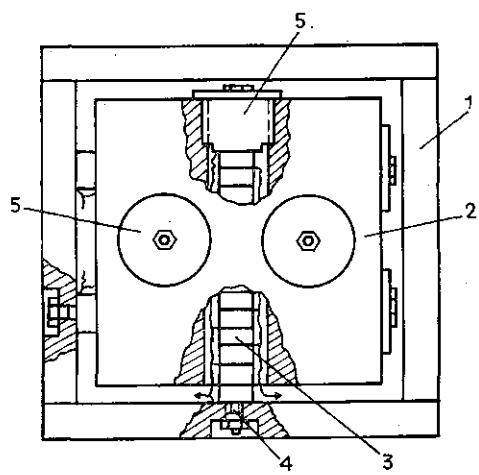

Рис. 1. Общий вид приемника ускорений: *1* — корпус, *2* — груз, *3* — пьезоэлементы, *4* — стяжная шпилька, *5* — крышки

Известно, что градиентный приемник в идеальном случае должен обладать симметричной конструкцией. На это, в частности, обращается внимание в работе [5]. Так, в работе [6] приводится описание трехканального сейсмоприемника с общей инерционной цилиндрической массой. Очевидно, что такой приемник несимметричен