Следует отметить, что при неизменной энергии импульса интенсивность рассеяния максимальна, когда длительность импульса L сравнима с внутренним масштабом турбулентности $l_{вн}$.

Проведенное рассмотрение может быть обобщено на случай, когда зондирование слоев ведется взрывными источниками не слишком большой мощности и необходимо учитывать нелинейные эффекты только при распространении падающей волны p_0. В этом случае для интенсивности рассеянной волны $\overline{p_1^2}$ по-прежнему имеем выражение (4), но необходимо заменить A^2/R_0^2 на интенсивность волны от взрывного источника в точке рассеяния, $p_b^2(R_0)$ и учесть изменение длительности импульса $L(R_0)$ по мере распространения взрывного импульса, что приводит к изменению спектрального состава рассеиваемого импульса и к зависимости γ от R_0. Для оценок средней интенсивности отраженного сигнала могут быть использованы эмпирические формулы для давления $p_b(R_0)$ и длительности импульса $L(R_0)$ от расстояния до места взрыва (см., например, [3]).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федоров К. Н.* Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
2. *Татарский В. И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
3. *Лаврентьев Э. В., Кузян О. И.* Взрывы в море. Л.: Судостроение, 1977.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25.III.1980

УДК 621.37/39 : 534

НАПРАВЛЕННОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЕРНОГО ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Карро-Эст А. Б., Поляков В. В., Рождественский А. Н.

Работа посвящена исследованию поля излучения веерного встречно-штыревого преобразователя (ВШП) поверхностных акустических волн (ПАВ), применяемого в устройствах частотной и временной селекции [1].

Конфигурация веерного ВШП, состоящего из N-пар электродов, расположенных на поверхности подложки из пьезоэлектрического материала, показана на фиг. 1. На фигуре Q_n — угол наклона n-го электрода, W — апертура преобразователя, L_1, L_2 — максимальный и минимальный размеры ВШП в направлении оси x, $e(t)$ — внешнее гармоническое напряжение. Волновой процесс, возбужденный точечными ПАВ-источниками, расположенными на системе поверхностных электродов ВШП в сечении dy, может быть представлен в виде суперпозиции плоских волн

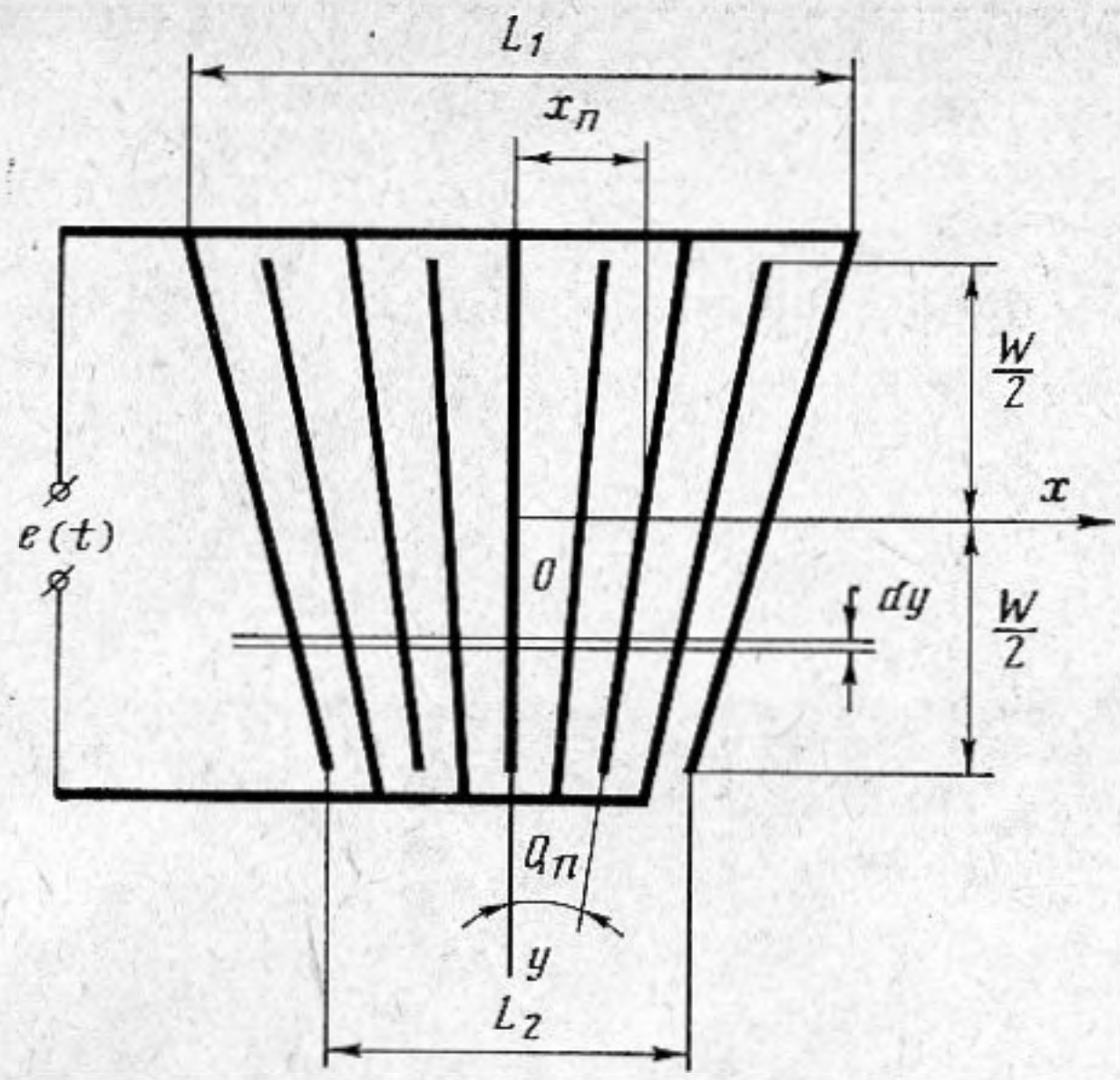
$$\dot{U}(y) = \sum_{n=-N}^{N} (-1)^n U_n e^{-j2\pi f \frac{x_n - y \operatorname{tg} Q_n}{V}}. \tag{1}$$

Здесь U_n — амплитуда ПАВ-источника; f — частота внешнего гармонического напряжения; $(x_n - y \operatorname{tg} Q_n)$ — абсцисса ПАВ-источника, V — скорость распространения ПАВ. В выражении (1) учтен тот факт, что соседние электроды ВШП имеют электрические потенциалы противоположной полярности. Выражение (1) позволяет произвести оценку некоторых параметров направленности веерного ВШП, а именно ширину акустического луча по первым нулям B и ординату главного максимума излучения Y.

Пусть веерный ВШП характеризуется равномерным шагом электродов вдоль направления x, линейным законом изменения наклона электродов и равномерной плотностью амплитуды механических смещений в точечных ПАВ-источниках $x_n = n\frac{\lambda_0}{2}$, $n=0, 1, 2 \ldots N$, а $\lambda_0/2$ — пространственный шаг электродов в сечении $y=0$;

$$\operatorname{tg} Q_n = k x_n, \quad \text{где} \quad k = \frac{L_1 - L_2}{\lambda_0 N W}; \tag{2}$$

$$U_n = U_0.$$



Фиг. 1. Веерный встречно-штыревой преобразователь поверхностных акустических волн

Подставляя (2) в (1) и учитывая, что $(-1)^n = e^{jn\pi}$, получим

$$\dot{U}(y) = \sum_{n=-N}^{N} U_0 e^{jn\pi\left[1-\frac{f}{f_0}(1-ky)\right]}, \tag{3}$$

где $f_0 = \frac{V}{\lambda_0}$ – частота акустического синхронизма для сечения $y=0$. Ряд (3) имеет конечную сумму

$$U(z) = U_0\left[1 + 2\frac{\sin Nz/2}{\sin z/2}\cos(N+1)z/2\right], \tag{4}$$

$$z = \pi\left[1 - \frac{f}{f_0}(1-ky)\right].$$

Для многоэлектродного веерного ВШП ($N \gg 1$) выражение (4) приводится к функции вида

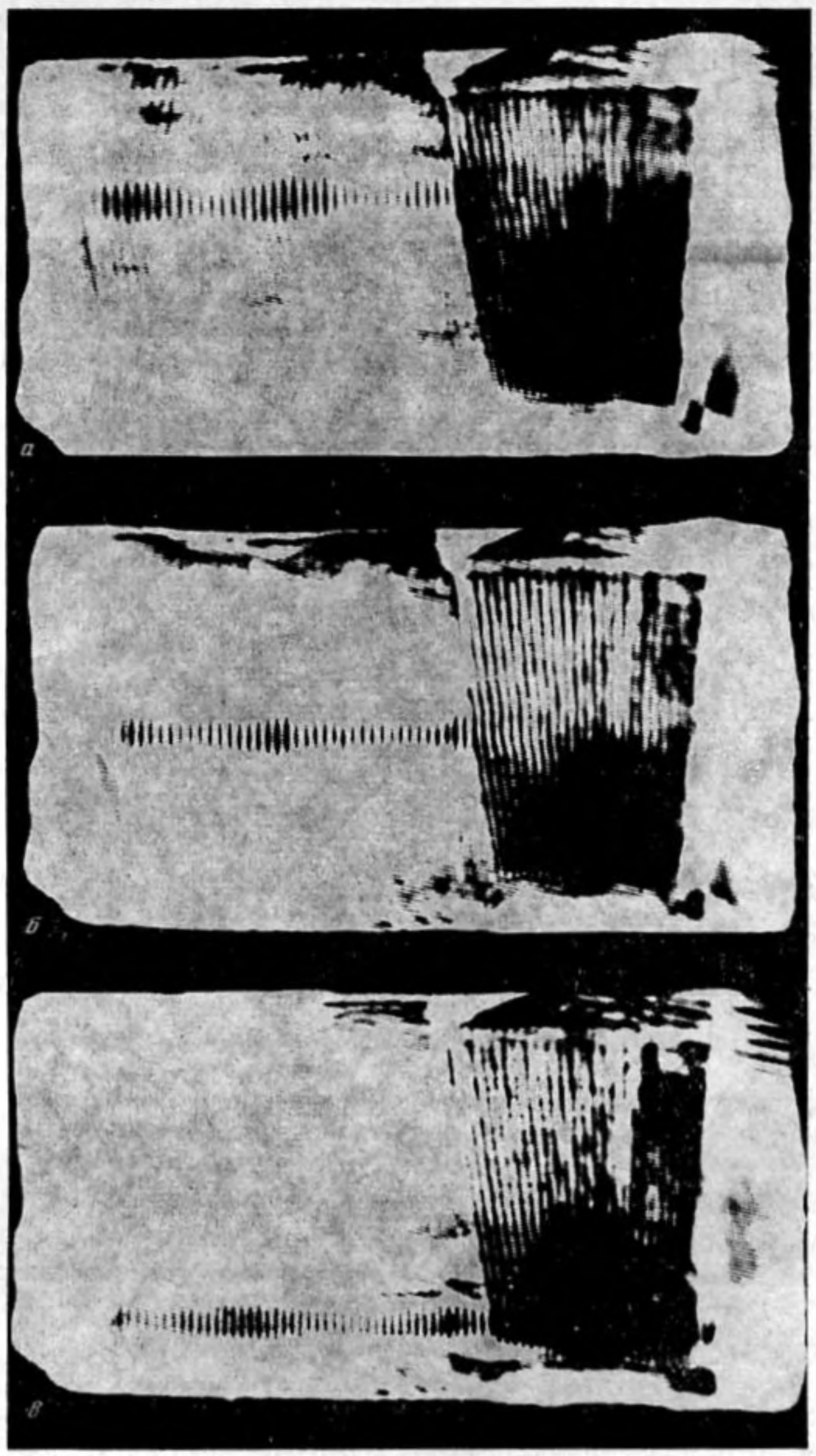
$$U(y) = 2NU_0 \operatorname{sinc} N\pi/2\left[1 - \frac{f}{f_0}(1-ky)\right]. \tag{5}$$

Из выражения (5) следует, что пространственное распределение поля, излучаемого веерным ВШП, имеет многолепестковую форму с ярко выраженным узким акустическим лучом, соответствующим главному лепестку функции $\operatorname{sinc} N\pi/2\left[1 - \frac{f}{f_0}(1-ky)\right]$. Оценку параметров направленности Y и B можно производить по формулам, полученным из выражения (5):

$$Y = \frac{1}{k}\left(1 - \frac{f_0}{f}\right), \tag{6}$$

$$B = \frac{4f_0}{kNf}.$$

Выражения (6) показывают, что главный максимум излучения смещается вдоль оси y при изменении частоты внешнего гармонического воздействия, а ширина акустического луча B уменьшается с ростом частоты, числа электродов и угла наклона штырей.



Фиг. 2. РЭМ-фотографии потенциального рельефа поля излучения веерного встречно-штыревого преобразователя при гармоническом возбуждении с частотой 12,5 МГц (*а*), 13,0 (*б*), 14,5 (*в*)

Экспериментальное исследование направленности излучения веерного ВШП производилось методом визуализации ПАВ. Среди таких методов для пьезоэлектрических материалов наибольший интерес представляет метод зондирования поля ПАВ-излучения электронным лучом с использованием растрового электронного микроскопа, позволяющего наблюдать и фотографировать потенциальный рельеф акустических волн [2, 3]. Высокая разрешающая способность растрового микроскопа РЭМН-1, составляющая 1÷3 мкм, и возможность изменения увеличения изображения в пределах 20÷1000 раз дают возможность изучать поле излучения ПАВ-преобразователей в ближней и дальней зонах в необходимом масштабе.

Эксперименты проводились с ПАВ-прибором, выполненным на подложке из ниобата лития Y-среза размером 12×2×22 мм^3 (в направлениях (x, y, z) соответственно). На полированную поверхность пьезоподложки был нанесен встречно-штыревой преобразователь веерной формы со средней частотой 13,0 МГц. ВШП состоял из 48 электродов, имел апертуру 9 мм, максимальный и минимальный размеры в направлении кристаллографической оси z, равные L_1=7,5 мм и L_2=5,5 мм. Для подавления пара-

зитных отражений ПАВ на часть поверхности пьезоподложки и ее торцевые грани был нанесен поглотитель. ПАВ-прибор помещался в вакуумированную колонну растрового электронного микроскопа и облучался тонким электронным лучом, образующим на рабочей поверхности пьезоподложки телевизионный растр. Возбуждение веерного ВШП производилось высокочастотным гармоническим напряжением от генератора Г4-68.

Акустические волны, возбужденные веерным ВШП, меняют потенциальный рельеф поверхности пьезоподложки и вызывают модуляцию вторичного электронного тока, достигающего коллектора электрооптической системы микроскопа. Это приводит к изменению яркости воспроизведения элементов изображения исследуемой поверхности на экране кинескопа видеоконтрольного устройства. Картина акустического поля проявляется на общем темном фоне изображения поверхности ПАВ-прибора в виде светлых полос, яркость которых тем больше, чем больше мощность ПАВ. Наличие стоячих волн, обусловленных отражениями от поглотителя и граней пьезоподложки, проявляется в виде чередующихся ярких и темных полос, соответствующих пучностям и узлам.

На фиг. 2 представлены фотографии поля излучения веерного ВШП, сделанные с телеэкрана растрового электронного микроскопа. Потенциальный рельеф ПАВ-преобразователя в виде контрастного изображения чередующихся темных и светлых наклонных полос соответствует топологии ВШП. В поле излучения веерного ВШП ярко выражен узкий акустический луч, ширина и положение которого меняются с изменением частоты возбуждения. Боковые лепестки излучения проявляются как менее яркие акустические пучки. Фронт поверхностной акустической волны имеет ступенчатую форму с полуволновым пространственным смещением в области каждого бокового лепестка излучения. Ширина акустического луча, рассчитанная по формуле (6), для анализируемого веерного ВШП составляет 1,8 мм на частоте 13,0 МГц, что хорошо согласуется с данными эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dieulesaint E., Royer D.* Ondes elastiques dans les solides: application an traitement du signal. Paris: Masson, 1974.
2. *Багаев В. П.* Электронный зонд для снятия электрических зарядов с поверхности колеблющегося пьезоэлемента.— Электронная техника, 1969, т. 9, № 2, с. 104—107.
3. *Janski W. J., Wittels N. D.* SEM observations of SAW resonator transverse modes.— Applied Physics Letters, 1979, v. 34, № 9, p. 537—539.

Омский политехнический институт

Поступила в редакцию 3.III.1980

УДК 534

ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗГИБНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

Кононов В. В., Кулемин А. В., Стебельков И. А.

Определение поглощения ультразвука большой интенсивности в различных металлах и сплавах представляет непосредственный практический интерес. Как показывают исследования [1, 2], наименьшими внутренними потерями при колебаниях на частотах 10—20 кГц обладают титановые сплавы. В работе [1] измерялись относительные характеристики рассеяния колебательной энергии $\psi=\Delta W/W$ (ΔW — удельная энергия, поглощаемая в материале за цикл колебаний, W — полная удельная колебательная энергия за цикл) в титановых сплавах ОТ-4, ВТ-3-1 и ВТ-22 на частоте продольных колебаний 10 кГц при амплитудах механического напряжения $\sigma_m \leqslant 60$ кгс/мм² и было показано, что для сплава ВТ-3-1 величина ψ — наименьшая. Представляет интерес исследовать внутренние потери в титановых сплавах при различных видах колебаний, так как отдельные элементы сложных ультразвуковых устройств могут совершать колебания разного типа.

В настоящей работе было исследовано внутреннее трение в титановых сплавах ВТ-8, ВТ-5-1, ВТ-20, ОТ-4-1 и ВТ-3-1 при изгибных и продольных ультразвуковых колебаниях (с частотой $f\approx 20$ кГц) и амплитудой деформации, превышающей 10^{-4}—10^{-3}, вплоть до разрушения. Сплавы исследовались в отожженном (отжиг в вакууме при 590° С, 2 ч) и деформированном на ~20% состоянии.

Для определения коэффициента внутреннего трения при продольных и изгибных колебаниях применялся термоакустический метод [3, 4], который заключается в измерении прироста температуры ΔT в середине колеблющегося на резонансе стержня из исследуемого сплава при импульсном (в течение $\tau=5$ с) включении