

Неоднородная стоячая упругая волна в клиновидной пластине

© Х.Б. Толипов

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),
454080 Челябинск, Россия
e-mail: thb@susu.ac.ru

(Поступило в Редакцию 19 декабря 2012 г. В окончательной редакции 3 июля 2013 г.)

Исследовано акустическое поле в упругой клиновидной пластине вблизи ребра. Поле представлено в виде суперпозиции двух бегущих встречно неоднородных волн. Построены профили стоячих колебаний, форма которых изменяется с приближением к ребру. Обнаружен специфический акустический эффект, возникающий при движении волны от ребра. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментальными измерениями амплитуд колебаний стоячих волн, выполненными на оригинальной установке.

В настоящей работе, являющейся продолжением исследований [1,2], построено акустическое поле, представляющее стоячую волну, образованную двумя бегущими встречно неоднородными волнами. Как показывают исследования, движение поверхностной волны в пластине сопровождается принципиально новыми эффектами. Так, например, при движении волны Рэлея в области, прилегающей к ребру, имеет место потеря ее устойчивости (стационарности). При этом возникает особый тип поверхностной волны, сопровождающийся в ходе движения непрерывной перестройкой акустического поля и излучением объемных волн.

На рис. 1 для угла $\theta_0 = 26^\circ$ приведены зависимости относительной скорости антисимметричной и симметричной волн от координаты r . Как следует из рисунка, до ребра доходит только антисимметричная волна, занимающая область от ребра до границы r_m , скорость которой монотонно падает до нуля.

Фактически акустическое поле в клиновидной пластине вблизи ребра представляет собой наложение двух неоднородных антисимметричных волн, бегущих в прямом и обратном направлениях.

Отметим, что рассматриваемая антисимметричная волна радикально отличается от классической изменяю-

щимися в процессе движения скоростью и амплитудой. Снижение скорости прямой волны и увеличение скорости обратной происходят по одному и тому же закону, что приводит к устойчивой волновой картине.

Амплитуды пучностей стоячей волны, представляющей сумму двух неоднородных антисимметричных волн, можно вычислить по формуле

$$U(r) = U_{\text{inc}}(r) \sin(k_2 r) + U_{\text{ref}}(r) \sin(k_2 r),$$

где падающая волна определяется как $U_{\text{inc}}(r) = [1 - \exp(-k_1 r)] \sqrt{2/\pi k r}$, а обратная — формулой $U_{\text{ref}}(r) = [1 - \exp(-k_1 r_m)] \exp(-k_1 r)$, для случая падения рэлеевской волны единичной амплитуды. Волновое число определяется значением k_2 , а затухание волны — k_1 [2].

Профили пучностей имеют различные форму и высоту и определяются конкуренцией двух механизмов. С одной стороны, сжатие волнового потока и нелинейный рост амплитуды, определяемый множителем $\sqrt{2/\pi k r}$, происходит за счет уменьшения локальной толщины пластины. С другой — отток энергии при возникновении объемных волн, определяемый множителем $[1 - \exp(-k_1 r)]$, ведет к нелинейному затуханию возмущений.

Амплитуда набегающей на ребро антисимметричной волны нелинейно возрастает до значения, определяемого протяженностью области от нуля до r_m и коэффициентом затухания k_1 . С этой амплитудой начинается движение обратной волны. Однако в отличие от падающей интенсивность оттекающего от ребра волнового потока падает только лишь за счет снижения плотности энергии $\exp(-k_1 r)$, поскольку в этой ситуации взаимодействия с противоположной гранью клина не происходит. Отметим, что профили возмущений как в прямой, так и в обратной волне искажены и отличаются от синусоидальных.

С приближением к ребру волновой поток сжимается, плотность энергии растет, что вызывает уменьшение скорости потока. В обратном направлении картина поля кардинально противоположна. Волновой поток расширяется, плотность энергии при этом уменьшается, что

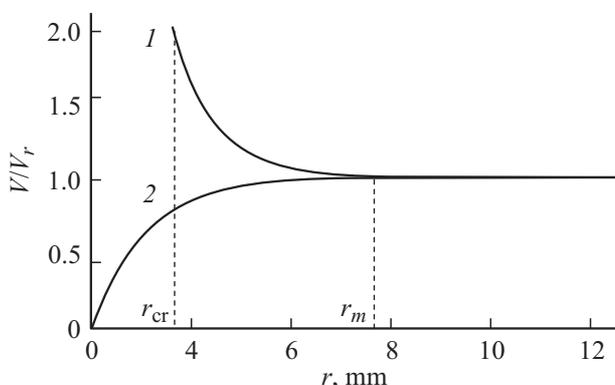


Рис. 1. Зависимость относительной скорости распространения симметричной (1) и антисимметричной (2) волн по оси r от расстояния до ребра клина для $\theta_0 = 26^\circ$, V_r — скорость рэлеевской волны, $f = 2.5$ МГц.

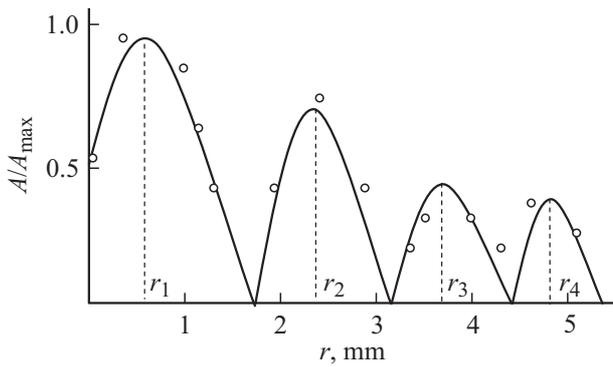


Рис. 2. Зависимость относительных амплитуд стоячей волны от расстояния до ребра для угла клина 26° .

приводит к увеличению скорости потока. Этот эффект является специфическим и характерен только для клиновидной пластины. Особо отметим, что в рассмотренном случае не происходит отражения акустической волны в классическом понимании.

На рис. 2 показана интерференционная структура акустического поля в клиновидной пластине с углом раствора 26° . Счетное количество пучностей антисимметричной волны объясняется ограниченным диапазоном изменения скорости антисимметричной волны, занимающим небольшую область в клине. Расстояния между пучностями стоячей волны с приближением к ребру увеличиваются, что свидетельствует об уменьшении скорости антисимметричной волны.

Для подтверждения полученных теоретических результатов были проведены эксперименты. Согласно проведенным исследованиям, выяснилось, что расстояние между пучностями стоячей волны обычно невелико. Так, например, для образца из дюралюминия, согласно расчетам, на частоте 2.5 MHz расстояние составляет порядка нескольких миллиметров.

В этой связи актуальной встала задача экспериментального определения картины волнового поля, поскольку применяемые традиционные пьезодатчики имеют размеры, намного превышающие размеры зон локализации энергии исследуемых волн. С этой целью была разработана оригинальная установка, использующая электромагнито-акустический (ЭМА) метод приема колебаний [3]. Амплитуды возмущений измеряли ЭМА-приемником, состоящим из электромагнита и индуктора, выполненного в виде прямого проводника [4].

ЭМА-приемник работает следующим образом. Колебания частиц среды в образце в магнитном поле ЭМА-приемника сопровождаются появлением сил Лоренца, действующих на электроны проводимости. В металлическом образце возникают магнитоакустические токи, излучающие электромагнитную волну в окружающее пространство, которые затем принимаются индуктором.

Клиновидная пластина 4 была выполнена из дюралюминия марки D16 с размерами $100 \times 50\text{ mm}$ и с

углом раствора клина 26° . Волну Рэлея возбуждали на утолщенной части образца наклонным пьезодатчиком 3 с углом ввода 70° , импульсами длительностью $5\text{ }\mu\text{s}$ и с частотой заполнения 2.5 MHz (рис. 3, а). Электрические сигналы на пьезодатчик поступали, предварительно усиленные высоковольтным усилителем 2, с генератора импульсов 1. Акустические волны принимались ЭМА-приемником. ЭМА-приемник состоит из электромагнита 7 (рис. 3, а) и индуктора 8, представляющего собой прямой тонкий проводник 9 диаметром 0.015 mm и расположенного на подложке из фольгированного гетинакса (рис. 3, б).

Электрические сигналы с индуктора 8, пропорциональные смещениям волны, через предварительный усилитель 5 поступали на цифровой осциллограф 6 для измерения амплитуды. Образец перемещали перпендикулярно ребру относительно неподвижного ЭМА-приемника с помощью микровинта (на рисунке не показан) с шагом 0.5 mm . Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 2.

Анализ акустических характеристик поверхностной волны в клине, проведенный в рамках классического подхода, приводит к выводу о том, что исследования выявили экспериментально подтверждаемый особый тип поверхностных волн, сопровождающихся в ходе движения непрерывной перестройкой акустического поля и излучением объемных волн. Изменение амплитуды возмущений в направлении распространения в сочетании с

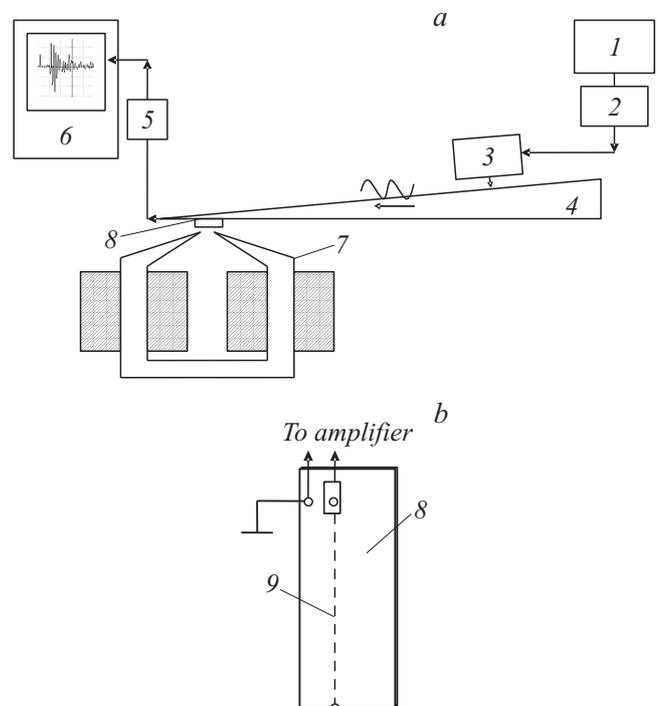


Рис. 3. а — схема лабораторной установки: 1 — генератор импульсов АНП 1001, 2 — высоковольтный усилитель, 3 — пьезодатчик, 4 — изделие, 5 — предусилитель, 6 — осциллограф GDS-2202, 7 — электромагнит, 8 — индуктор с проводником 9; б — индуктор ЭМА-приемника.

изменением скорости позволяет классифицировать эти волны как специфическую разновидность акустических волн.

Возникающие вблизи ребра стоячие неоднородные волны радикально отличаются от классических. Так, в частности, акустическая структура поля с искаженными волновыми профилями, являющегося суммой двух разнонаправленных волн, формируется из волн с малой интенсивностью.

При приближении к ребру волновой поток сжимается, замедляясь вплоть до полной остановки у ребра, однако в обратном направлении плотность потока уменьшается, что ведет к нарастанию скорости потока до рэлеевской. Все это свидетельствует о том, что наблюдается специфическое физическое явление: обратная волна в клиновидной пластине движется не за счет отражения от ребра в классическом понимании, а вследствие понижения плотности энергии волнового потока.

Список литературы

- [1] Толипов Х.Б. // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 1. С. 28–39.
- [2] Толипов Х.Б. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 9. С. 139–142.
- [3] Бучельников В.Д., Васильев А.Н. // УФН. 1992. Т. 162. С. 90–94.
- [4] Толипов Х.Б., Толипова Ю.Х. Пат. РФ. № 115492. МПК G01N 29/01.