

## УСИЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ УПРУГОЙ ВОЛНЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ ПРИ СОПРОВОЖДЕНИИ ЕЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Е.П.Велихов, Е.В.Даньщиков, В.А.Дымшаков, А.М.Дыхне,  
Ф.В.Лебедев, В.Д.Письменный, Б.П.Рысев, А.В.Рязанов*

Экспериментально обнаружен предсказанный в работе <sup>2</sup> эффект линейного, резонансного роста амплитуды поверхностной упругой волны в твердом теле, возбуждаемой при поглощении сфокусированного на поверхность лазерного излучения, сканируемого со скоростью поверхностных волн. Получены зависимости амплитуды поверхностной волны от скорости сканирования, зависимости амплитуды в резонансе и ширины резонансной кривой от длины сканирования и мощности излучения. Представленные результаты хорошо согласуются с теорией.

Впервые экспериментально обнаружено предсказываемое теорией возбуждение поверхностной упругой волны при тепловом воздействии сфокусированного на поверхность твердого

тела лазерного излучения, сканируемого со скоростью поверхностных волн. Процесс имеет резонансный по скорости характер: с линейным в резонансе ростом амплитуды во времени.

1. Использование движущегося фокуса лазерного излучения как локального источника тепла позволяет, через термоупругость, возбуждать упругие волны в жидкости<sup>1</sup>. В работе<sup>2</sup> содержится предложение возбуждать аналогичным способом поверхностные упругие волны большой амплитуды в твердых телах.

В настоящей работе приводятся теоретические оценки и сообщается об обнаружении и первых результатах экспериментального исследования этого эффекта.

Пусть вдоль поверхности твердого, непрозрачного для света тела сканируется фокальное пятно лазерного излучения (в виде полоски, вытянутой поперек направления движения) со скоростью близкой к скорости распространения поверхностных упругих волн  $U$ . Энергия света поглощается в тонком слое вещества, что приводит к локальному разогреву приповерхностной области под пятном. Здесь возникает термоупругая деформация и деформированная область движется вдоль поверхности со скоростью  $U$ . Если источник сопровождает волну, то на эту перемещающуюся деформацию накладывается в фазе термоупругая деформация, вызываемая источником в данный момент времени. В результате происходит линейное, резонансное нарастание деформации со временем.

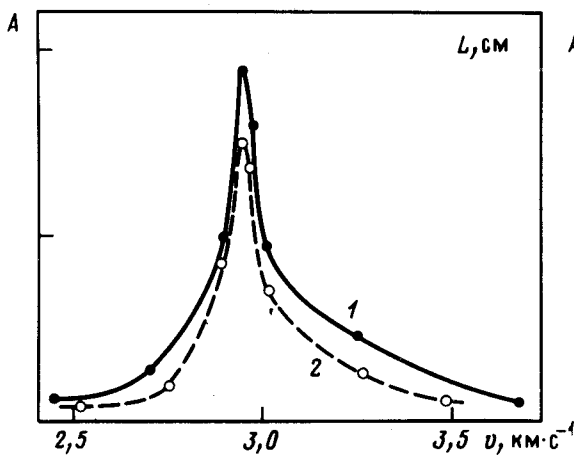


Рис. 1

Рис.1. Зависимость амплитуды волны (в относительных единицах) в конце трассы сканирования от скорости движения фокуса

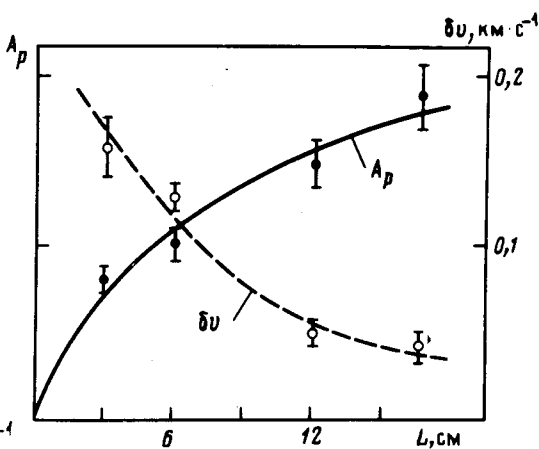


Рис. 2

Рис.2. Зависимость  $A_p$  — амплитуды волны в резонансе (относительные единицы) и  $\delta v$  — полуширины резонанса от длины трассы сканирования

Интересно отметить, что, хотя природа деформации тепловая, нагрев вещества может быть сделан незначительным и деформация может во много раз превышать величину  $\alpha T$  ( $\alpha$  — коэффициент теплового расширения). Это связано с тем, что большую деформацию можно накопить с расстоянием при относительно малом локальном разогреве.

Задача о возбуждении поверхностной волны предлагаемым способом состоит в решении уравнения движения упругой среды, в котором учтена термоупругость, совместно с уравнением теплопроводности, содержащим движущийся источник<sup>2</sup>. При точном резонансе скоростей источника и волны получено следующее выражение для относительного изменения объема при деформации среды в волне на самой поверхности

$$b \frac{\alpha l}{\rho c a} t$$

здесь  $I$  — поглощенная интенсивность излучения,  $a$  — ширина фокальной полоски,  $\rho$  — плотность,  $C$  — удельная теплоемкость среды,  $t$  — время,  $b$  — константа, значение которой определяется упругими свойствами среды.

2. В экспериментах использовался  $\text{CO}_2$ -лазер с постоянной в течение импульса генерации мощностью до 10 кВт<sup>3</sup>. Излучение лазера фокусировалось в полоску длиной  $l = 10$  мм и шириной  $a = 1$  мм, которая с помощью вращающегося зеркала перемещалась по поверхности массивного ( $5 \times 10 \times 30$  см<sup>3</sup>) образца из дуралюминия. Скорость сканирования менялась при изменении угловой скорости вращения зеркала. Абсолютная ошибка измерений скорости не превышала 1 %, а относительная — 0,3 %. Длина сканирования  $L$  менялась подвижными экранами. Мощность излучения  $W$  уменьшалась с помощью ослабителей. Регистрация поверхностной волны производилась датчиком ЦДС-16, наклеенным на уголкового преобразователя<sup>4</sup>, который был расположен в конце трассы сканирования. Такие же датчики помещались на смежных и противоположной гранях образца с целью регистрации фоновых волн.

3. Результаты экспериментов приведены на рис.1 и рис.2. Амплитуда волны, измеренная в конце отрезка сканирования  $L$  ( $3 \div 17$  см), резонансно зависела от скорости сканирования. Величина резонансной скорости составляла  $v_p = (2,94 \pm 0,03) \cdot 10^3$  м/с, что хорошо согласуется со значениями скорости поверхностных упругих волн для дуралюминия<sup>4</sup>:  $U = (2,86 \div 2,93) \cdot 10^3$  м/с. Зависимость амплитуды волны в резонансе от длины трассы  $L$  представлена на рис.2. (сплошная линия).

Приведенные факты: 1)  $v_p$  заведомо меньше скоростей объемных волн — поперечной  $c_t = 3,1 \cdot 10^3$  м/с и продольной  $c_l > \sqrt{2} c_t$ ; 2) растущая зависимость амплитуды от  $L$  с резонансом именно при скорости  $v_p = U$ , а также то, что 3) датчики фона не зарегистрировали значительного регулярного сигнала, позволяют утверждать, что в экспериментах наблюдалось возбуждение поверхностной упругой волны.

Отклонение зависимости  $A_p(L)$  от линейной связано, по всей видимости, с дифракционным расплыванием рассматриваемой квазиплоской волны апертуры  $l$ , чему соответствует, качественно, функция  $\sim L[1 + L^2(2a/l^2)^2]^{-1/2}$ .

Существование ширины у резонанса (рис.1) является следствием конечности продольных размеров источника  $a$  и деформированной области ( $\sim a$ ). Из-за этого и при наличии расстройки скоростей  $\Delta v$  должен происходить рост амплитуды, но лишь до тех пор, пока волна и источник не разойдутся на расстояние порядка  $a$ . Таким образом, режим усиления гарантируется условием  $\Delta v/U \sim a/L$ . Согласно этому, по рис.1 и по зависимости ширины резонанса  $\Delta v$  от  $L$ , рис.2, был оценен размер деформированной области:  $1 \div 3$  мм, т.е. он, как и должно быть, порядка  $a$ .

Была также исследована зависимость амплитуды волны в резонансе от мощности излучения  $W$ . При  $W = 0,5 \div 7,0$  кВт амплитуда линейно возрастала с ростом мощности, что свидетельствует об упругом характере возникающих деформаций. По данным о чувствительности датчика ЦДС-16 была оценена величина максимального смещения поверхности:  $\approx 0,1$  мкм. Такой же порядок величины смещения получается и по формуле из работы<sup>2</sup>. Нагрев поверхности, по оценкам, составлял  $\approx 3$  К.

Как показывают расчеты<sup>2</sup> увеличение  $I$  примерно на два порядка и оптимизация остальных параметров позволит приблизиться к области нелинейных деформаций. Возбуждение таких волн дало бы возможность подвергнуть существенной деформации приповерхностный слой твердого тела, не затрагивая при этом толщи образца. Подобный способ возбуждения может служить целям механической обработки поверхности (отметим, что он бесконтактный), обнаружения поверхностных дефектов, а также позволит исследовать нелинейные поверхностные волны.

#### Литература

2. Дыхне А.М., Рысев Б.П. О возможности возбуждения упругих поверхностных волн большой амплитуды в твердом теле при тепловом воздействии лазерного излучения. Поверхность, физика, химия, механика, 1983, № 6, 33.
3. Бондаренко А.В., Даньщиков Е.В., Лебедев Ф.В., Рязанов А.В., Смакотин М.М. Электроразрядный CO<sub>2</sub>-лазер с прямоугольным импульсом генерации. Квантовая электроника, 1981, 8, 204.
4. Уайт Р.М. Поверхностные упругие волны. ТИИЭР, 1970, 58, 68,

Поступила в редакцию  
14 октября 1983 г.

---