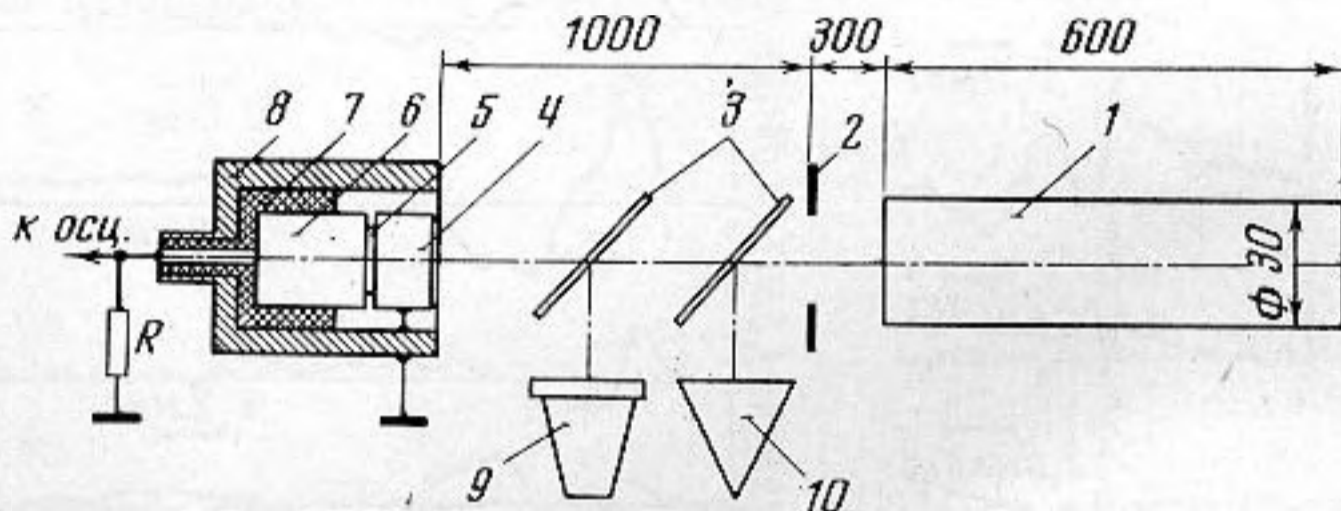


## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛН В СТЕРЖНЯХ ПРИ КОРОТКОМ УДАРЕ

А. Г. Иванов, В. И. Лучинин, В. Н. Минеев, Н. П. Хохлов

Для исследования упругостных параметров твердых материалов удобным является использование образцов в виде цилиндрических стержней. При этом часто используется возбуждение одного из торцов образца коротким ударом. Большинство исследований такого рода проведено (см. обзор [1]) на стержнях при  $l/d \geq 20$ , где  $l$  — длина и  $d$  — диаметр стержней. Замечательным фактом явилось обнаружение в работе [2] явления возникновения высокочастотных продольных волн, распространяющихся со скоростью продольной волны в неограниченной среде. Эти высокочастотные волны предшествуют основной, обычной продольной волне, характерной для стержней.

В дальнейшем этот эффект был положен в основу метода измерения упругостных постоянных материала при возбуждении его импульсным световым излучением [3]. К сожалению, в работах [1–3] отсутствуют прямые измерения длительности и амплитуды волны напряжения при  $l \rightarrow 0$ , которые необходимы для использования представлений, развитых в работах [1–3].



Фиг. 1. Схема постановки эксперимента: 1 — активный элемент ОКГ, 2 — диафрагма, 3 — отводящие пластины, 4 — исследуемый стержень, 5 — пьезокварц, 6 — опорный стержень, 7 — изолятор, 8 — экран, 9 — фотоэлемент, 10 — калориметр

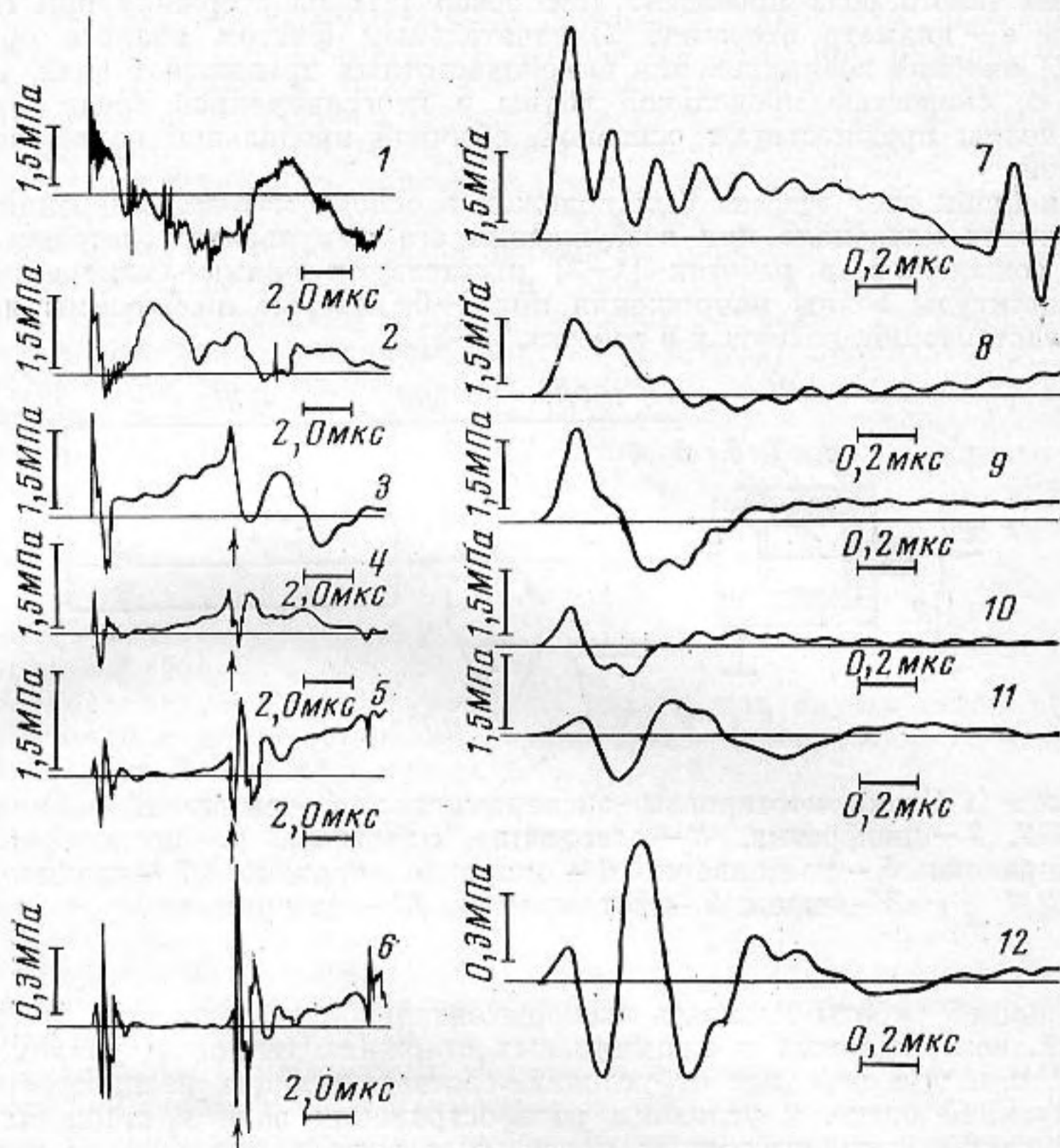
Целью нашей работы являлось экспериментальное исследование динамики волн напряжений, возбуждаемых в алюминиевых стержнях тепловым ударом, при  $l/d = 0,25 \dots 15$ , т. е. при переходе от условий, соответствующих распространению волн в неограниченной среде, к условиям распространения волн в стержнях, изучение тонкой структуры высокочастотных продольных волн и определение значения  $l/d$ , при которых они образуются, и выявление упругостных постоянных исследуемого материала.

Схема эксперимента приведена на фиг. 1. Опыты проводились в воздухе при нормальных условиях. Для создания теплового удара использовалось моноимпульсное излучение стандартного оптического квантового генератора ГОС-300 с длиной волны излучения 1,06 мкм, плотностью энергии излучения  $Q = 1,6$  Дж/см<sup>2</sup> и длительностью колоколообразного импульса излучения на полувысоте  $\sim 0,15$  мкс.

С помощью фотоэлементов и калориметра регистрировалась форма и измерялась интегральная энергия падающего излучения. Синхронизованная регистрация в одном опыте параметров волны напряжения и формы падающего излучения во времени позволяла вычислить по результатам опыта скорость волны деформации в стержне.

Исследуемые стержни диаметром 20 мм и длиной 5, 25, 50, 100, 200, 300 мм были изготовлены из отожженного алюминиевого сплава Д16. Регистрация волн напряжения осуществлялась кварцевым датчиком. Датчики диаметром 10 или 20 мм и толщиной 0,5 мм приклеивались к стержням слоем токопроводящего клея толщиной  $\sim 10$  мкм. Такая толщина датчика позволяла регистрировать импульсы давления с частотой не выше 10 Мгц. В качестве регистратора использовался осциллограф ОК-33 с временем установления электрического сигнала  $\sim 0,02$  мкс и входным сопротивлением  $R = 1$  Мом. Опорой пьезокварцевой пластины являлся стержень диаметром 20 мм, выполненный также из отожженного алюминиевого сплава Д16, его длина во всех опытах составляла 50 мм. Это позволяло регистрировать волновые процессы в исследуемых стержнях в интервале времени  $\sim 15$  мкс. Для уменьшения влияния электрических наводок система стержень — кварц — опорный стержень помещалась в коаксиальный экран. Осциллограф соединялся с пьезокварцем коаксиальным кабелем длиной не более 1,5 м. Сжатие датчика соответствовало положительное отклонение луча осциллографа.

Для оценки радиального распределения напряжения в стержне были проведены эксперименты с кварцевыми датчиками диаметром 10 и 20 мм. В опытах с датчиками диаметром 10 мм исследовалось также влияние способа крепления кварца к стержням. В одном случае боковая поверхность кварца оставалась свободной, в другом — зазор заполнялся эпоксидной смолой. Для стержней с  $l=5, 50, 200$  мм способ крепления кварца диаметром 10 мм не влияет на результаты измерений. При  $l=50$  и  $200$  мм записи с кварцевых датчиков диаметром 10 и 20 мм при прочих равных условиях были идентичны, за исключением того, что записи зависимости напряжения  $p(t)$  с кварцем диаметром 20 мм содержат колебания большей амплитуды на высоких частотах вплоть до  $10$  МГц.



Фиг. 2. Профили волн напряжения в стержнях: 1, 7 —  $l/d=0,25$ ; 2, 8 —  $l/d=1,25$ ; 3, 9 —  $l/d=2,5$ ; 4, 10 —  $l/d=5$ ; 5, 11 —  $l/d=10$ ; 6, 12 —  $l/d=15$

Кроме того, при  $l=5$  мм переход к датчику большего диаметра приводит к уменьшению регистрируемой амплитуды  $p(t)$  и увеличению длительности волны сжатия примерно в 2 раза. Это свидетельствует о неравномерном по радиусу распределении напряжения в волне сжатия, что может быть обусловлено как неравномерным распределением энергии по сечению потока светового излучения, так и влиянием свободной боковой поверхности образца.

Основные результаты получены с датчиками диаметром 10 мм. Для каждой длины стержня проведено по 3–5 опытов, которые показали достаточную стабильность результатов измерений. Типичные записи  $p(t)$ , приведенные на фиг. 2 с различным временным разрешением, иллюстрируют зависимость параметров волны и тонкой структуры высокочастотных колебаний от длины стержня.

Результаты опытов показали, что скорость распространения переднего фронта зарегистрированной волны во всех случаях соответствует продольной скорости звука в неограниченной среде и составляет  $c_1=6,30\pm 0,01$  км/сек. Этот результат подтверждает выводы, сделанные в работах [1, 2]. Однако время регистрации волн напряжения в стержнях кварцевым датчиком не позволило в явном виде обнаружить основную продольную волну, характерную для стержней, как это было показано в работе [1].

Анализ записей  $p(t)$  7–12 на фиг. 2 показывает, что продольная волна сжатия длительностью  $1,4$  мкс ( $l/d=0,25$ ) по мере распространения по длине стержня вырождается в серию высокочастотных колебаний, частота которых изменяется от  $\sim 1$  МГц при  $l/d=1,25$  до  $\sim 4$  МГц при  $l/d=15$ . Кроме того, при  $l/d>2,5$  на записях  $p(t)$  характерное время расхождения этих высокочастотных колебаний (отмечено

на записях  $p(t)$  3–6 фиг. 2 стрелками) составляет  $\Delta t = 5,55 \pm 0,02$  мкс и не зависит от длины стержня. Наличие серии высокочастотных колебаний подтверждает результаты работ [2, 3]; оно связано с преобразованием продольной волны в сдвиговую и обратно при отражении от боковых границ стержня.

Полученные значения  $c_1$ ,  $\Delta t$  (указаны с доверительными интервалами, соответствующими вероятности 0,95) позволяют рассчитать скорость распространения сдвиговой волны  $c_2$ , а также упругостные постоянные исследуемого материала. Результаты наших опытов показали, что для отожженного алюминиевого сплава Д16 скорость сдвиговой волны соответствует 3,13 км/сек, модуль сдвига  $G = 26,4$  ГПа, модуль объемного сжатия  $k = 72,1$  ГПа, модуль Юнга  $E = 70,58$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,337$ . Эти значения согласуются с результатами работ [2, 3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C. M. Percival, J. A. Cheny. Thermally generated stress waves in a dispersive elastic rod. Exp. Mech., 1969, 9, 2, 49–57.
2. D. S. Hughes, W. L. Pondrom, R. L. Mims. Transmission of elastic pulses in metal rods. Phys. Rev., 1949, 75, 10, 1552–1556.
3. C. A. Calder, W. W. Wilcox. Technique for measurement of elastic constants by laser energy deposition. Res. Scient. Instrum., 1974, 45, 12, 1557–1559.

Поступила  
7 апреля 1976 г.

УДК 534.232.45

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, НАГРУЖЕННОГО НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИМПЕДАНЦ

О. Г. Павленко

Изменения магнитомеханических параметров, происходящие в колеблющемся образце ферромагнетика под действием возбуждающего магнитного поля, описываются следующей системой уравнений

$$(1) \quad B_i = \mu_{ik} H_k + 4\pi \lambda_{ikh} S_{hl},$$

$$(2) \quad T_{ij} = c_{ijkl} S_{hl} - \lambda_{kij} H_k,$$

$$(3) \quad \rho \ddot{u}_j = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i},$$

$$(4) \quad \text{rot } \mathcal{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{\text{возб}},$$

$$(5) \quad \text{div } \mathcal{B} = 0,$$

$$(6) \quad H_{t_1} = H_{t_2},$$

$$(7) \quad B_{n_1} = B_{n_2},$$

$$(8) \quad T_{ij} n_j = 0.$$

В этой системе (1) и (2) – уравнения состояния, (3) – уравнение движения, (4) и (5) – уравнения электромагнитного поля, (6–8) – граничные условия.  $\mathcal{H}$  и  $\mathcal{B}$  – напряженность и индукция магнитного поля,  $T_{ij}$  и  $S_{ij}$  – тензоры механических напряжений и деформаций,  $\lambda_{ikh} = \left( \frac{\partial M_i}{\partial S_{kl}} \right)_{\mathcal{H}_k}$  – тензор магнитострикционной посто-

янной,  $M_i$  – компоненты намагниченности,  $\mu_{ik}$  – тензор магнитных проницаемостей,  $c_{ijkl}$  – тензор постоянных упругости,  $\rho$  – плотность среды,  $\ddot{u}_j$  – компоненты ускорения,  $x_i$  – пространственные координаты, индексом  $t$  обозначена тангенциальная,  $n$  – нормальная компонента поля на границе.

Разделим параметры  $\mathcal{H}$  и  $\mathcal{B}$ , подобно тому как это делается в [1], на сумму соленоидальной ( $\mathcal{H}'$ ,  $\mathcal{B}'$ ) и потенциальной ( $\mathcal{H}''$ ,  $\mathcal{B}''$ ) компонент (первая обуслов-