

зная величину максимальной скорости частиц. Для определения  $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max}$  фоторегистрировались перемещения свободного конца ударника. Кинограмма «перемещение—время» приводится на рис. 4 (см. вклейку, стр. 240). Горизонтальные площадки соответствуют состоянию покоя свободного конца ударника. Разность уровней площадок характеризует величину перемещения свободного конца ударника. Максимальная скорость частиц определяется по скорости фоторегистрации и углу излома линии записи.

Для органического стекла получены следующие результаты (см. таблицу).

Вес заряда, в г	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9
Скорость частиц, $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max} \cdot 10^3$ см/сек.	3.19	3.65	4.40	4.50	4.58
Максимальная деформация, $\epsilon_{\max}$ , %	1.48	1.70	2.05	2.09	2.13
Цена полосы $\epsilon_0^{(1,0)}$ , $\frac{\text{см} \cdot \text{кг}/\text{см}^2}{\text{полосу}}$	120	118	117	120	118
Скорость деформации, $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \cdot 10^5$ %/сек.	1.52	1.55	1.68	2.17	2.3

Было исследовано динамическое напряженное состояние модели рамной конструкции простейшего типа при воздействии на ее ригель поперечной импульсивной нагрузки. Модель изготавливалась из листового органического стекла толщиной 10 мм (рис. 5). Импульс давления взрыва заряда азидо свинца прикладывался через ударник посередине пролета ригеля рамы. Фотографирование проводилось с частотой съемки  $\omega = 1\,350\,000$  сек.<sup>-1</sup>; поле кадра указано на рис. 5.

На рис. 6 представлены фотографии волнового напряженного состояния ригеля рамы. В начальный момент времени ригель рамы не напряжен. Импульс распространяется вдоль ударника (рис. 6; см. вклейку, стр. 241). Далее начинается воздействие ударника на ригель рамы. Возникающая при этом волна напряжения имеет цилиндрическую форму (рис. 6, *а*). Многократные отражения ее от продольных граней ригеля приводят к образованию изгибающей волны напряжения (рис. 6, *б*). В этот момент возникает область нулевых напряжений, которая распространяется от «источника» своего зарождения со скоростью изгибающей волны и образует впоследствии нейтральную линию ригеля (рис. 6, *в*). Амплитуда образовавшейся изгибающей волны при распространении вдоль ригеля довольно быстро уменьшается, причем в самой волне напряженное состояние выравнивается (рис. 6, *г, д*).

Найденное значение цены полосы материала позволило определить величину максимальных касательных напряжений в поперечном сечении ригеля  $z=0.5l$ . На рис. 7 представлено распределение напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max}$  в указанном сечении через интервалы времени  $\Delta t = 7.2 \times 10^{-6}$  сек. Величина импульса составила  $I = 0.6 \cdot 10^{-2}$  кг·сек., длительность импульса  $T = 16.8 \cdot 10^{-6}$  сек. На нижней продольной грани ригеля распределение изохром определяет величину действующего растягивающего напряжения  $\sigma_1$ , так как здесь  $\sigma_2 = 0$ . О величине контурных напряжений на верхней продольной грани ригеля можно судить после окончания действия импульса. Максимальные напряжения в ригеле рамы возникали в данном сечении в первые моменты времени после приложения нагрузки. Хотя величина этих напряжений превосходит статический предел прочности материала модели, ввиду кратковременности их действия, пластических деформаций и нарушений целостности ригеля не наблюдалось.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Фрохт. Фотоупругость. Гостехиздат, 1948.
2. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. ИЛ, 1955.
3. Л. К. Малышев. Строительная механика и расчет сооружений, 2, 1961.

А. П. ФЕДОРОВ

### ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОКАМЕРЫ СФР ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Высокоскоростная киносъемка в поляризованном свете находит широкое применение для исследования распространения волн напряжений методом сквозного просвечивания прозрачных моделей из оптически активного материала [1—6].

Дальнейшим развитием динамической фотоупругости является разработка методов и средств, позволяющих исследовать динамические процессы непосредственно на непрозрачных (например, металле) или оптически мало активных твердых телах. При этом на поверхность исследуемого тела наносится оптически активное покрытие и с помощью высокоскоростной киносъемки в отраженном или проходящем свете производится регистрация возникающих в покрытии оптических явлений, характеризующих деформации поверхности тела.

Метод покрытий в значительной степени дополняет и расширяет метод сквозного просвечивания. С помощью метода покрытий могут быть получены данные для решения вопросов теории подобия динамических явлений с целью пересчета результатов испытания прозрачных моделей на натурные металлические конструкции. Наконец, областью применения, в которой может быть использован только метод покрытий, является решение упруго-пластических динамических задач и вопросов разрушения непрозрачных твердых тел.

Ниже приводится описание аппаратуры, метода и результатов применения высокоскоростной киносъемки для исследования методом покрытий распространения волн напряжений в алюминиевых стержнях и моделях.

#### Аппаратура

Опыты проводились на оптической установке, собранной по V-образной схеме, показанной на рис. 1.

В схеме использованы все основные узлы установки, описанной в работах [3], [4], где приведены результаты исследования распространения волн напряжений в плексигласовых стержнях и пластинах.

В качестве источника света служила импульсная лампа ИФК-80 000, на которую в момент вспышки разряжалась батарея масляных конденсаторов общей емкостью 50 мкф при напряжении до 20 кв. Фотографическая регистрация осуществлялась сверхскоростным фоторегистратором СФР конструкции ИХФ АН СССР [7]. При использовании СФР в качестве лупы времени съемка производилась с применением четырехрядной



вставки при  $\sim 400000$  оборотах зеркала в минуту (1 350 000 кадров/сек.). Эта же скорость развертки — 2050 м/сек. применялась для целевой фоторегистрации процессов в отдельных сечениях стержней и моделей при щели шириной 0.5 мм. Фотографирование производилось на пленку типа ДК чувствительностью около 300 ед. ГОСТа.

Вследствие кратковременности наблюдаемых явлений в установке предусмотрена строгая синхронизация момента вспышки лампы, инициирования исследуемого процесса и начала фоторегистрации. Одновременно

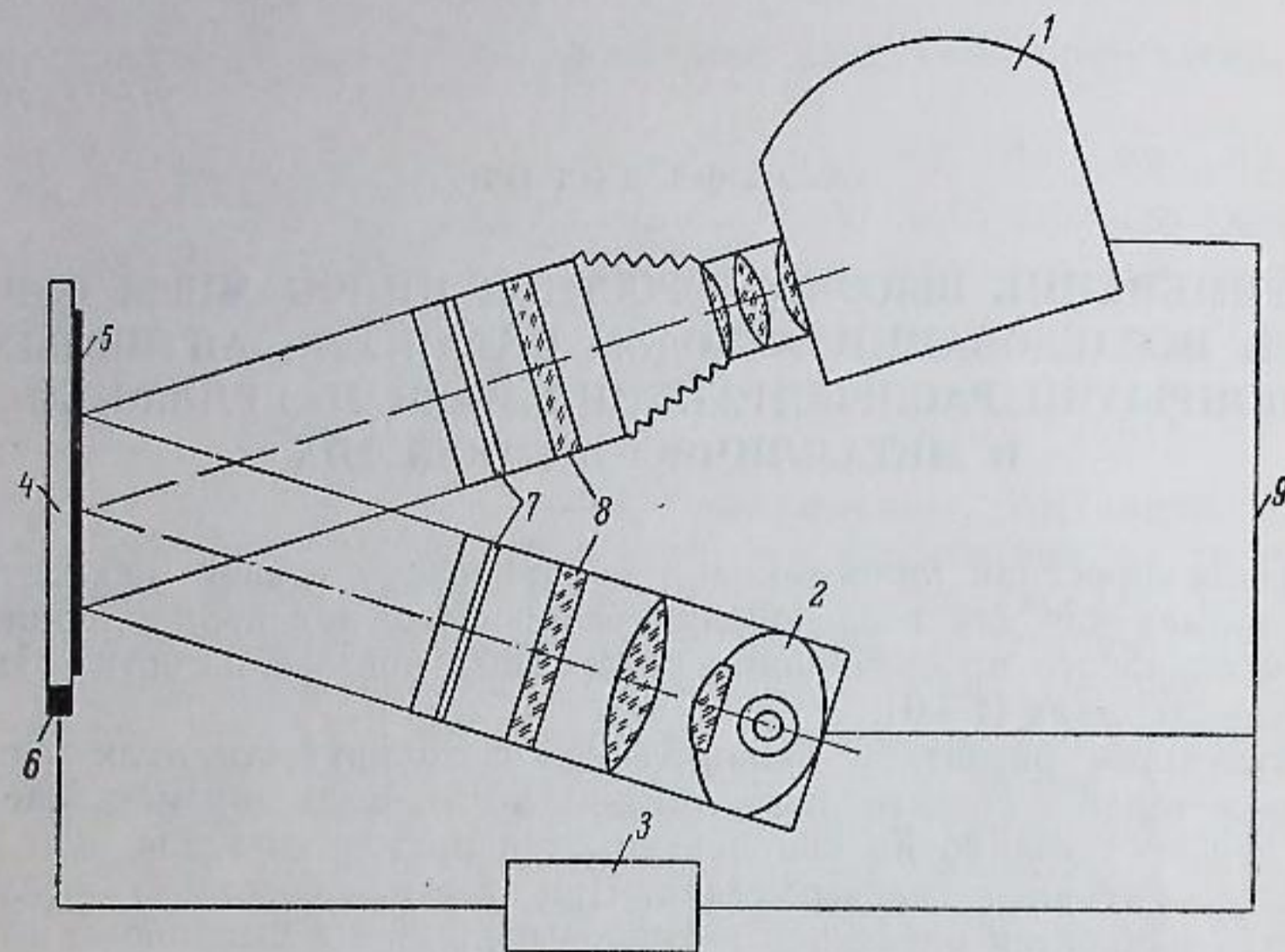


Рис. 1. Принципиальная схема отражательной фоторегистрирующей установки.

1 — кинокамера СФР; 2 — осветитель с импульсной лампой; 3 — реле задержки; 4 — исследуемая металлическая модель; 5 — оптически активное покрытие; 6 — заряд; 7 — пластинка  $\lambda/4$ ; 8 — поляриды; 9 — электрическая цепь синхронизации.

менно с открытием затвора кинокамеры с пульта СФР подается электрический сигнал на поджиг лампы и через реле задержки на инициирование процесса.

Для создания плоской поляризации на пути падающего и отраженного лучей света установлены поляриды — поляризатор и анализатор в скрещенном состоянии. При испытании моделей со сложным напряженным состоянием выставлялись также пластинки  $\lambda/4$  для создания круговой поляризации света.

Для монохроматизации светового потока использовались светофильтры ПС-7 и ОС-11. Угол между направлениями падения луча света и его отражением составлял примерно  $20^\circ$ .

Одновременно с оптическими исследованиями проводились измерения продольной деформации проволочными тензотрами (база 10 мм) с записью показаний на осциллографе ОК-17М. Включение тензотров производилось по потенциометрической схеме.

В качестве оптически активных покрытий использовались пластинки толщиной 1—2 мм из различных эпоксидных смол, наносимые методом приклейки при комнатной температуре. Составы использованных материалов указаны ниже при описании соответствующих экспериментов. Клеевой компаунд состоял из эпоксидных смол ЭД-5 и ДЭГ и полиэтиленполиамин в весовой пропорции 100 : 15 : 11.5.

## Исследование стержней

Было проведено свыше 30 опытов по исследованию распространения продольных волн напряжения в алюминиевых стержнях размерами  $350 \times 10 \times 10$  мм.

При использовании камеры СФР в варианте фоторегистратора исследования для возможности сопоставления проводились в тех же сечениях стержня, что и на плексигласовых балках, результаты испытания которых описаны в работах [3], [4].

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 252) приведена фотография, представляющая собой развертку во времени  $t$  оптических явлений, наблюдаемых в среднем сечении стержня при поперечном расположении щели.

Волна напряжения вызывалась детонацией у торца стержня заряда азида свинца весом 0.2 г. В качестве оптически активного покрытия использовалась пластинка толщиной 2.4 мм из эпоксидной смолы ЭДП (100 вес. ч.) с трикрезилфосфатом (5 вес. ч.), отвержденных малеиновым ангидридом (27 вес. ч.).

Полученная фотография позволяет найти форму импульса путем построения наблюдаемого порядка полос  $n$  в зависимости от времени, определить скорость распространения волны и т. д. На графике рис. 2, б показана форма лишь основной части импульса без следующей за ней группы высокочастотных волн. Для данного случая наибольшее двулучепреломление достигло 3 порядков полос, а продолжительность основного импульса составила величину около 12 мксек.

На рис. 3 (см. вклейку, стр. 252) приведена осциллографическая запись деформаций (верхняя кривая), вызываемых прохождением рассмотренного выше импульса, в сечении, удаленном на расстоянии 0.37  $l$  от нагружаемого конца. Нижняя кривая представляет собой отметку времени с частотой 40 000 гц. Максимальное значение деформации имеет величину порядка 0.135 %.

На основании данных обоих методов может быть определен динамический оптический коэффициент деформации материала покрытия по формуле

$$c_s = \frac{2d(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\lambda n},$$

где  $d$  — толщина покрытия;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — главные деформации;  $n$  — порядок полосы;  $\lambda$  — длина волны монохроматического света 546.1 мкм.

Величина  $c_s$ , подсчитанная по соответствующим максимальным амплитудам деформации и порядка полос, составляет значение  $c_s = 5.3 \pm 5\%$ . Эта величина отличается от оптического коэффициента деформации, найденного при статистических условиях нагружения и равного  $c_s = 9.6 \pm 5\%$ .

При вычислениях было принято, что динамический коэффициент Пуассона алюминия составляет  $\mu = 0.34$ , т. е. равен значению, полученному из опытов на статическое растяжение.

Наблюдение за распространением волны напряжения по стержню проводилось также при продольном расположении щели в среднем сечении стержня и на его свободном конце.

В случае продольного расположения щели в среднем сечении стержня (рис. 4; см. вклейку, стр. 252) полосы фиксируются в виде наклонных линий. Знание угла наклона полос  $\alpha$  и скорости развертки луча по пленке  $v_p$  позволяет вычислить скорость распространения полос, а, следовательно, и скорость прохождения волны по стержню

$$v_s = \frac{v_p}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Величина скорости распространения волны может быть определена



также по фотографиям картин полос при поперечном расположении щели (рис. 2) и по осциллограммам тензометрического метода (рис. 3). В этом случае скорость волны представляет собой величину, осредненную на длине стержня, в то время как при продольной щели она определяется на базе нескольких миллиметров. Скорость волны, найденная указанными выше способами, различается незначительно и в среднем составляет  $c_0 = 5300 \text{ м/сек.} \pm 2\%$ .

Динамическое значение модуля продольной упругости алюминиевых стержней, согласно приближенной теории распространения волн напряжений [6], можно вычислить по выражению

$$E = \rho c_0^2,$$

где  $c_0$  — скорость распространения волны;  $\rho$  — массовая плотность.

Тогда при  $\rho = 2.63 \text{ г/см}^3$  для динамического модуля алюминия получаем значение  $E = 750\,000 \text{ кг/см}^2 \pm 4\%$ . Найденная величина модуля продольной упругости совпадает со значением, определенным по статической диаграмме растяжения.

Максимальное напряжение, вызываемое волной, равно  $\sigma = \epsilon_{\text{max}} \cdot E = 1000 \text{ кг/см}^2$ , т. е. в стержне развиваются напряжения, превышающие статистический предел текучести материала ( $\sigma_{\text{тех}}^{\text{ст}} = 830 \text{ кг/см}^2$ ). Отсутствие остаточных деформаций в стержне, о чем можно судить по отсутствию остаточного двулучепреломления в покрытии, свидетельствует о повышении предела текучести алюминия при динамическом нагружении.

Картину полос можно использовать для непосредственного определения напряжений в металлической модели, если цену полосы протарировать в напряжениях для модели. Для картин полос, приводимых на рис. 2, 4 и 5, изменение полосы на один порядок соответствует изменению напряжений в металлическом стержне на  $333 \text{ кг/см}^2$ .

При продольном расположении щели на свободном конце образца (рис. 5; см. вклейку, стр. 256) имеет место сложная картина полос, которая позволяет наблюдать подход волны к торцу стержня и интерференцию прямой и отраженной частей волны. Промежуток времени I—II соответствует моменту появления в сечении волны сжатия, распространению ее по направлению к свободному концу и началу отражения. В момент времени II результирующее напряжение в стержне равно нулю вследствие взаимного погашения прямой и отраженной частей волны. Промежуток времени II—III соответствует формированию отраженной растягивающей волны, распространяющейся в направлении от свободного конца. После момента времени III наблюдается подход и интерференция высокочастотных волн, следующих за главным импульсом.

На рис. 6 (см. вклейку, стр. 256) приведены отдельные кадры, полученные камерой СФР в варианте лупы времени. Промежуток времени между отдельными кадрами составляет 3.06 мксек. На фотографии зафиксировано распространение продольной волны по стержню справа налево. Полученные фотографии позволяют построить форму волны, определить напряжение в стержне, найти скорость распространения волны и т. д.

#### Исследование моделей

Возможность применения метода покрытий для изучения более сложных динамических задач была проверена на примерах исследования пластины, диска и кольца из алюминия при воздействии на них импульса от инициирования сосредоточенного заряда азида свинца весом от 0.03 до 0.2 г.

Фотографии получены при отсутствии светофильтров.

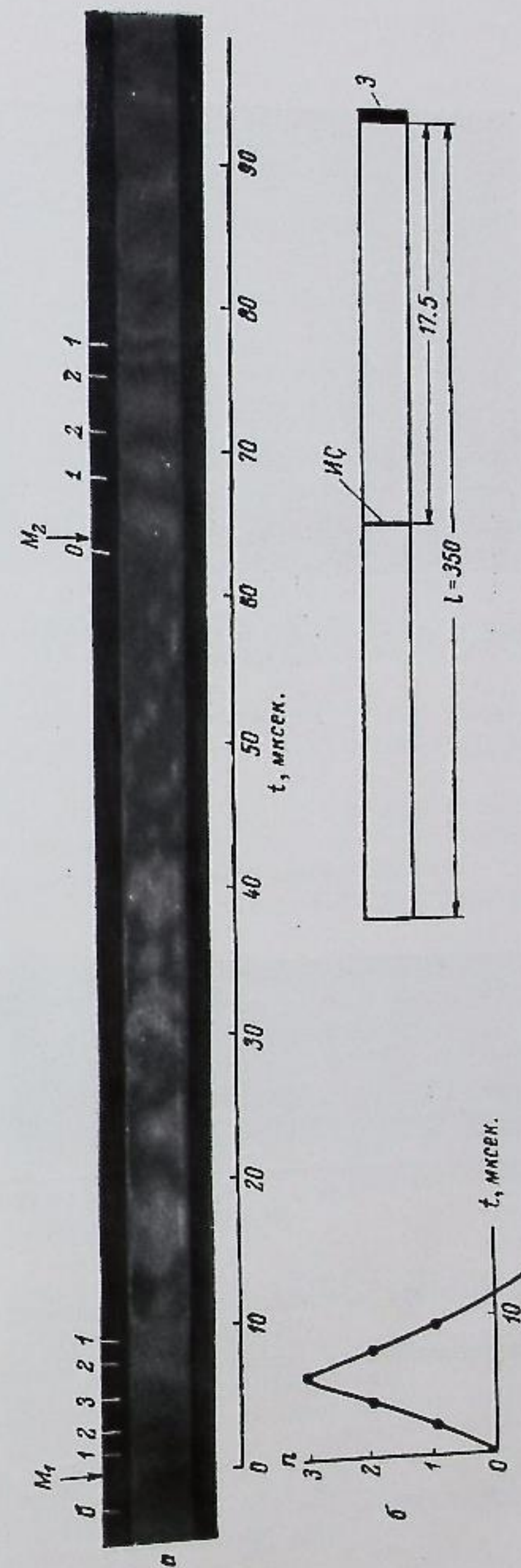


Рис. 2. Картина полос в среднем поперечном сечении стержня при работе СФР в варианте фоторегистратора.

$M_1$  — момент появления первичной волны сжатия;  $M_2$  — момент прихода отраженной волны растяжения; ИЩ — исследуемое сечение; 3 — заряд.



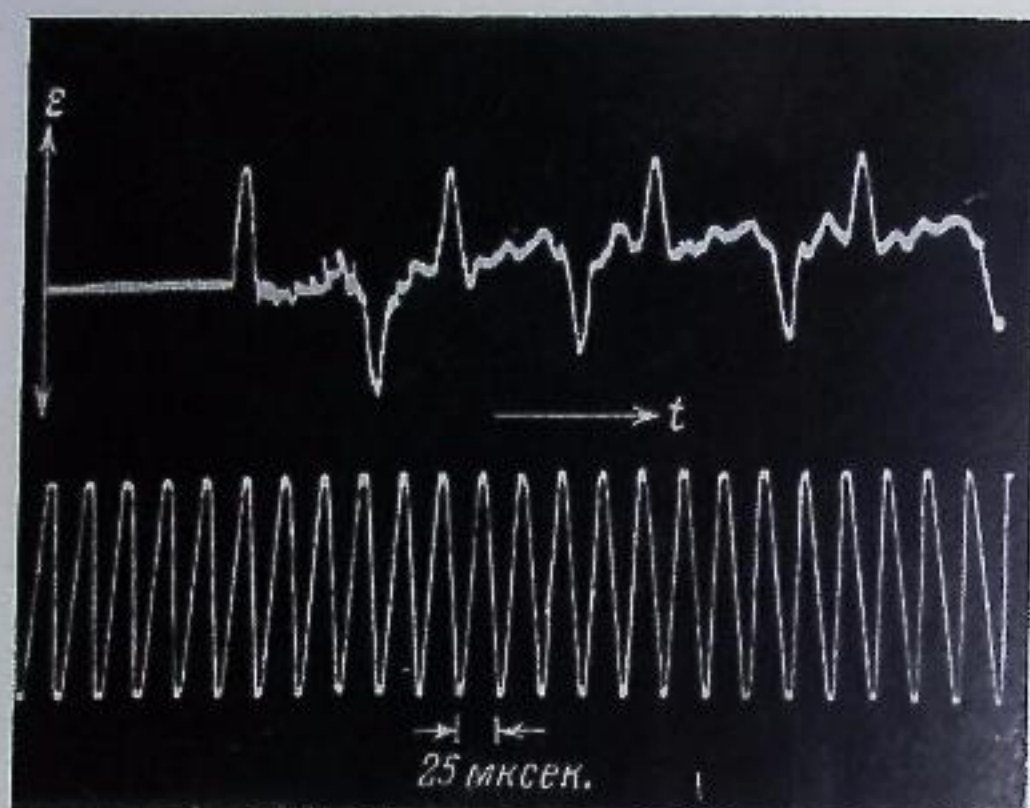


Рис. 3. Оциллограмма продольных деформаций стержня.

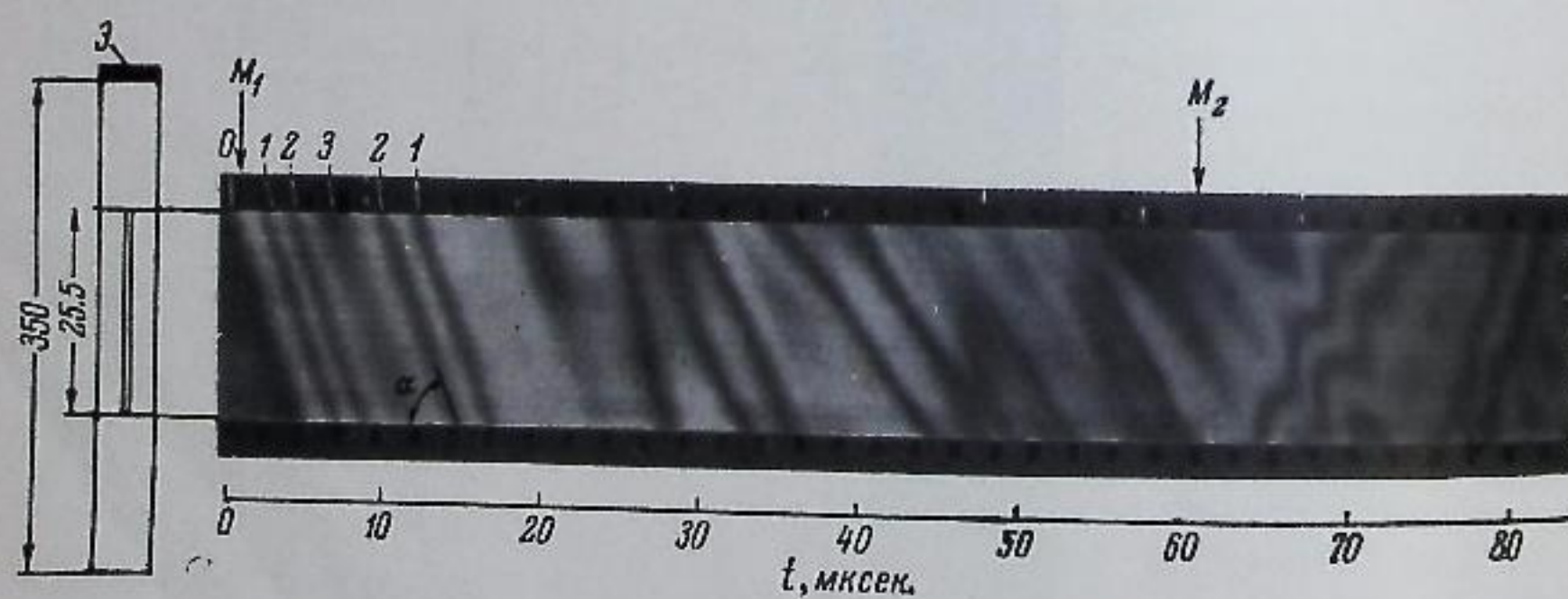


Рис. 4. Картина полос при расположении продольной щели в средней части стержня.

$M_1$  — момент появления первичной волны сжатия;  $M_2$  — момент прихода отраженной волны растяжения;  $Z$  — заряд.

Схема нагружения диска диаметром 82 мм и толщиной 5 мм, а также фотографии, показывающие процесс распространения волнового напряжения состояния, приведены на рис. 7 (см. вклейку, стр. 257).

Покрытие изготовлено из эпоксидной смолы ЭДЛ (100 вес. ч.) и магнезитового ангидрида (30 вес. ч.), его толщина равна 2.4 мм. Вес заряда составлял 0.03 г.

Картинки полос, полученные камерой СФР в варианте лупы времени (рис. 7, а), свидетельствуют о весьма сложном напряженном состоянии диска, особенно в период развития интерференционных явлений. Промежуток времени между отдельными кадрами равен примерно 0.77 мксек.

Сложная картина полос получается и при щелевой фоторегистрации диска в двух различных сечениях (рис. 7, б и в). Для надежной расшифровки картин полос необходимо иметь еще цветные фотографии.

На рис. 8 (см. вклейку, стр. 257) представлены фотографии процесса распространения волны напряжений в прямоугольной пластине размером  $100 \times 70 \times 5$  мм при подрыве заряда весом 0.03 г. Покрытие имеет такой же состав, как и для диска.

Схема возникающих в пластине волн напряжений показана на рис. 8, а, а процесс их развития и взаимодействия иллюстрируется фотографиями картин полос покадровой съемки (рис. 8, б). Момент прихода в исследуемое сечение продольной и поперечной волн отмечен соответственно индексами  $L$  и  $T$  на щелевой развертке оптических явлений (рис. 8, в).

Приведенные выше фотографии картин полос получены для нагружения, при котором напряжения в волне не вызывают остаточных деформаций в модели, за исключением, конечно, небольшого района вблизи места приложения импульса.

Как уже отмечалось, наиболее перспективной областью применения покрытий является использование их для изучения упруго-пластического поведения моделей.

В качестве примера на рис. 9, а (см. вклейку, стр. 257) приведена картина полос, полученная для кольца, которое в исследуемом сечении нагружается выше динамического предела текучести.

Покрытие имеет тот же состав, который использован при исследовании стержней.

Весьма своеобразен характер развития пластического шарнира в исследуемом нижнем сечении кольца. При инициировании заряда (0.2 г) в верхней части кольца возникают две волны напряжения, которые распространяются по кольцу навстречу друг другу. Напряжения в каждой из волн ниже предела текучести и потому не вызывают остаточных деформаций. Однако в нижнем сечении происходит сложение волн, что приводит к возникновению пластических деформаций. Картина полос, соответствующая остаточным деформациям и полученная для статического состояния модели, приведена на рис. 9, б.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Салищев, УНФ, VI, 155, 1959.
2. Н. А. Стрельчук, Ф. Ф. Губин, Г. Д. Хесин, И. Х. Костин, XIX научно-техн. конфер. МИСИ (тезисы), 1960.
3. Л. К. Малышев. Строительная механика и расчет сооружений, 2, 1961.
4. Л. К. Малышев, А. П. Федоров, Н. А. Флерова, Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 183, 1962.
5. D. N. Senior, Engr., 186, 4824, 248, 1958.
6. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. ИЛ, 1955.
7. В. Б. Ликоренко, УНФ, VI, 131, 1959.