

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МЕДНЫХ ПЛАСТИНКАХ

*В. И. Базайкин, В. Н. Перетягилько*

(*Новокузнецк*)

Изучению распространения упругопластических волн в тонких стержнях посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ. Основное внимание в них уделяется проверке и сопоставлению одномерных теорий Рахматулина — Тейлора — Кармана и Соколовского — Молверна.

В данной работе рассмотрены пластические волны в медных пластинках, когда нельзя пренебречь поперечными составляющими деформации. Экспериментально показано распространение продольной и поперечной составляющих пластических деформаций. Влияние скорости деформации не обнаружено. Построен ряд графиков, характеризующих пластический импульс.

Из известных экспериментов Белла, опытов Клиффтона и Боднера [1] и ряда других работ, а также из результатов экспериментов с волнами дрогрузки [2, 3] можно сделать вывод, что спектр скоростей распространения деформаций в пластическом импульсе слабо зависит от скорости деформации. Это объяснило хорошее совпадение опытных данных с теорией Рахматулина — Тейлора — Кармана и позволило ряду авторов модифицировать ее, введя в уравнения скорость деформаций как параметр.

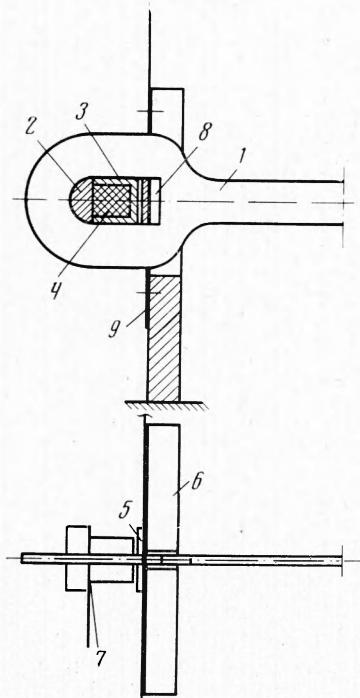
Используемое при этом допущение о равенстве нулю поперечных деформаций достаточно грубо и тем грубее, чем больше отношение диаметра стержня к его длине. Чтобы оценить влияние схемы напряженно-деформированного состояния на распространение и свойства пластических волн, авторы данной работы провели серию экспериментов по растяжению медных пластинок импульсом взрыва ВВ. Экспериментальная схема позволила регистрировать динамику главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  в плоскости пластины.

**1. Методика экспериментов.** Для регистрации деформаций была применена высокоскоростная киносъемка камерой СФР (скорость съемки  $5 \cdot 10^5$  кадр./сек) картин муаровых полос, образующихся в процессе нагружения на базовой поверхности образца. Эмульсия с нанесенным на нее растром с линеатурой 40 лин./мм приклеивалась к полированной поверхности пластины kleem на основе эпоксидной смолы. Контрольный растр вплотную прижался к базовой плоскости через тонкий слой глицерина. Расшифровка муаровых картин осуществлялась по методике [4].

Образцы из холоднокатанной меди марки М2 вырезались вдоль направления прокатки. Рабочая поверхность образцов  $75 \times 10 \text{ мм}^2$ , толщина 2.5 м.м. Модуль нормальной упругости  $E = 11\,100 \text{ кг}/\text{м}^2$ .

Схема нагружения изображена на фиг. 1. Образец 1 с прямоугольным вырезом в головке, одна сторона которого скруглена по радиусу ударника — полуцилиндра 2, нагружался взрывом заряда ВВ 4, помещенного в камеру 3. Щека 5, входящая в вырез образца, закреплялась на жестком упоре 6. Между щекой и краем выреза оставался регулируемый зазор 8. Пластина 9 предотвращала попадание продуктов взрыва в поле съемки. Заряд ВВ (0.7 г ТЭН, плотность засыпки 1.3 г/см<sup>3</sup>) детонировал от разряда батареи высоковольтных конденсаторов через проволочку 7. Достоинство схемы заключалось в возможности регулирования амплитуды, длительности и крутизны разгрузки импульса выставкой зазора 8 и изменением массы заряда. Хвостовая часть образца удерживалась в специальном захвате.

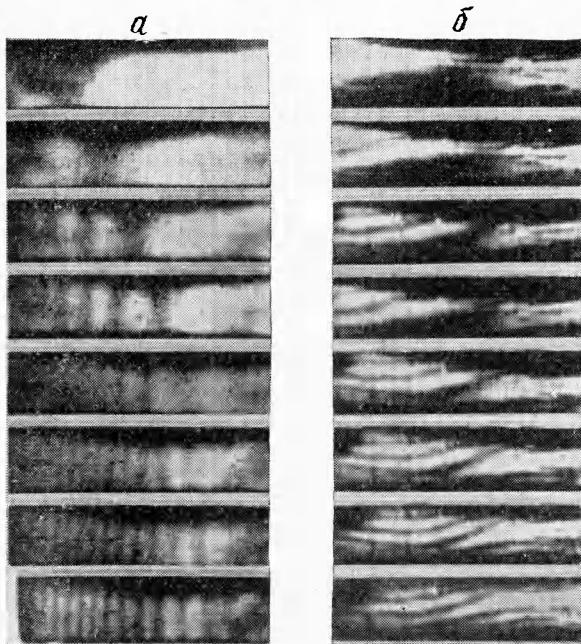
**2. Результаты, обсуждение.** Тип нагружения — одноосное плосконапряженное состояние с двумя главными деформациями — продольной  $\varepsilon_1$  и поперечной  $\varepsilon_2$ . Для



Фиг. 1

выявления  $\varepsilon_1$  был применен линейный растр с линиями поперек образца, для определения  $\varepsilon_2$  — растр с линиями вдоль образца, для совместной регистрации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  применялся ортогональный растр. К сожалению, ортогональный растр значительно ухудшал качество изображения и на кинограммах видны только составляющие  $\varepsilon_2$ . Заметим, что измеряемые методом муара деформации эйлеровы.

На фиг. 2, а и б представлены кинограммы, иллюстрирующие распространение  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Время между кадрами 12 мксек, время экспозиции 1 мксек. Для определения профиля пластических волн в нескольких сечениях по длине образца проводилось фотометрирование. Определялись зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ .



Фиг. 2

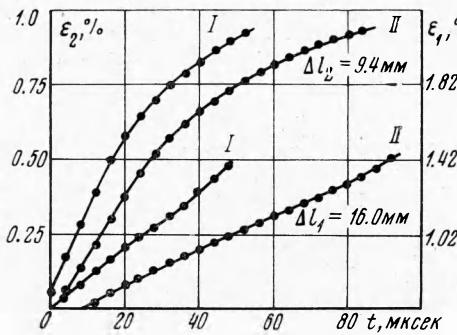
На фиг. 3 приведены профили пластических волн. По известным профилям и расстояниям между сечениями определялись скорости распространения продольных составляющих деформаций  $c_1 = c_1(\varepsilon_1)$  и поперечных составляющих  $c_2 = c_2(\varepsilon_2)$ . Оказалось, что скорости распространения деформаций не зависят от положения сечения. Так как по длине образца при удалении от начала кривые  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  становятся все более пологими, то скорость деформации убывает в том же направлении. Оценка зависимости скорости деформации от положения сечения образца показывает, что она близка к гиперболической. Можно заключить, что в пределах ошибки фотометрирования скорости  $c_1$  и  $c_2$  не зависят от скорости деформации. (Эта ошибка составляет от 7% при малых деформациях до 3% при верхних значениях.) Следует отметить, что сама форма визуализации деформаций  $\varepsilon_2$  дала возможность с применением положительного дифференциального муара регистрировать весь спектр деформаций, начиная с упругих. Профиль волны  $\varepsilon_1$  построить труднее из-за наложения отраженных от захвата и от прямой пластической волны упругих волн ударного фронта. Для достоверности профиль волны  $\varepsilon_1$  (нижние кривые на фиг. 3) дан, начиная с  $\varepsilon_1 = 0.62\%$ .

На графике кривая  $c_1 = c_1(\varepsilon_1)$  экстраполирована с  $\varepsilon_1 = 0.62\%$  до значения скорости продольной упругой волны в пластине в предположении, что отсутствуют точки перегиба на кривой (фиг. 4), исходя из вида зависимости  $c_2 = c_2(\varepsilon_2)$ .

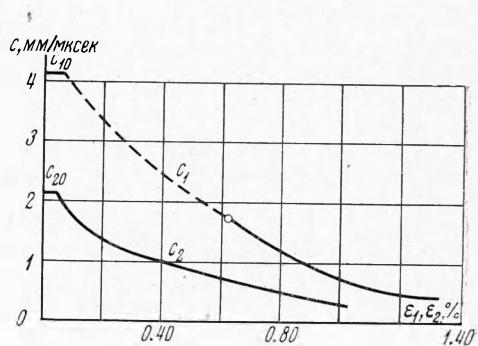
По результатам обработки наибольшая поперечная деформация, распространяющаяся со скоростью упругих волн 0.042%, продольная 0.063% (экстраполированное значение).

Необходимо обратить внимание на влияние длины образца на полученные данные. В области перехода упругих деформаций в пластические они были бы более точными при значительно большей длине рабочей части. Однако одной из целей опытов было изучение степени отражения пластической волны от захвата. На фотографиях (фиг. 5) показаны муаровые картины распределения остаточных деформаций. Фиг. 5, а

соответствует случаю полного истощения пластической волны; б — волна доходит до захвата и отражается. Отраженная пластическая волна имеет знак прямой и у захвата остаточная деформация повышается. Фиг. 5, в показывает совместное распределение  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ .

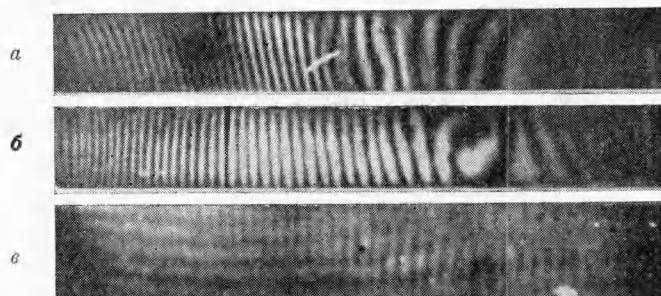


Фиг. 3



Фиг. 4

Представлял интерес, используя график  $c_1 = c_1(\varepsilon_1)$ , построить динамическую кривую  $\sigma = f(\varepsilon_1)$  подобно тому, как это делалось при исследовании стержней. Известно, что в стержнях скорость распространения данной деформации  $c = (E_t/\rho)^{1/2}$ ; где  $E_t = E$  при  $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ ,  $E_t = d\sigma/d\varepsilon$  при  $\varepsilon > \varepsilon_0$ ,  $\rho$  — плотность,  $\varepsilon_0$  — наибольшая величина деформации, распространяющаяся со скоростью упругого возмущения.



Фиг. 5

Аналогичная зависимость была принята за основу в случае пластиинки

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_t}{\rho(1-v^2)}}, \quad E_t = E \text{ при } \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{10} \\ E_t = d\sigma/d\varepsilon \text{ при } \varepsilon_1 > \varepsilon_{10}$$

Величина  $v$  здесь играет роль упрочняющего фактора, вызванного существованием значительной поперечной деформации. Считая  $v$  отношением поперечной деформации к продольной в данный момент времени и опираясь на данные экспериментов, принят  $v = 0.5$ . Текущее значение  $v$  относительно устойчиво в исследуемом диапазоне деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (0.30—2%), хотя тот факт, что  $\varepsilon_{10} = 0.063\%$ , а  $\varepsilon_{20} = 0.042\%$ , противоречит этому.

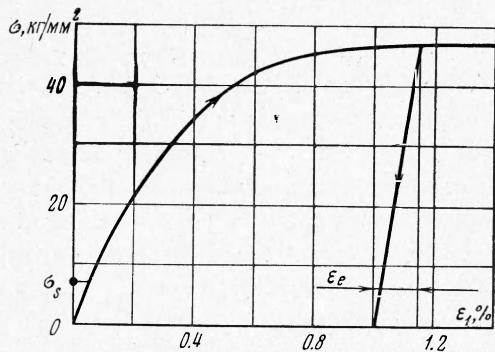
По известному  $E_t = E_t(\varepsilon_1)$  методом численного интегрирования была построена кривая  $\sigma = f(\varepsilon_1)$  (фиг. 6)

$$\sigma = \sigma_0 + \int_{\varepsilon_{10}}^{\varepsilon_1} E_t(\varepsilon_1) d\varepsilon_1, \quad \sigma_0 = \varepsilon_{10} E = 7 \text{ кг/мм}^2$$

Анализ кинограмм показывает, что упругая разгрузка в интервале продольных деформаций от 0.6 до 2% равна 0.14—0.18%, что соответствует динамическому модулю

разгрузки, в три раза превышающему  $E$  при  $\varepsilon_1 = 1\%$  и стремящемуся к  $E$  при уменьшении  $\varepsilon_1$  до  $\varepsilon_{10}$ .

В заключение необходимо отметить наличие области постоянной остаточной деформации в начале образца протяженностью  $\sim 10 \text{ мм}$  (фиг. 5). Такой сравнительно



Фиг. 6

большой размер области следует объяснить размытием заднего фронта импульса, приложенного к нулевому сечению рабочей части образца, что вызвано особенностью схемы нагружения.

Поступила 14 VI 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боднер, Клифтон. Экспериментальное исследование распространения упруго-пластического импульса в алюминиевых стержнях. Тр. Америк. о-ва инж.-механ., Сер. Е, Прикл. механ., 1967, № 3.
2. Малышев А. С. Экспериментальное исследование распространения упруго-пластических волн. ПМТФ, 1961, № 2.
3. Белл Д., Штейн А. Волна догоружения в предварительно напряженной пластической среде. Механика. Период. сб. перев. иностр. статей, 1963, № 5.
4. Шнейдерович Р. М., Левин О. А. Измерение полей пластических деформаций методом муара. М., «Машиностроение», 1972.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 2/X II-1973 г. Т-02035 Подписано к печати 25/I-1974-г. Тираж 1995 экз.  
Зак. 3231 Формат бумаги 70×108<sup>1/16</sup> Усл-печ. л. 15,4 Бум. л. 5<sup>1/2</sup>+1 вкл, Уч.-изд. л. 15,3

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10