

прочности этих материалов. Использование формулы (2) справедливо лишь в специальных случаях нагружения, различных для каждого конкретного вида уравнения состояния.

Поступила 23 VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении.— ФММ, 1966, т. 21, вып. 4.
2. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности.— ПТЭ, 1963, № 1.
3. Курант Р., Фридрихс Ч. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: ИЛ, 1950.
4. Malvern L. E. The propagation of longitudinal waves of plastic deformation in a bar exhibiting a strain rate effect.— Quarterly of Appl. Mathem., 1951, vol. 8, p. 405.

УДК 539.374

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТСКАКА КОРОТКИХ СТЕРЖНЕЙ ОТ ТВЕРДОЙ ПРЕГРАДЫ

*В. М. Бойко, А. И. Гулидов, А. Н. Папырин,
В. М. Фомин, Ю. А. Шитов*

(Новосибирск)

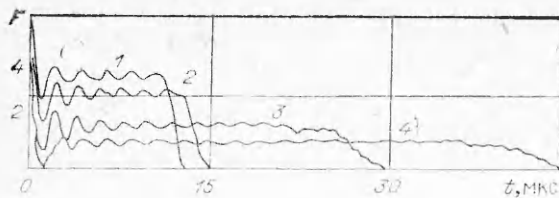
Численное моделирование явления отскока коротких однородных цилиндрических и конических стержней в двумерной постановке дано в работах [1, 2]. Данная работа является естественным их продолжением. Введенный интегральный критерий по определению момента отскока применяется не только для однородных, но и для стержней, состоящих из разнородных материалов. Результаты численного моделирования сопоставляются с данными экспериментов.

1. Физико-математическая постановка задач об ударе, определение отскока, граничные и начальные условия даны в работах [1, 2] для однородных стержней. Рассмотрим случай удара цилиндрического стержня, состоящего из разных материалов, по твердой преграде.

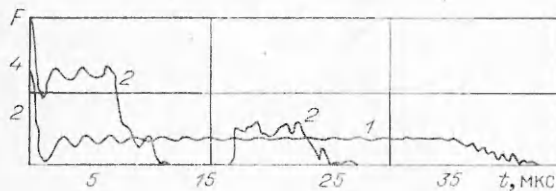
Задача 1. Цилиндрический стержень длины L_0 и радиуса R_0 состоит из двух материалов. Слои материалов расположены параллельно оси симметрии. Внутренний цилиндр имеет радиус $R_0/2$. Толщина внешней оболочки также $R_0/2$. Скорость удара $v_0 = 50$ м/с. На границе между слоями материалов выполняется условие идеального механического контакта. Математически это условие сводится к равенству смещений и напряжений на этой границе.

Решение задачи находим модифицированным методом Уилкинса [2, 3]. При численном решении задачи счет идет без явного выделения границы контакта между материалами. Расчеты проводились для слоев, состоящих из стали и меди, со значениями констант: $\rho_0 = 7,85$ г/см³, $k = 170$ ГПа, $\mu = 80$ ГПа, $y_0 = 1,2$ ГПа — сталь; $\rho_0 = 8,9$ г/см³, $k = 139$ ГПа, $\mu = 46$ ГПа, $y_0 = 0,3$ ГПа — медь, где ρ_0 — плотность материала, k — коэффициент объемного сжатия, μ — модуль сдвига, y_0 — предел текучести.

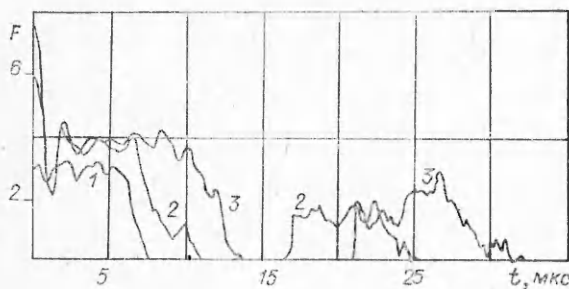
На фиг. 1 показано изменение силы F , действующей на границе стержня с преградой в зависимости от времени t для четырех случаев сочетания материалов (1, 4 — стержень сплошной соответственно из стали и из меди, 2 — внутренний цилиндр из меди, а оболочка из стали, 3 — внутренний цилиндр из стали, а внешняя оболочка из меди). Заметим, что при одной и той же начальной скорости удара и одинаковой геометрии масса стержней будет разной, а значит, различна и начальная кинетическая энергия стержней. Однако существенное значение на время контакта стержня с преградой t_k имеет лишь предел текучести материалов. Чем меньше предел текучести, тем больше время контакта стержня с преградой (случаи 1, 4). Природа этого явления состоит в том, что при ударе стержня с преградой от контактной границы распространяется волна сжатия двух-



Ф и г. 1



Ф и г. 2



Ф и г. 3

волновой конфигурации. Упругий предвестник движется со скоростью упругих волн, которые значительно превышают скорость пластической волны. Отражаясь от свободного торца стержня, упругая волна сжатия переходит в волну растяжения и распространяется в противоположном направлении. При взаимодействии этих волн происходит перераспределение напряжений, что приводит к уменьшению условия напряжений за фронтом пластической волны. В результате такого взаимодействия в сторону свободного торца стержня опять движется упругая волна сжатия с амплитудой, соответствующей пределу текучести материала. В результате нескольких актов взаимодействия волны разгрузки с пластической волной напряжения в последней уменьшаются и в конечном итоге становятся растягивающими.

В силу этого и происходит отделение стержня от преграды. Поэтому с увеличением предела текучести материала увеличивается амплитуда волны разгрузки, и снятие сжимающих напряжений в стержне происходит за меньшее число взаимодействий волны разгрузки и пластической волны.

Для составного стержня время контакта в случае 3 больше и в случае 2 меньше. При этом уровень напряжений в стержне, где медный цилиндр находится в стальной оболочке, выше. Ясно, что и общая деформация стержня здесь будет меньше.

Задача 2. Геометрические размеры стержня остаются теми же, что и в задаче 1. Скорость удара $v_0 = 50$ м/с. Материалы слоев стержня прежние, но располагаются слои так, что половина стержня длиной $L/2$ из одного материала, а вторая половина $L/2$ из другого материала. Удар осуществляется сначала медным концом, а затем стальным. На фиг. 2 показано изменение силы F в зависимости от t для этих двух вариантов расчета.

В случае 1 время контакта близко к времени контакта сплошного медного стержня и график $F(t)$ изменяется аналогично 4 (см. фиг. 1).

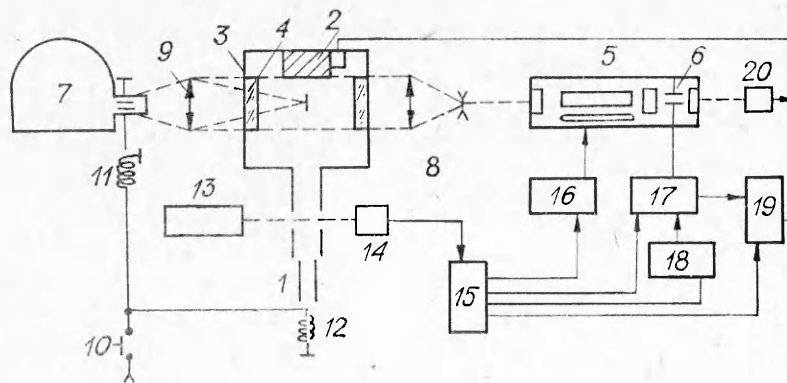
Во втором случае, когда происходит удар стальным концом после обращения силы F в нуль и отскока стержня от преграды, имеет место вторичное касание стержня преграды. Такое явление будем называть повторным отскоком. Если повысить скорость удара, то время первого отскока увеличивается, но вместе с этим увеличиваются продолжительность времени повторного касания стержнем преграды и промежуток между первым отскоком и повторным касанием. На фиг. 3 приведено изменение силы $F(t)$ для трех значений начальной скорости удара соответственно 25, 50 и 75 м/с. Интересно отметить, что промежуток времени между первым отскоком и повторным касанием зависит от отношения длин стального и медного участков стержня. Установлено, что существует такая длина медного участка, при которой повторного касания не происходит. Суммарная длина стержня при этом остается постоянной. Объяснение явления повторного отскока аналогично объяснению для сплошного стержня. При этом сле-

дует учитывать, что на границе контакта стального и медного участков стержня происходит перераспределение напряжений в волне сжатия, так как взаимодействие последней с контактной границей приводит к образованию волны разрежения, идущей в участок стержня из стали. Это вызвано тем, что медь — более мягкий материал, чем сталь.

2. Для экспериментального наблюдения процесса соударения тел с преградой разработана методика скоростной фоторегистрации, которая позволяет определять такие параметры, как скорость движения и проникания, время контакта с преградой и т. д. Очевидно, что при регистрации процессов, протекающих со скоростью $\sim 10^3$ м/с, необходимо обеспечить высокое быстродействие (время экспозиции кадров должно быть $\sim 10^{-7}$ с). Для решения этих задач наиболее перспективными являются оптические схемы многоэкспозиционной фоторегистрации на основе лазерных источников света. Использование серии управляемых лазерных импульсов в сочетании с их малой длительностью позволяет получить хорошее пространственное и временное разрешение и обеспечить жесткую синхронизацию с исследуемым явлением.

В данном случае разработан стробоскопический источник световых импульсов на основе рубинового лазера с периодической модуляцией добротности [4], который позволяет получать серию (от 1 до 100) импульсов генерации длительностью $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ с. Интервалы между импульсами регулируются дискретно через 1 мкс в пределах от 10 до 500 мкс с точностью 0,2 мкс. Электрооптический модулятор выполнен на ячейке Керра. Активным элементом генератора является кристалл рубина диаметром 8 мм и длиной 120 мм. Резонатор образован двумя зеркалами с диэлектрическими покрытиями. Зеркало с коэффициентом отражения $\sim 100\%$ вместе с электрооптическим модулятором добротности составляло четвертьволновой светозатвор-отражатель, включаемый при сбросе напряжения. В качестве поляризатора применялась призма из исландского шпата. Четвертьволновой светозатвор-отражатель выполнен в виде единой конструкции, элементы которой размещались в корпусе из фторопласта, заполненного нитробензолом. Параметры ячейки Керра: расстояние между электродами 8 мм, их длина 50 мм, четвертьволновое напряжение 15 кВ, емкость ячейки 30 пФ. Электронная схема управления ячейкой Керра состояла из: 1) генератора синхронизирующих импульсов. Для этой цели использовался серийно выпускаемый шестиканальный генератор задержанных импульсов ГЗ4-6; 2) задающего генератора, вырабатывающего серию электрических импульсов, число которых могло изменяться от 1 до 10^3 , интервалы между импульсами регулировались дискретно через 1 мкс в пределах от 2 до 10^3 мкс. В качестве задающего использовался промышленный генератор Г5-27 с точно калиброванным временным сдвигом. Наличие в приборе кварцевого резонатора обеспечивало нестабильность длительности интервалов между импульсами не хуже 0,1 мкс; 3) формирователя высоковольтных импульсов.

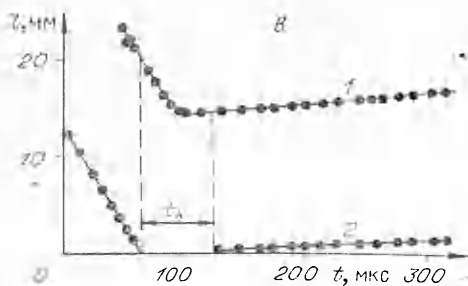
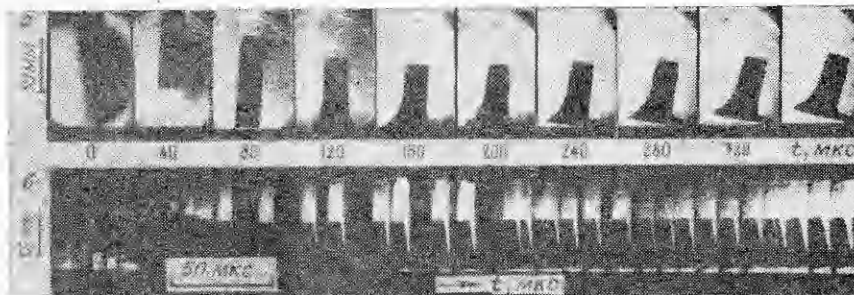
Схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования процесса соударения тел с преградой, представлена на фиг. 4. Для придания необходимой скорости стержню (цилиндр диаметром $2R_0 = 5,2$ мм и длиной $L_0 = 20$ мм) применялось разгонное устройство 1. Преграда 2 размещалась в стальной защитной камере 3 с прозрачными окнами 4. Процесс соударения стержня с преградой регистрировался с использованием высокоскоростной киносъемки. В качестве источника стробоскопической подсветки служил лазер 5 с периодической модуляцией добротности четвертьволновым электрооптическим затвором Керра 6. Изображение фиксировалось с помощью идущего фоторегистратора ЖФР-37, работающего в режиме фоторазвертки. Телескопическая система 8 расширяла световой пучок лазера до размеров окна ($d = 60$ мм), а линзой 9 (фокусное расстояние $f = 300$ мм) изображало снаряд и преграду фокусировались на пленке фоторегистратора. Установка работала следующим образом. Заряжалась батарея накачки ламп лазерного стробоскопа, и снаряд помещался в разгонное устройство. Кнопкой «пуск» 10 открывался



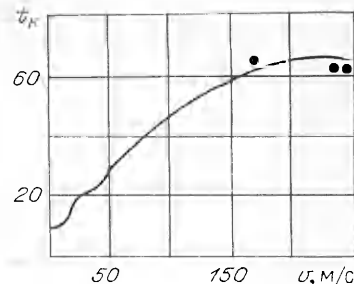
Ф и г. 4

электромеханический затвор *11* фоторегистратора, и с помощью электромагнитного спускового устройства *12* приводилось в действие разгонное устройство. Стержень на пути к преграде пересекал используемый для синхронизации луч лазера ЛГ-52-3 *13*, при этом с фотодиода ФД-2 *14* сигнал отрицательной полярности поступал на генератор синхроимпульсов ГЗИ-6 *15*. Через подобранные времена задержки синхроимпульсы с генератора ГЗИ-6 поступали на блок поджига ламп накачки ОКГ *16*, формирователь высоковольтных импульсов *17* и задающий генератор *18*. Контроль числа и формы импульсов осуществлялся с помощью запоминающего осциллографа С8-2 *19*, при этом электрические импульсы с ячейки Керра через емкостный делитель поступали на один вход осциллографа, а световые импульсы, преобразованные в электрические фотоэлементом ФЭК-14 *20*, — на другой. Кроме этого, к преграде *2* был приклеен тензодатчик, сигнал с которого также поступал на осциллограф.

Эта же установка использовалась для съемки процесса соударения в режиме щелевой развертки. Управляющее напряжение на ячейку Керра не подавалось, и ОКГ работал в режиме свободной генерации. Контроль работы лазера осуществлялся с помощью осциллографа С8-2. Одно-



Ф и г. 5



Ф и г. 6

временно с задающего генератора на осциллограф поступали метки времени.

На фиг. 5, *a* представлена кинограмма процесса соударения, снятая в кадровом режиме. Интервалы между кадрами 40 мкс, время экспозиции $3 \cdot 10^{-8}$ с. На фиг. 5, *b* приведена фотография процесса, снятая в режиме фоторазвертки при работе лазера в «пичковом» режиме. Из этих фотографий можно определить скорости подлета и отскока стержня от преграды, а также время контакта. Типичный график зависимости скорости для двух торцов медного цилиндрического стержня при соударении со стальной преградой показан на фиг. 5, *c* (1 — задний торец стержня, 2 — передний торец стержня).

Данные сопоставления численных расчетов с экспериментом приведены на фиг. 6. Сплошной линией представлена зависимость времени контакта медного стержня со стальной преградой от начальной скорости удара. Расчет удара стержня по твердой преграде проводился при следующих параметрах: длина и диаметр стержня составляли соответственно 2 и 0,55 см, плотность материала $\rho_0 = 8,9$ г/см³, модуль объемного сжатия $k = 139$ ГПа, модуль сдвига $\mu = 46$ ГПа. Принималось, что динамический предел текучести меди $y_0 = 0,3$ ГПа. В отличие от задачи удара стержня из стали [2] участок ступенчатого поведения t_* сдвинут здесь в начальную область кривой при скоростях удара до 20 м/с. Это объясняется тем, что при увеличении скорости удара амплитуда напряжений в пластической волне повышается у меди быстрее, чем у стали. Результаты экспериментов по определению времени контакта при соударении медных стержней с закаленной стальной преградой приведены на фиг. 6 (точки).

Удовлетворительное совпадение расчета и эксперимента свидетельствует о том, что математическая модель упругопластического поведения среды правильно описывает явление отскока стержня от преграды.

Поступила 27 1 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулидов А. И., Фомин В. М. Анализ распространения упругопластических волн в коротких стержнях. — В кн.: Материалы симп. «Нелинейные волны деформаций». Ч. II. Таллин, 1978.
2. Гулидов А. И., Фомин В. М. Численное моделирование отскока осесимметрических стержней от твердой преграды. — ПМТФ, 1980, № 3.
3. Уилкинс М. Расчет упругопластических течений. — В сб.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
4. Бойко В. М., Папырин А. Н. Быстродействующие методы лазерной диагностики гетерогенных потоков. — В сб.: Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло- и массообмена. Ч. 2. Минск, ИТМО АН БССР, 1981, с. 3—20.

УДК 539.374 : 534.1

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ОДНОМЕРНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ГРУНТАХ

Н. Мамадалиев, А. И. Юсупов

(Москва, Карши)

В работе рассматривается распределение плоской и сферической волн в упругопластической среде, исходя из деформационной теории [1]. Напряженно-деформированное состояние среды определяется перемещением $u(r, t)$, деформациями $\epsilon_{rr} = \partial u / \partial r$, $\epsilon_{\varphi\varphi} = \epsilon_{\theta\theta} = u/r$ ($\epsilon_{\varphi\varphi} = \epsilon_{\theta\theta} = 0$ в плоском случае) и напряжениями σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\theta\theta}$. Показано, что в зависимости от видов определяющих функций $\sigma(\epsilon)$, $\sigma_i(\epsilon_i)$ теории [1] в среде (грунте) может возникнуть либо ударная волна, либо непрерывные волны нагрузки — разгрузки. Вышеуказанные волны в грунтах исследованы в случае $\sigma = (\alpha_1 + \alpha_2|\epsilon|)\epsilon$, $\sigma_i = (\beta_1 - \beta_2\epsilon_i)\epsilon_i$, где α_i , β_i ($i = 1, 2$) — постоянные положительные коэффициенты. Решения задач построены обратным способом [2, 3] при заданной форме поверхности волны в виде полинома второй степени относительно времени t (для ударной волны) или координаты r (для волны разгрузки). При