

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивлев Д. Д. К теории разрушения твердых тел. — ПММ, 1959, т. 23, вып. 3.
2. Шапиро Г. С. Уругоупластическое равновесие клина и разрывные решения в теории пластичности. — ПММ, 1952, т. 16, вып. 2.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости/Под ред. Г. С. Шапиро. 2-е изд. М.: Наука, 1979.
4. Артемьев И. Т., Ивлев Д. Д. К теории предельного состояния хрупких тел с разрывными решениями. — МТТ, 1984, № 1.

Поступила 21/IX 1984 г.

УДК 539.4+620.1

ПОВЕДЕНИЕ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ

А. Н. БОГОМОЛОВ, В. А. ГОРЕЛЬСКИЙ, С. А. ЗЕЛЕПУГИН,
И. Е. ХОРЕВ

(Томск)

Изучение динамического взаимодействия деформируемых тел с жесткими стенками началось основополагающей работой Тейлора [1], в которой установлена связь динамического предела текучести с остаточной длиной рассматриваемого тела вращения в виде цилиндра.

В данной работе экспериментально и теоретически исследованы деформирование и разрушение цилиндров при взаимодействии их с жесткими стенками в широком диапазоне начальных условий.

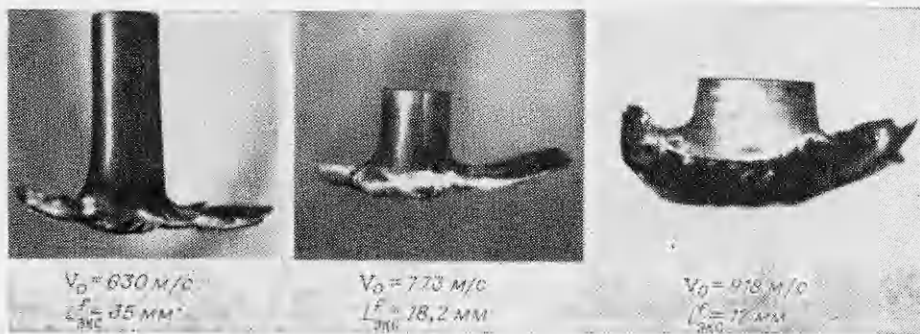
1. Металле цилиндры в экспериментах осуществлялось с помощью гладкоствольной пороховой баллистической установки. Образцы деформированных цилиндров из стали ШХ-15 в состоянии поставки, провзаимодействовавших с жесткой стенкой, приведены на рис. 1.

Полученные экспериментальные данные остаточных длин образцов и построенные на их основе характерные зависимости представлены на рис. 2, где точки 1 — медь, 2 — сталь 3, 3 — сталь 40, 4 — сталь ШХ-15. С целью оценки влияния податливости жесткой стенки (высокопрочной массивной плиты из закаленной стали НРС ~ 54—57) на конечные результаты проведены эксперименты по соосному удару двух идентичных цилиндров. Случай соосного удара реализует условия взаимодействия деформируемого тела с идеальной недеформируемой стенкой, и на рис. 2 ему соответствуют точки 5 и 6 (для меди и стали 3). Данные экспериментов по жесткой стенке и соосное соударение дают очень близкие результаты (в пределах 3—5%) для рассмотренных скоростей удара. Но случай удара о жесткую стенку в силу его простой реализации в экспериментах более предпочтителен для исследования пластичных материалов, включая различные стали. На рис. 2 для сравнения даны результаты экспериментов по жесткой стенке для меди и стали 1090 (точки 7 и 8), описанные в [2].

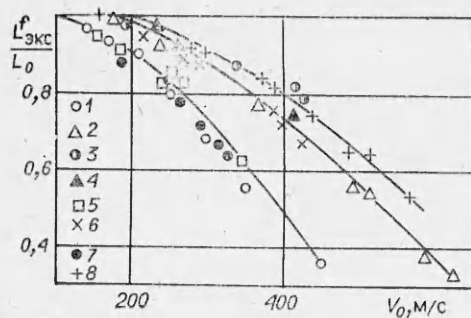
Рассчитанные по полученным экспериментальным данным значения динамического предела текучести для различных материалов представлены на рис. 3. Для расчетов использовано приведенное в [2] эмпирическое соотношение

$$L_{\text{экс}}^f / L_0 = 0,88 \exp(-\rho_0 V_0^2 / 2\sigma_s^D) + 0,12,$$

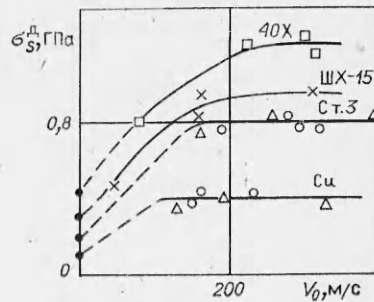
где L_0 — начальная длина цилиндра; ρ_0 — его плотность; V_0 — скорость удара; $L_{\text{экс}}^f$ — известная из эксперимента остаточная длина цилиндра; σ_s^D — искомый динамический предел текучести. Полученные зависимости динамических пределов текучести от ско-



Р и с. 1



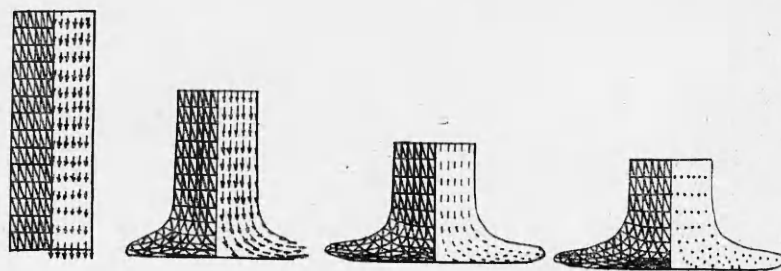
Р и с. 2



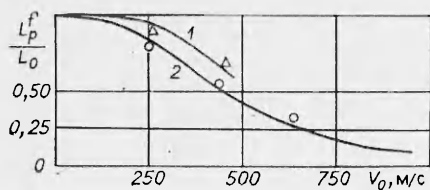
Р и с. 3

рости встречи продолжены штрихами до экспериментальных значений статических пределов текучести на оси ординат. Из рис. 3 следует, что при скоростях встречи, больших 200 м/с, динамический предел текучести, определенный согласно изложенной процедуре, — константа материала. При скоростях, больших 500 м/с, начинает проявляться тенденция уменьшения значения динамического предела текучести, что связано с возрастанием влияния температурных эффектов при высоких скоростях удара, но влияние изменения прочностных свойств при высоких скоростях удара незначительно. Стадия процесса, характеризующаяся наибольшим изменением динамического предела текучести и отвечающая скоростям встречи до 200 м/с (см. рис. 3), слабо влияет на результирующие параметры взаимодействующих тел, что с учетом вышесказанного и позволяет использовать в расчетах постоянное значение динамического предела текучести в широком диапазоне скоростей удара.

2. В проведенных исследованиях численное моделирование взаимодействия тел вращения с жесткой стенкой осуществлялось методом конечных элементов [3—5]. В качестве модели материала использована сжимаемая прочная среда, поведение которой при ударных нагрузках характеризуется модулем сдвига, динамическим пределом текучести, вязкостью [5, 6]. Последовательные хронограммы процесса деформации ударника, имеющего начальную скорость 500 м/с, полученные в результате расчета с графоинтерпретацией через каждые 10 мкс, представлены на рис. 4. Диаметр ударника 12,5 мм, высота 37,5 мм. При моделировании поведения отожженной стали ШХ-15 величина расчетного динамического предела текучести составила 0,8 ГПа. Результаты этого и аналогичных расчетов нанесены на рис. 5 (о — сталь ШХ-15, Δ — сталь 1090). Видно, что значения расчетных остаточных длин цилиндров из двух различных материалов с динамическими пределами текучести 0,8 и 1,2 ГПа ложатся на соответствующие экспериментальные кривые 2 и 1 с точностью до 5%. Данные расчетов говорят о следующем. При скоростях удара ниже 300 м/с расчетные значения лежат ниже экспериментальной кривой, а при высоких скоростях остаточная относительная длина образцов превышает экспериментальную величину. Расчеты показали также, что наибольшая зависимость для рассматриваемых материалов остаточной длины от динамического предела текучести наблюдается в диапазоне от 200 до 500 м/с. В приведенных расчетах использована модель материала с ограничением снизу области допустимых отрицательных давлений значением, равным по абсолютной величине одной трети динамического предела текучести. Недостатки данной модели материала — невозможность определения степени развития повреждений при неполном разрушении и, следовательно, неучет непрерывного изменения механических свойств материалов в процессе взаимодействия. Поэтому интересны результаты описания поведения ударников с применением кинетической модели развития разрушений [7, 8], в которой в качестве непрерывной меры разрушения используется удельный объем трещин v_T (объем трещин в 1 г материала). При этом общий удельный объем среды представляется как сумма объема трещин и объема сплошного материала v_c , величина действующего давления в элементе определяется по значению v_c . Скорость разрушения — скорость



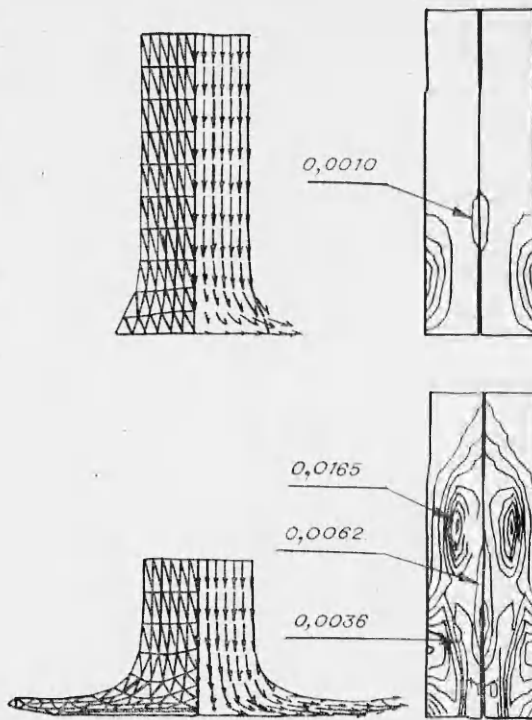
Р и с. 4



Р и с. 5

Р и с. 6

изменения удельного объема трещин — определялась как функция действующего напряжения и достигнутого объема трещин согласно [8]. В процессе счета модуль сдвига и динамический предел текучести изменялись по мере разрушения материала. На рис. 6 приведены рассчитанные конфигурации ударника и изолинии удельного объема трещин в нем в момент времени 1 и 7 мкс после начала взаимодействия. Стальной ударник диаметром 8 мм и высотой 24 мм ударяет о жесткую стенку со скоростью 1800 м/с. Расчет показывает, что уже к 1 мкс формируется два очага разрушения — на оси ударника, где объем трещин на высоте 6 мм от поверхности стенки достигает $0,0018 \text{ см}^3/\text{г}$, и вблизи свободной боковой поверхности, где на высоте 3 мм объем трещин составляет $0,011 \text{ см}^3/\text{г}$. Формированию разрушения вблизи поверхности способствует в начальный момент взаимодействие волны разгрузки, а в дальнейшем разрушение происходит вследствие растекания нижней части ударника вдоль поверхности стенки. Затем на оси формируется еще одна зона разрушения, где максимальный удельный объем трещин достигает $0,088 \text{ см}^3/\text{г}$, в то время как в первой, образованной уже к первой микросекунде, удельный объем трещин равен $0,0125 \text{ см}^3/\text{г}$ в момент времени 7 мкс. Расстояние между этими зонами разрушения 4,36 мм, причем нижняя расположена на удалении 0,52 мм от поверхности стенки. Таким образом, расчеты показывают, что деформирование ударника при динамическом воздействии сопровождается его разрушением, которое имеет регулярный характер. При скоростях встречи до 800 м/с разрушение и связанное с ним изменение механических характеристик материала незначительны, что позволяет использовать этот диапазон скоростей удара для оценки динамического предела текучести различных материалов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor G. I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress.— Proc. Roy. Soc., 1948, v. 3, A 194.
2. Уилкинс М. Л., Гуинан М. У. Удар цилиндра по жесткой преграде.— Механика, 1973, № 3.
3. Хорев И. Е., Горельский В. А. Осесимметричный откол в задачах широкодиапазонного взаимодействия твердых тел.— ДАН СССР, 1983, т. 271, № 3.
4. Johnson G. R. Analysis of elastic-plastic impact involving severe distortions.— J. Appl. Mech., 1976, v. 43, N 3.
5. Хорев И. Е., Горельский В. А. Численное моделирование откольных разрушений при осесимметричном взаимодействии твердых тел.— В кн.: Детонация. Материалы II Всесоюз. совещ. по детонации. Черноголовка, 1981.
6. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1979.
7. Канель Г. И., Дремин А. Н. Экспериментальное исследование и численное моделирование эволюции импульса сжатия и явления откола в железе.— В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. по импульсным давлениям. М., 1979.
8. Канель Г. И., Щербань В. В. Пластическая деформация и откольное разрушение железа «Армко» в ударной волне.— ФГВ, 1980, № 4.

Поступила 2/X 1984 г.