

Рис. 1. Зависимость логарифма среднего коэффициента диффузии углерода в альфа-железе от параметра τ .

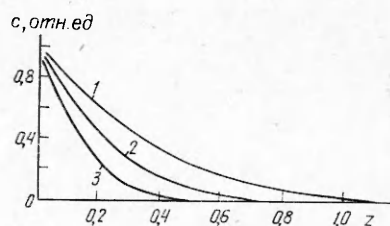


Рис. 2. Зависимость относительной концентрации c от безразмерной координаты z при диффузии углерода в никель.

$\alpha = \sqrt{D^0/a}$, $\beta = Q/RT_A$, $D^0 = D_0 \exp(-\beta)$, T_A — температура, превосходящая температуру максимально возможного нагрева, она выбирается для удобства численных расчетов на ЭВМ. Примеры зависимостей относительных концентраций c от безразмерного параметра приведены на рис. 2. Рассматривается диффузия углерода в никель при температурах 1 — 1068, 2 — 993, 3 — 943 К. Видно, что изменение температуры оказывает заметное влияние на проникновение диффундирующего вещества. Данные приведены для $\Psi = 0,3 \cdot 10^{-4}$ см.

Результаты расчетов показали, что при изменении Ψ в интервале 10^{-5} — 10^{-3} кривые, выражающие зависимость $c = f(z)$, изменяют свое положение незначительно. Глубина проникновения углерода в никель зависит от величины параметра и может достигать 50—100 мкм при $\Theta_n = 1068$ К и $\Psi = 10^{-2}$. Эти величины несколько меньше значений, полученных из эксперимента [1]. С учетом ускорения диффузии за счет увлечения примесей движущимися дефектами кристаллического строения [4] предлагаемая теория достаточно удовлетворительно соответствует экспериментальным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Земский, Е. А. Рябчиков, Г. Н. Эпштейн. Физика металлов и металловедение, 1978, 46, 2, 197.
2. С. В. Земский, Е. А. Рябчиков, Т. Г. Рябченко и др.— В кн.: Высокие давления и свойства материалов. Киев: Наукова думка, 1980.
3. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
4. С. В. Земский, В. А. Карпельев, Е. А. Рябчиков и др. Изв. вузов. Черная металлургия, 1981, 9, 109.

УДК 518.12 : 539.4.019

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И КИНЕТИКИ РАЗРУШЕНИЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

И. Е. Хорев, В. А. Горельский, С. А. Зелепугин, В. Ф. Толкачев

(Томск)

Воздействие взрывных и ударных нагрузок на металлические образцы и конструкции различной формы в большинстве случаев реализуется в условиях несимметричного нагружения, что имеет большое практическое значение при исследовании особенностей деформации и разрушения тел в микросекундном диапазоне. В экспериментальном плане исследование этих проблем при широкой вариации начальных параметров взрывных и ударных нагрузок отражено в работах [1—7].

На рис. 1 приведена фотография разреза стальной преграды (НВ-300) толщиной 10 мм после взаимодействия с компактной стальной частицей со скоростью 3530 м/с при угле подхода 30° от нормали. Разрез плиты

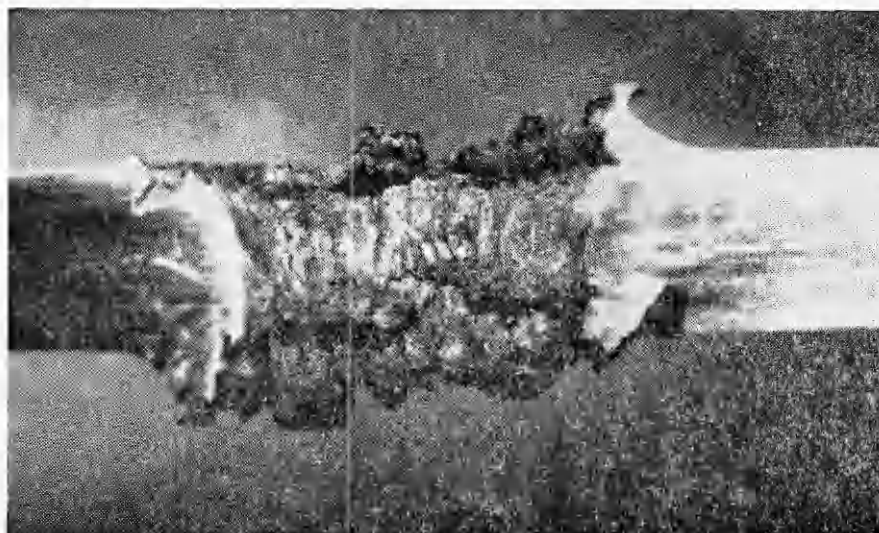


Рис. 1. Разрез стальной плиты после удара компактным бойком ($l_0 = d_0 = 8$ мм).

проведен в плоскости, образованной вектором скорости и нормалью в точке контакта. Фотография демонстрирует сквозное пробивание преграды с образованием лицевого и тыльного откольных повреждений. Наиболее ярко несимметричность взаимодействия в данном случае проявляется в характере формирования лицевых и тыльных повреждений. Лицевой откол с правой стороны вмядряющегося ударника (под ударником) значительно ослаблен, в то время как тыльный наиболее сильно выражен с правой стороны пробины. Характерным моментом данного взаимодействия тел является отвесность передней стенки (лицевая часть пробины), в то время как задняя имеет угол наклона порядка угла встречи.

Теоретические исследования подобных задач в трех измерениях связаны с большими трудностями [8]. В то же время характерные особенности деформирования и разрушения твердых тел при несимметричном взаимодействии можно качественно проследить теоретически в плоской постановке.

В данной работе проведено численное моделирование кратерообразования и разрушения плоских преград методом конечных элементов [8, 9] в плоской постановке. Соударяющиеся тела описываются сжимаемой упруго-вязкопластической средой, поведение которой при динамических нагрузках характеризуется модулем сдвига, динамическим пределом текучести и вязкостью [10]. Моделирование динамического разрушения проводилось с помощью кинетической модели разрушения активного типа [11, 12], ранее использованной в [9] для численного моделирования откольных разрушений при осесимметричном взаимодействии твердых тел.

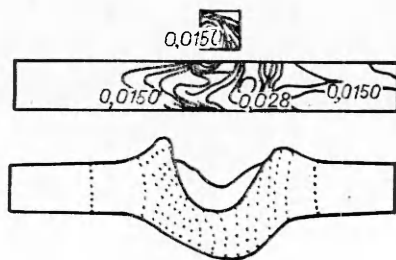


Рис. 2. Расчет накопления повреждения в стальной преграде через 18 мкс после начала взаимодействия со скоростью 1800 м/с под углом 20° .

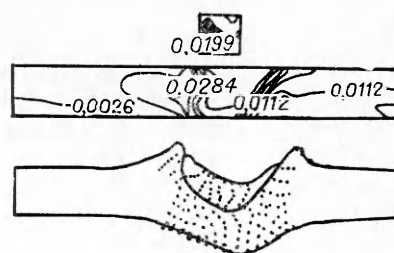


Рис. 3. Расчет накопления повреждения в стальной преграде через 10 мкс после удара со скоростью 2690 м/с.

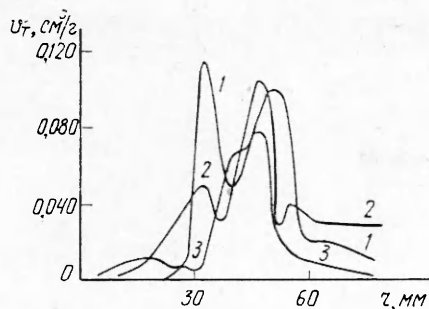


Рис. 4. Распределение объема трещин в характерных сечениях преграды через 16 мкс после удара.

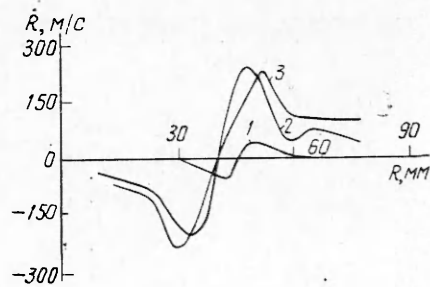


Рис. 5. Профили горизонтальных составляющих скоростей и тыльной поверхности в моменты времени 2, 8, 12 мкс.

На рис. 2 представлена хронограмма, описывающая процесс взаимодействия стального плоского ударника сечением 8×8 со стальной пластиной толщиной 10 мм. Хронограмма иллюстрирует конфигурацию взаимодействующих тел, поле скоростей в них, а также распределение изолиний удельного объема трещин, описывающих характер разрушения преграды в процессе прощипывания ударника. Расчеты и анализ распределения изолиний объема трещин показывают, что разрушение носит существенно несимметричный характер. С правой стороны зона максимального разрушения расположена в 10 мм от точки контакта, причем линия максимального объема трещин проходит почти вертикально. Зона максимальных разрушений в преграде с левой стороны непосредственно примыкает к ударнику. Изолинии объема повреждений в глубине преграды заходят далеко вправо вследствие влияния внедряющегося ударника, который тормозит рост трещин непосредственно перед собой.

На рис. 3 представлена хронограмма, описывающая внедрение ударника в преграду с теми же геометрическими параметрами при скорости удара 2690 м/с. В данном случае явно выраженным является разрушение по типу срезания пробки. Центр симметрии пробки в силу асимметрии нагружения оказывается на 5 мм сдвинутым вправо и находится примерно под точкой первоначального касания ударника с преградой. Более значительным оказывается влияние откольных эффектов на формирование зоны разрушения с правой стороны. Взаимодействие двух механизмов разрушения приводит к изгибанию изолиний объема трещин вблизи лицевой поверхности преграды вправо. Эффекты откольного разрушения слева сильно ослаблены вследствие интенсивного внедрения ударника, приводящего здесь к формированию зоны повышенного давления. Сложная форма изолиний объема трещин свидетельствует об участии нескольких конкурирующих факторов в повреждении преграды при косом ударе. Дополнительную и наглядную информацию об особенностях разрушения преград дают кривые распределения объема трещин в характерных сечениях преграды после удара со скоростью 1800 м/с (рис. 4). Два резких максимума на кривой, характеризующей распределение объема трещин на лицевой поверхности, позволяют оценить ширину выбиваемой пробки, которая составляет 13 мм. Передний максимум на кривой, отражающий разрушение в центре преграды, выражен значительно слабее (максимальное значение объема трещин $0,05 \text{ см}^3/\text{г}$ по сравнению с $0,106 \text{ см}^3/\text{г}$ во втором максимуме), что является следствием торможения развития трещин внедряющимся ударником. На тыльной поверхности преграды вследствие сдвига первого максимума вправо происходит его слияние со вторым максимумом, свидетельствующее о снижающейся внешней половине формы пробки. На рис. 5 представлены профили горизонтальных составляющих скоростей тыльной поверхности. Расчеты свидетельствуют, что к 8 мкс асимметрия профилей становится выраженной слабо, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния формы ударника на профиль составляющих скоростей тыльной поверхности к этому времени

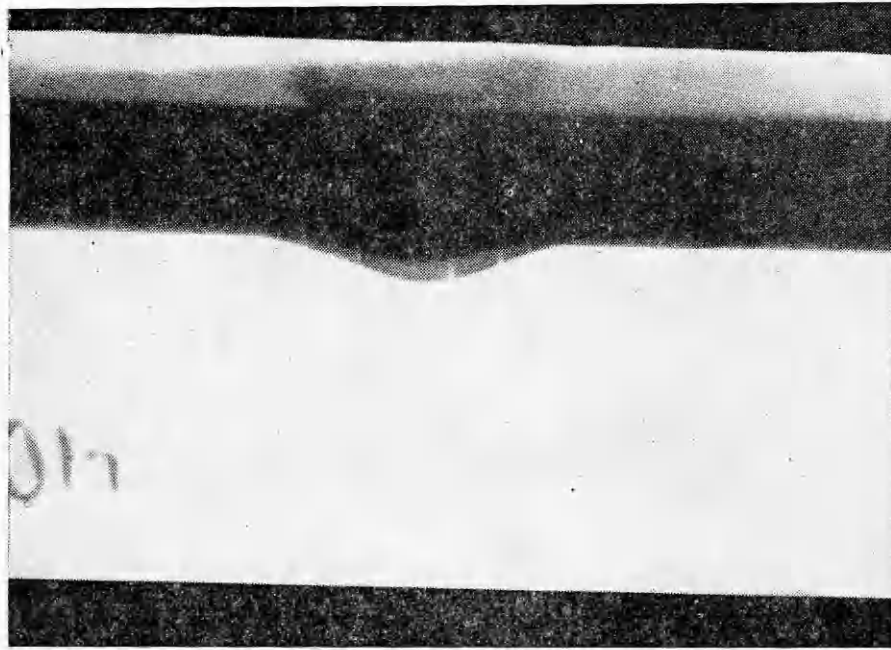


Рис. 6. Рентгенограмма деформации тыльной поверхности преграды.

в отличие от начальной стадии процесса. Рентгенограмма (рис. 6) деформации тыльной поверхности с искусственным отколом снятия в плоскости, образованной вектором скорости и нормалью к точке контакта, также свидетельствует о слабой асимметрии тыльной поверхности преграды к моменту времени 18 мкс при косом ударе.

Вертикальная составляющая скорости тыльной поверхности в интервале ее наибольших значений шириной 10 мм к этому времени, соответствующему рентгенограмме, начинает падать. В целом расчеты показывают, что с ростом скорости удара взаимодействие ударников с преградами носит внешне все более симметричный характер и лишь динамика изменения внутренних повреждений позволяет оценить сложность происходящих в преграде процессов.

Сравнение с экспериментальными данными показывает, что расчеты, проведенные для плоского случая, качественно верно отражают существенно трехмерный процесс взаимодействия ударников с преградами при ударе под углом. Вместе с тем расчеты свидетельствуют о некоторых важных различиях плоских и трехмерных течений. Установлено, что механизм разрушения в плоском случае является промежуточным между откольным разрушением, скомбинированным с вязким растеканием, и срезанием пробки. Экспериментальные данные, относящиеся к трехмерному случаю, свидетельствуют о преобладающем характере разрушения за счет вязкого растекания и откольного повреждения. Скорость движения тыльной поверхности в плоском случае завышена по сравнению с аналогичным параметром трехмерного эксперимента, что естественно в силу различной геометрии расчетов и экспериментов.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность качественного описания несимметричного взаимодействия твердых тел с учетом кинетики разрушения в широком диапазоне изменения начальных параметров процесса. Количественные оценки некоторых интегральных характеристик трехмерного процесса с помощью расчетов плоских течений можно получить, используя принцип эквивалентности базовых характеристик плоских и пространственных течений, основанный на согласовании расчетов и экспериментов, применительно к каждому конкретному случаю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Альтшулер, С. Б. Корнер, А. А. Баканова и др. ЖЭТФ, 1961, 5.
2. В. М. Титов, Ю. П. Фадеев. Космические исследования, 1972, 10, 4, 589.
3. Т. М. Платова, П. Е. Хорев, П. В. Макаров. Тр. НИИ ПММ при ТГУ/Под ред. В. А. Шваба, В. Е. Томилова. Вып. 2. Томск.: Изд-во ТГУ, 1973.
4. В. С. Никифоровский, Е. П. Шемякин. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.
5. Л. А. Мерзиевский, В. П. Урушкин. ФГВ, 1980, 16, 5, 81.
6. П. Е. Хорев, В. М. Захаров, А. А. Коняев и др.— В кн.: Детонация. Черноголовка, 1980.
7. А. В. Уткин, А. Н. Дремин, А. П. Михайлов и др. ФГВ, 1982, 18, 2, 104.
8. G. R. Johnson. J. Appl. Mechanics, 1977, 6, 771.
9. П. Е. Хорев, В. А. Горельский.— В кн.: Детонация. Матер. II Всесоюз. совещания по детонации. Вып. 2. Черноголовка, 1981.
10. Г. В. Стенанов. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1979.
11. Г. П. Канель, А. П. Дремин. Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1979.
12. Г. П. Канель, В. В. Щербань. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.

УДК 534.16 : 539.374

О ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ МЕТАЛЛОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

П. В. Макаров, Т. М. Платова, В. А. Скрипняк

(Томск)

При распространении ударных волн в твердых телах идут интенсивные превращения на микроуровне, в результате которых изменяется дефектная структура тел. В подавляющем большинстве моделей, использующих дислокационные представления о механизмах пластического течения, полагается, что затухание упругого предвестника (УП) и деформирование в пластической волне описываются одними и теми же соотношениями, определяющими скорость пластического сдвига [1]. Вследствие этого в расчетах, моделирующих распространение плоской волны, не удавалось правильно количественно описать одновременно и затухание УП, и эволюцию фронта пластической волны [1].

Настоящая работа посвящена построению модели пластического деформирования металлов в ударных волнах, в которой разделены механизмы превращений дефектной структуры в УП, пластической волне нагружения и в волне разгрузки (т. е. учтен определяющий вклад того или иного механизма в формирование различных участков волнового профиля), а также численному моделированию эволюции волновых фронтов с учетом релаксационных процессов.

Известно, что дислокационная модель пластического течения с параметрами, определенными из квазистатических экспериментов, и реальными начальными плотностями дислокаций не позволяет правильно описать эволюцию фронта ударной волны. В связи с этим можно предположить, что во фронте волны действует специфический механизм микроструктурного превращения, который не наблюдается в условиях квазистатического деформирования. Этим механизмом может быть гетерогенное зарождение дислокаций [2, 3].

В данной работе модель, учитывающая возможность увеличения плотности дислокаций за счет гетерогенного зарождения, использовалась в расчетах распространения плоских ударных волн интенсивностью до 10 ГПа в сплавах алюминия: Al-1060, Al-6061-T6, Д-16. Численно решалась система уравнений сохранения совместно с определяющим уравнением релаксационного типа (2)

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial x}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t}, \quad \sigma_i = -p + \frac{4}{3} \tau, \quad p = p(\rho), \quad (1)$$