

ЛИТЕРАТУРА

1. Меньшиков Г. П., Одинцов В. А., Чудов Л. А. Внедрение цилиндрического ударника в конечную плиту. — Изв. АН СССР. МТТ, 1976, № 1.
2. Милейко С. Т., Кондаков С. Ф., Голофаст Е. Г. Об одном случае пробивания. — Проблемы прочности, 1979, № 12.
3. Рехт В. Ф., Ипсон Т. В. Динамика баллистической пробивки. — ПМ, 1963, № 3.
4. Johnston W. Impact strength of materials. L.: Edward Arnold, 1972.
5. Holzer A. J. A tabular summary of some experiments in dynamic plasticity. — J. Engng Mater. and Technol., 1979, vol. 101, N° 7.
6. Dharan C. K. H., Hanser F. E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. — Experim. Mech., 1970, vol. 10, p. 370.
7. Harding J. The temperature and strain rate sensitivity of α -titanium. — Archives of Mechanics, 1975, vol. 27, p. 715.
8. Dowling A. R., Harding J., Campbell J. D. The dynamic punching of metals. — J. Inst. Metals, 1970, vol. 98, p. 215.

УДК 541.12.03

ОБ ОЦЕНКЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АДИАБАТЕ ГЮГЕНИО С ПОМОЩЬЮ ПРАВИЛА «ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ»

А. А. Долгов, М. Ю. Мессинев
(Москва)

Существующие методы расчета температуры твердого тела, сжатого ударной волной, требуя трудоемких вычислений, являются в той или иной степени приближенными. Это связано как с неточностями при задании потенциала и величины определяющих его коэффициентов, так и с выбором уравнения состояния. В практических расчетах часто используется приближение $\Gamma/V = \Gamma_0/V_0$, где Γ — коэффициент Грюнайзена, V — объем, индекс ноль относится к исходному состоянию вещества [1, 2], а также правило «зеркального отражения». Обоснованием этого правила служит экспериментально установленный для не слишком высоких давлений в ударной волне p_H закон удвоения массовой скорости вещества u_H в волне разгрузки [3, 4].

Во многих работах [4–7] при расчете температуры совпадение изэнтропы разгрузки с кривой ударной сжимаемости в p — u -координатах используется для вычисления только одного из интегралов Римана, определяющего форму изэнтропы на p — V -плоскости. Эта процедура позволяет дать оценку величины приращения объема вещества за счет необратимого ударного разогрева после разгрузки к нулевому давлению:

$$(1) \quad \Delta \hat{V}_{\text{ост}} = \hat{V}_{\text{ост}} - V_0 - \int_0^p \left(\frac{du_H}{dp} \right)^2 dp - \Delta V_H.$$

Можно, однако, в рамках того же «зеркального» приближения записать и второй интеграл Римана для энергии E :

$$(2) \quad \Delta \hat{E}_{\text{ост}} = \hat{E}_{\text{ост}} - E_0 = \Delta E_H - \int_0^p p \left(\frac{du_H}{dp} \right)^2 dp.$$

Поскольку формально выражения (1), (2) для остаточных параметров равноправны, возникает вопрос, какое из них лучше описывает термодинамику ударного сжатия.

Как истинные, так и «зеркальные» остаточные величины допускают разложения в ряд Тейлора при малых давлениях. Для отклонения этих параметров можно получить

$$\Delta V_{\text{ост}} - \Delta \hat{V}_{\text{ост}} \sim p^3 \sim \Delta V_{\text{ист}}, \quad \Delta E_{\text{ост}} - \Delta \hat{E}_{\text{ост}} \sim p^4,$$

откуда следует, что «зеркальное» приближение для энергии (2) лучше описывает термодинамику ударного сжатия. Использование выражения (1) приводит также к существенным неточностям при расчете формы «зеркальных» изэнтроп [7].

К тому же выводу можно прийти, проводя сравнение термодинамических следствий интегралов (1), (2) с широко используемым приближением $\Gamma/V = \text{const}$. Для расчета температуры на адиабате Гюгонно можно, как и в работе [8], воспользоваться термодинамическим равенством

$$T_H \frac{dE_{\text{ост}}}{dp} = T_{\text{ост}} \left(\frac{dE_H}{dp} + p \frac{dV_H}{dp} \right) = T_{\text{ост}} \frac{d\sigma}{dp},$$

где σ — площадь, ограниченная ударной адиабатой и прямой Рэлея на плоскости p — V ; отметим, что в [8] остаточная внутренняя энергия оценивалась с помощью комбинации «зеркальных» величин:

$$(3) \quad \Delta E_{\text{ост}} = \frac{\sigma}{1 + \frac{\sigma - \Delta \hat{E}_{\text{ост}}}{\beta \Delta \hat{V}_{\text{ост}}}}, \quad \beta = \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_{p=0}.$$

На фигуре представлены результаты расчетов для меди, в которых принималось, что скорость ударной волны D линейно связана с массовой скоростью $D = C + Su$ ($C = 3,94$ км/с, $S = 1,489$), а коэффициент объемного расширения и теплоемкость постоянны $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-5}$ 1/град, $c_p = 410$ Дж/кг·град. Для этого случая кривые 1, 1' и 2, 2' дают зависимости $T_{\text{ост}}$ и T_H от давления, полученные с помощью (1), (2) соответственно, по формуле

$$(4) \quad \Delta \hat{E}_{\text{ост}} = \frac{C^2}{4S^2} \left[1 + x + \frac{1}{4} \ln(1 + 4x) - \sqrt{1 + 4x} \right], \quad x = S \frac{pV_0}{C^2}.$$

Интеграл Римана для энергии (2) дает в «зеркальном» приближении результат, существенно более близкий к следствиям $\Gamma/V = \text{const}$ (кривые 3 и 3'), чем широко используемый в термодинамических расчетах объемный интеграл (1); близкие к 3 температуры следуют также из формулы (3). В тех случаях, когда выбор «зеркального» приближения соответствует характеру поставленной задачи, для получения простой и надежной оценки температур ударного сжатия можно использовать соотношение (4).

Поступила 17 VII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. High-velocity impact phenomena. Ed. Ray Kinslow. N. Y.—L.: Acad. Press, 1970.
2. Долгов А. А., Мессинев М. Ю. Термодинамика твердого тела, ударно-сжатого при низких температурах.— ФГВ, 1979, № 4.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
4. Enig J. W. Thermodynamic description of metals based on the p, u mirror-image approximation.— J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, p. 746.
5. Рыбаков А. П. Соответственные состояния при ударном сжатии конденсированных тел.— ЖФХ, 1972, № 4.

6. Enig J. W., Petrone F. G. Equal of state and derived shock initiation criticality conditions for liquid explosives.— Phys. Fluids, 1966, vol. 9, p. 398.
7. Prieto F. E. System independent releas adiabats from shocked states.— J. Phys. Chem. Solids, 1975, vol. 36, p. 871.
8. Трофимов В. С. Простой термодинамический метод оценки температуры ударного сжатия конденсированной среды.— ФГВ, 1973, № 4.

УДК 532.593:620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ТЕЛ

А. П. Рыбаков

(Даугавпилс)

В механике деформируемых сред особое место занимает разрушение специфического вида. Откол возникает вследствие волнового течения, реализующегося в образце конечных размеров при высокоскоростном ударе, либо контактным взрыве, и заключается в отделении части образца вблизи свободной поверхности от основной массы образца. Можно сказать, что откол — динамическое разрушение — имеет универсальный характер. Он наблюдается для различных твердых тел: металлов, многослойных композитов, скальных пород, полимеров. Образование откола экспериментально зафиксировано и для жидкостей. Жидкости при интенсивном динамическом нагружении подобны твердым телам и претерпевают откольное разрушение. В частности, в работе [1] отмечено образование откола в воде, глицерине, масле. Исследованиям способов определения и получению самих количественных характеристик откольного разрушения посвящены работы: [2] для воды и этилового спирта, [3] для глицерина, [4,5] для глицерина и ртути, а также [6] для воды, этилового спирта, глицерина и ацетона. Кроме того, в [7] исследовано откольное разрушение в легкоплавких металлах, оставшихся в жидком состоянии после ударного нагружения и последующей разгрузки.

Для построения моделей динамического разрушения при отколе в конденсированных телах необходимы данные для возможно большего числа групп конденсированных тел, в том числе жидких.

В данной работе исследованы металлы и сплавы (магний, сталь Ст. 3, алюминиевый сплав Д16, свинец), жидкости (вода, этиловый спирт, глицерин, ацетон) и пластмассы (плексиглас, капролон, полистирол, парафин). Примененная при этом экспериментальная техника и способ обработки результатов подобны использованным в работе [6].

Полученные экспериментальные результаты показаны на фиг. 1—3. На фиг. 1 результаты для свинца: I — данные настоящей работы, 2 — [8], 3 — [9]. На фиг. 2 результаты для глицерина — I, воды — II, этилового спирта — III: 1 — данные настоящей работы, 2 — [2], 3 — статическая прочность на разрыв [10, 11]. На фиг. 3 результаты для плексигласа — I, полистирола — II, парафина — III, капролона — IV: 1 — данные настоящей работы, 2 — [2], 3 — статическая прочность на разрыв [12].

Процедура приведения данных других исследователей к переменным: разрушающее напряжение p_* , скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ — описана в [13]. Результаты для стали Ст. 3 и алюминиевого сплава Д16 приведены в [13].

Исследованные материалы разделились на две группы: с линейной зависимостью разрушающего напряжения от скорости деформирования

$$(1) \quad p_* = a_0 + a_1 \dot{\epsilon}$$