

Рис. 2. Сечения перфорированной (а) и железобетонной (б) испытательных камер.

1 — стальной двутавр № 22; 2 — рельс Р43; 3 — железобетонное кольцо (процент армирования 1,4); 4 — перфорированная оболочка из стальных стержней.

Рис. 1. Сечения исследованных перфорированных преград.

Проведенные исследования показали: 1) при одинаковом энерговыделении в 210,4 МДж камера первого типа позволяет уменьшить безопасное расстояние с уровнем давления в 0,005 МПа в 2,5 раза по сравнению с энерговыделением в открытом пространстве; 2) установка перфорированной оболочки внутри железобетонного кольца позволяет увеличить предельное по разрушению энерговыделение с 77,5 до 95,8 МДж по сравнению с железобетонным кольцом без перфорированной оболочки.

Таким образом, результаты исследования ослабления ВУВ перфорированными преградами показывают, что степень ослабления ВУВ перфорированными преградами зависит не только от коэффициента перфорации и интенсивности падающей ВУВ, но и от структуры перфорированной преграды. Показана возможность использования перфорированных преград для построения испытательных камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Минеев, В. Е. Клавовский, Б. В. Мацевич и др. V Symposium Explosive Working of Metals, Gottwaldow, 1982, Dum techniky CSVTS Pardubice, 1982.

УДК 662.2 : 548.526

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ДИФФУЗИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С. В. Земский, В. А. Карпельев, Е. А. Рябчиков
(Днепропетровск)

Значительное проникновение углерода в металлы, соприкасающиеся при воздействии ударной волны, наблюдалось экспериментально в ряде работ [1, 2]. Теоретическое объяснение такого «аномального» проникновения до настоящего времени не было достаточно полным. В настоящей работе рассматриваются различные факторы, возникающие при воздействии ударной волны на металлы, способные интенсифицировать диффузионные процессы.

Под действием ударной волны твердые тела подвергаются обратимой и необратимой деформации, причем работа, совершаемая при необратимой деформации, на 90—95% переходит в тепло. Эту работу можно

представить в виде

$$A = p\Delta h, \quad (1)$$

где A — работа; $\Delta h = vt$ — необратимое перемещение поверхности твердого тела под воздействием ударной волны; p — давление; v — скорость перемещения; t — время действия ударной волны. Давление и скорость деформации в общем случае зависят от времени и являются средними значениями

$$p = \frac{\int_0^{t_1} p(t) dt}{t_1} \quad \text{и} \quad v = \frac{\int_0^{t_1} v(t) dt}{t_1}.$$

Изменение температуры твердого тела при выделении тепла внутри его может быть записано в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(dVT) + \frac{w}{\sigma\rho}. \quad (2)$$

Для пластины, протяженность которой в направлении осей y и z значительно превосходит протяженность по оси x , краевыми эффектами можно пренебречь, тогда

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{w}{\sigma\rho}, \quad (2a)$$

где T — абсолютная температура; t — время; a — коэффициент температуропроводности; w — интенсивность тепловыделения; σ — теплоемкость; ρ — плотность; x — координата. В уравнении (2a) a , σ , ρ приняты константами, которые представляют собой величины

$$a = \int_{T_2}^{T_1} a(T) dT/\Delta T, \quad \sigma = \int_{T_1}^{T_2} \sigma(T) dT/\Delta T, \quad \rho = \int_{T_1}^{T_2} \rho(T) dT/\Delta T, \quad (3)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2,$$

$$w = \frac{p\Delta h}{th} = \frac{p\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0 i}, \quad (4)$$

где h — толщина образца в заданный момент деформации; $\varepsilon_0 = v/h_0$; h_0 — начальная толщина образца.

Диффузионное проникновение в материалы, подвергающиеся воздействию ударной волны, может быть описано с помощью уравнения диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(x, T) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + B(x, T) \frac{\partial c}{\partial x} + E(x, T) c. \quad (5)$$

При выводе этого уравнения принято, что коэффициент диффузии подчиняется уравнению Аррениуса

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (6)$$

где D — коэффициент диффузии; Q — энергия активации диффузии; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура, находящаяся из решения уравнения (2a) при условиях (3) и (4) для периода действия ударной волны и при условии $w = 0$ в период, следующий после окончания действия ударной волны. Таким образом, диффузия имеет место при переменных плотностях линейных и концентрациях точечных дефектов кристаллического строения. С учетом действия этих факторов коэффициенты в уравнении (5) имеют вид

$$B(x, T) = \frac{D}{RT} \left[\frac{\partial T}{\partial x} (Q + q) + F \right], \quad (7)$$

$$E(x, T) = \frac{D}{RT} \left[\frac{q}{RT^2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 (Q - 1) + \frac{QF}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial x} + a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial F}{\partial x} - F \right], \quad (8)$$

где q — теплота переноса; F — сила, действующая на атомы примеси в твердом растворе в поле дефектов кристаллического строения. Время нагрева материала в период деформации (I период) значительно меньше, чем время последующего охлаждения (II период).

Решение уравнения (2а) для второго периода ($w = 0$) при граничных условиях III рода имеет вид

$$T(x, t) = \Theta_{\text{п}} + (\Theta_{\text{н}} - \Theta_{\text{п}}) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) + \exp(Hx + H^2at) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + H\sqrt{at}\right), \quad (9)$$

где $\Theta_{\text{п}}$ — температура на поверхности материала, равновесная с окружающей средой; $\Theta_{\text{н}}$ — температура материала в момент прекращения действия ударной волны; H — константа теплообмена материала с окружающей средой. Введем безразмерные параметры $z = \frac{x}{2\sqrt{ct}}$, $\tau = H^2at$, тогда уравнение (9) можно записать следующим образом:

$$T(z, \tau) = \Theta_{\text{п}} + (\Theta_{\text{н}} - \Theta_{\text{п}}) \operatorname{erf}(z) + \exp(2z\sqrt{\tau} + \tau) \operatorname{erfc}(z + \sqrt{\tau}). \quad (9a)$$

Начальная температура $\Theta_{\text{н}}$ может быть найдена из решения уравнения (2а). Оценка мощности тепловыделения (МТВ) показывает, что при обработке ударной волной, имеющей давление 10 ГПа (100 кбар) и скорость деформации 100 м/с, в пластине из никеля МТВ $\sim 6 \cdot 10^7$ кал/(см³ · с). Температура такой пластины при толщине 0,5 см, скорости деформации 100—300 м/с и давлении 4—8 ГПа (табл. 2.3 [3]) может находиться в интервале 600—1200 К. Оценка температуры согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [3]. Если проводить расчет не по средним значениям ρ и ν , а учитывать их зависимость от времени и координаты, то температура локальных областей может быть еще выше.

После окончания действия ударной волны начнется охлаждение металла, причем температура уменьшается от максимально достигнутой до комнатной (~ 300 К). Проникновение диффундирующего вещества с поверхности материала в его объем в этом случае может быть оценено по среднему значению коэффициента диффузии \bar{D} .

$$\bar{D} = D_0 \int_0^{t_1} \exp(-Q/RT) dt/t_1, \quad (10)$$

где T — температура, выражаемая формулой (9а).

Зависимость логарифма средних значений коэффициентов диффузии от параметра τ приведена на графике рис. 1. По этим графикам можно найти эффективное время диффузии и оценить глубину проникновения диффундирующего вещества, т. е. глубину, на которой концентрация составляет 0,01 от поверхностной. Эта глубина зависит от параметров изотермической диффузии в том же материале Q и D_0 , интенсивности теплообмена на поверхности материала H , коэффициента температуропроводности a , продолжительности охлаждения t_1 и значений температур $\Theta_{\text{н}}$ и $\Theta_{\text{п}}$, как, например, при $\tau = 1$ для диффузии в альфа-железе. Все величины, кроме $\Theta_{\text{п}}$, легко определить с большой точностью из эксперимента. Величина $\Theta_{\text{п}}$ может быть найдена путем экстраполяции зависимости температуры образца от времени до значений $t = 0$. Для диффузии углерода в альфа-железе при $\Theta_{\text{н}} = 673$ К, $\Theta_{\text{п}} = 300$ К, $\tau = 0,1$, $H = 0,1$, $\bar{D} = 7,37 \cdot 10^{-10}$ см²/с глубина проникновения $x = 4,2 \cdot 10^{-4}$ см, при $\tau = 1$ соответственно $x = 5 \cdot 10^{-4}$ см. Продолжительность процесса диффузии соответственно 58 и 580 с, она в 10^8 — 10^7 раз превосходит продолжительность непосредственного действия ударной волны.

Уравнение (5) с условиями (6), (8) решено с помощью численных методов. Расчеты проводили на ЭВМ ЕС-1022. Предварительно уравнение было преобразовано к новым параметрам $\Psi = \sqrt{D^0 t}$, $z = \frac{x}{2\sqrt{D^0 t}}$,

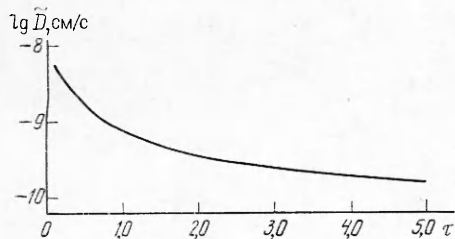


Рис. 1. Зависимость логарифма среднего коэффициента диффузии углерода в альфа-железе от параметра τ .

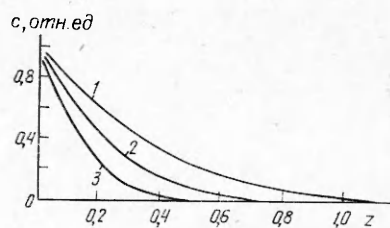


Рис. 2. Зависимость относительной концентрации c от безразмерной координаты z при диффузии углерода в никель.

$\alpha = \sqrt{D^0/a}$, $\beta = Q/RT_A$, $D^0 = D_0 \exp(-\beta)$, 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. Дерибас. 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