

Рис. 1.



Рис. 2.

ческого эффектов в развитии деформации у кратеров требуются дополнительные исследования.

Подобные деформационные структуры наблюдались на поверхности медного образца, расположенного на катоде, в тлеющем разряде пониженного давления —  $(5 \div 8) \cdot 10^2$  Па при плотности тока 3—5 А/м<sup>2</sup>. Обнаруженные ямки размерами 10—18 мкм со следами плавления и наличием линий скольжения на периферии ямок связываются с кратковременным местным воздействием потока ионов большой плотности. В аналогичной постановке эксперимента на нескольких материалах наблюдались специфические структурные изменения и заметное упрочнение [3].

Систематические исследования структурных изменений на модельных материалах при искровой и плазменной обработке с контролируемыми условиями позволят уточнить представле-

ния как о механизме процессов, происходящих в газе при разряде, так и о механизме деформации и эрозии металла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мик Д., Крэге Д. Электрический пробой в газах.— М.: ИЛ, 1960.
2. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде.— Новосибирск: Наука, 1982.
3. Терешко И. В., Силин И. П. и др. // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: Тез. докл. XII Всесоюз. конф.— Куйбышев, 1989.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 25/XII 1989

УДК 534.222.2

Б. Ю. Ляпидевский

#### О СКОРОСТИ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

В [1, 2] экспериментально доказана возможность пузырьковой детонации, т. е. распространения самоподдерживающейся волны в жидкости с пузырьками горючего газа. Интересная особенность этого процесса состоит в наличии зависимости скорости детонационной волны от вязкости жидкости. Как показано в [1, 2], с увеличением вязкости несущей фазы скорость детонации существенно возрастает. В предлагаемой заметке пределы скоростей распространения самоподдерживающихся волн устанавливаются на основе анализа равновесных и неравновесных по давлению в фазах моделей пузырьковых сред.

© 1990 Ляпидевский В. Ю.

**Равновесная модель.** Пусть давление в пузырьках газа  $p_g$  и давление в жидкости  $p$  совпадают. Тогда из предположения об адиабатичности сжатия пузырьков следует зависимость

$$p = p_0 y^{-\gamma_0}$$

(кривая  $\Gamma_0$  на рисунке) с  $y = \tau_g/\tau_g^0 = (\tau - \tilde{\tau})/(\tau_0 - \tilde{\tau})$ ,  $\tilde{\tau} = (1 - \lambda)\tau_f$ . Здесь  $p_0$ ,  $\tau_g$ ,  $\tau_f$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma_0$  — начальное давление газа, удельные объемы газовой и жидкой фазы, массовая концентрация и показатель политропы газа, а  $\tau$ ,  $\tau_0$  — текущий и начальный удельный объемы смеси. Если сжатие продуктов горения описывается показателем политропы  $\gamma$  и известно отношение давлений  $\beta$  в пузырьке до и после реакции, протекающей с сохранением объема, то уравнение состояния прореагировавшей смеси имеет вид

$$p = p_0 \beta y^{-\gamma}$$

(кривая  $\Gamma_1$ ).

Законы сохранения массы и импульса дают в бегущей со скоростью  $D$  волне следующее соотношение:

$$\Theta = \frac{D^2 (\tau_0 - \tilde{\tau})}{p_0 \tau_0^2} = \frac{\beta y^{-\gamma} - 1}{1 - y}.$$

Минимальная скорость волны  $D_e$  определяется касанием луча  $L_e$  кривой  $\Gamma_1$  и соответствует скорости детонации Чепмена — Жуге в равновесной модели, т. е.  $\Theta_e$  и  $y_e$  находятся из решения уравнения

$$\Theta_e = (\frac{\beta}{y_e^{-\gamma}} - 1)/(1 - y_e) = \gamma \beta y_e^{-\gamma-1}.$$

При  $\beta \gg 1$   $y_e \sim \gamma/(\gamma + 1)$ , что совпадает с оценкой [3]. Число Маха  $M_e = D_e/c_e \approx (\beta y_e^{-\gamma-1})^{1/2}$  не зависит от объемной концентрации газовой фазы  $\phi$ ,  $c_e = (\gamma_0 p_0 \tau_0 \phi^{-1})^{1/2}$  — равновесная скорость звука невозмущенной среды,  $\beta = \gamma \beta / \gamma_0$ .

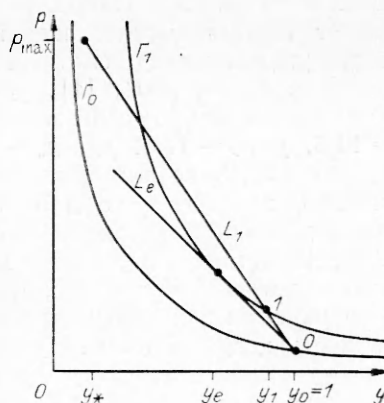
**Неравновесная модель.** В предыдущих рассуждениях не учитывались условия возгорания смеси. Пусть реакция происходит мгновенно при температуре  $T = T_*$ , т. е. при  $y = y_* = (R_*/R_0)^3 = (T_0/T_*)^{1/(\gamma_0-1)}$  и  $y_* < y_e$ . Различие средних давлений в пузырьке и окружающей жидкости, обусловленное инерцией жидкости, приводит к интенсивным колебаниям пузырьков при прохождении волны. Влияние неравновесности газожидкостной среды по давлению в фазах учтено в модели Иорданского — Когарко.

В рамках односкоростной модели значения переменных в бегущей волне, соединяющей равновесные состояния 0 и 1, на плоскости  $(y, p)$  расположены на луче  $L_1$ . Для несжимаемой несущей фазы кинетическая энергия  $e_i$  движения жидкости в окрестности пузырьков непрореагировавшего ( $i = 0$ ) и прореагировавшего ( $i = 1$ ) газа задается уравнением [4]

$$e_i = H_i(y) = \frac{1}{2} \Theta ((y-1)^2 - (y_i-1)^2) - y + y_i - \frac{\beta_i}{\gamma_i - 1} (\tilde{y}^{1-\gamma_i} - y_i^{1-\gamma_i}),$$

$$\beta_0 = 1, \beta_1 = \beta, \gamma_1 = \gamma.$$

Так как  $e_i \geq 0$ , то минимальная скорость волны  $D_{\min}$ , в которой происходит реакция горения пузырьков газа с сохранением в процессе сгорания их радиуса, достигается при  $H_1(y_*) = 0$ . При этом  $D_{\min} > D_e$  и детонационная волна состоит из уединенной волны в непрореагировавшей смеси, сжимающей газ до давления, при котором происходит воспламенение



газа, п плавного расшпрения до равновесного состояния 1. Численный расчет нестационарной задачи, проведенный А. В. Захаровым, также подтверждает выход волны на стационарный режим с  $D = D_{\min}$ .

Для  $R_* = 0,25R_0$  [1],  $\gamma_0 = 1,35$ ,  $\gamma = 1,15$ ,  $\beta = 16$  ( $C_2H_2 + 2,5 O_2$ ) и  $\beta = 8$  ( $2H_2 + O_2$ ) [5] соответственно получаем  $M_e = 7,12$ ,  $M_{\min} = D_{\min}/c_e = 11,8$ ,  $p_1/p_0 = 17,8$ ,  $p_{\max}/p_0 = 185$  и  $M_e = 4,95$ ,  $M_{\min} = 8,3$ ,  $p_1/p_0 = 8,85$ ,  $p_{\max}/p_0 = 92$ . Экспериментальные зависимости [1] числа Маха от концентрации  $\phi$  для  $\phi = 1 \div 8\%$  находятся в указанных пределах, причем скорость детонации в воде соответствует  $D_e$ , а в смеси вода — глицерин —  $D_{\min}$ . Величина  $D_{\min}$  дает верхний предел скорости самоподдерживающейся детонации, так как при ее выводе используется предположение о сохранении радиуса пузырька после сгорания смеси. Если уменьшается вязкость несущей фазы, пузырек сильнее деформируется при всплывании, что приводит к его разрушению в детонационной волне, быстрому восстановлению динамического равновесия в фазах и распространению волны с  $D_e$ . Следует отметить, что процессы теплоотдачи, конечность скорости протекания реакции способствуют уменьшению эффективного тепловыделения горючей смеси, особенно для малых концентраций газовой фазы. Поэтому представленные зависимости лишь качественно обобщают возможность распространения недосжатой детонации в гетерогенной среде с внутренними инерционными свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев А. В., Сычев А. И. ФГВ, 1987, 23, 6.
2. Сычев А. И., Пинаев А. В. ПМТФ, 1986, 1.
3. Кузнецов И. М., Копотев В. А. Докл. АН СССР, 1989, 304, 4.
4. Ляпидевский В. Ю., Плаксин С. И. // Механика быстропотекающих процессов.— Новосибирск, 1983.— Вып. 62.
5. Николаев Ю. А., Топчян М. Е. ФГВ, 1977, 13, 3.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 22/XII 1989