

05;10;12

## Эффективность процесса сверхглубокого проникания

© С.К. Андилевко, С.М. Ушеренко, В.А. Шилкин

Научно-исследовательский институт импульсных процессов Белорусского государственного производственного концерна порошковой металлургии, Минск, Белоруссия

Поступило в Редакцию 29 января 1998 г.

Осуществлен анализ эффективности действия взрывного ускорителя, определена эффективность потока частиц, проникающих в мишень на сверхбольшие глубины.

При анализе результатов экспериментов по сверхглубокому прониканию [1–5] особое место занимает вопрос о количестве введенного в мишень вещества и его распределении по материалу преграды. Настораживает тот факт, что данные по количеству вводимого вещества [1–3], определенные на различных материалах, существенно (иногда на несколько порядков) отличаются друг от друга. Не добавляют ясности в этом вопросе и попытки косвенными методами оценить количество вводимого вещества, основываясь, например, на подсчетах плотности канальных зон в поперечных сечениях материала преграды [2,4,5]. Здесь оценки также расходятся от сотен штук на  $\text{mm}^2$  [2] до тысяч [4] и десятков тысяч штук на  $\text{mm}^2$  [5]. Этот факт диктует необходимость проведения общего анализа эффективности действия взрывного ускорителя [6,7] для определения среднего количества вещества (или его концентрации), вводимого в мишень в условиях сверхглубокого проникания СГП).

Полученные к настоящему времени результаты по моделированию процесса [6–8] позволяют рассчитать работу, необходимую для сверхглубокого проникания одной частицы, как суммарную энергию, затрачиваемую на преодоление силы сопротивления преграды на неустановившемся и установившемся участках движения частицы [4,6,8]. Из [4,6–8] следует, что затратами энергии недеформирующейся частицы на преодоление участка неустановившегося движения по сравнению

с соответствующей величиной для установившегося участка можно пренебречь. В таком случае, если  $dx$  — малое расстояние, пройденное частицей в мишени,  $U_c$  — скорость установившегося движения частицы [4,6,8], а  $\rho$  — плотность мишени, работа, затраченная на преодоление участка  $dx$ , может быть рассчитана по формуле

$$dA = \rho \frac{U_c^2}{2} S_p dx, \quad (1)$$

где  $S_p$  — площадь миделева сечения частицы. Поскольку скорость установившегося движения при неизменном давлении является величиной постоянной [6–8], то частица, проникающая на глубину  $H$  затратит энергию

$$e = \int_0^e dA = \int_0^H \rho \frac{U_c^2}{2} S_p dx = \rho \frac{U_c^2}{2} S_p H. \quad (2)$$

Средняя глубина проникания  $H$  может быть установлена исходя из изменения массовой концентрации вводимого материала с глубиной преграды  $c_m(h)$

$$H = \frac{1}{2c_m} \int_0^l c_m(h) dh, \quad (3)$$

где  $L$  и  $c_m$  — длина преграды и средняя концентрация вводимого материала соответственно. Однако при определении интегральных параметров процесса вполне приемлемо использовать равномерное распределение концентрации ( $c_m(h) = c_m = \text{const}$ ), тогда из (3) получим  $H = L/2$ .

Как следует из [4,6–8], единственным источником энергии для СГП служит кинетическая энергия потока частиц, формируемого взрывным ускорителем [6,8]. Если обозначить через  $U_A$  и  $m_p$  среднюю скорость потока частиц и массу отдельной частицы соответственно, энергия каждой частицы потока составит  $e_p = m_p \frac{U_A^2}{2}$ , что позволяет определить количество частиц потока, энергия которых должна быть затрачена на проникание на сверхбольшие глубины одной частицы

$$N_\varepsilon = \frac{e}{e_p} = \frac{\rho S_p H}{m_p} \left( \frac{U_c}{U_A} \right)^2 \quad (4)$$

или для сферической частицы с плотностью  $\rho_p$  и радиусом  $r_p$

$$N_\varepsilon = \frac{\rho \pi r_p^2 H}{\rho_p \frac{4}{3} \pi r_p^3} \left( \frac{U_c}{U_A} \right)^2 = \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{H}{r_p} \left( \frac{U_c}{U_A} \right)^2. \quad (5)$$

Обратная величина  $\varepsilon = 1/N_\varepsilon$  определяет эффективность потока. По имеющимся экспериментальным и расчетным данным [1–8]  $U_c \approx 600$  м/с,  $U_A \approx 1500$  м/с,  $H = L/2 \approx 10^{-1}$  м,  $r_p = 10^{-6}$  м,  $\rho/\rho_p \approx 0.5$ –8 и  $N_\varepsilon \geq 10^4$ . Следовательно, эффективность или КПД потока  $\varepsilon \leq 10^{-4}$  (или, что то же самое 0.01%), как это и предполагалось в [6,8].

Зная эффективности потока в условиях СГП нетрудно вычислить реально достижимое в единичном эксперименте среднее массовое содержание порошка в преграде. Если  $M_L$  — масса порошковой засыпки, то общая масса вводимого порошка  $m = \varepsilon M_L$ , и его среднее массовое содержание в преграде для сферической частицы

$$c_m = \frac{m}{M_T} = \varepsilon \frac{M_L}{M_T} = \frac{4}{3} \frac{\rho_p}{\rho} \frac{r_p}{H} \left( \frac{U_A}{U_c} \right)^2 \frac{M_L}{M_T}, \quad (6)$$

где  $M_T$  — масса мишени. В стандартных условиях эксперимента [1–5]  $M_L \approx 0.1$  кг,  $M_T \approx 0.25$  кг, следовательно  $c_m \leq 0.3 \cdot 10^{-4}$  (0.003%). Учитывая всевозможные потери, связанные с реализацией СГП в реальных экспериментах, эту величину следует ожидать еще меньшей, следовательно, (6) может рассматриваться как максимальная оценка ожидаемой в эксперименте средней массовой концентрации вводимого вещества. При этом следует учитывать, что реальное распределение концентрации по глубине мишени сильно отличается от равномерного и изобилует локальными экстремумами. Кроме того, возможно сквозное пробивание мишени.

Проведенный анализ позволяет оценить уровень концентрации вещества, вводимого в металлическую преграду в условиях ее одноразового нагружения по методике СГП.

## Список литературы

- [1] *Andilevko S.K., Roman O.V., Shilkin V.A., Usherenko S.M.* // J. Phys. IV France. 1994. V. 4. N 8. P. 802–807.
- [2] *Ушеренко С.М.* Условия сверхглубокого проникновения и создание процесса упрочнения инструментальных сталей высокоскоростным потоком порошковых материалов. Дис. на соис. канд. техн. наук. Минск: БПИ, 1983. 256 с.
- [3] *Андилевко С.К., Серов В.Г., Шилкин В.А., Ушеренко С.М.* // Высокоэнергетическая обработка материалов / Под ред. В.В. Соболева. Днепропетровск, 1997. С. 8–14.
- [4] *Андилевко С.К.* Сверхглубокий массоперенос дискретных микрочастиц в металлических преградах в условиях нагружения последних потоком порошка. Дис. на соис. канд. физ.-мат. наук. Минск: ИТМО, 1991. 106 с.
- [5] *Шилкин В.А.* Структура и свойства термообработанной стали Р6М5, упрочненной высокоскоростным потоком порошковых материалов. Дис. на соис. канд. техн. наук. Минск: БПИ, 1986. 172 с.
- [6] *Andilevko S.K.* // J. Phys. IV France 7 (1997). P. 729–734.
- [7] *Альтшулер Л.В., Андилевко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 15. В. 5. С. 55–57.
- [8] *Andilevko S.K., Shilkin V.A., Usherenko S.M., Romanov G.S.* // Int. J. Heat. Mass Transfer. 1993. V. 36. N 4. P. 1113–1124.