УДК 517.958:621.785.54/.56

ДИНАМИКА ЧАСТИЦ ПОРОШКА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАПЫЛЕНИИ

А.И. Крестелев

Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Исследуется процесс взаимодействия фронта ударной волны с частицами порошка, используемого при напылении износостойких покрытий методом взрывного напыления. Анализируются алгоритмы решения задачи при различных параметрах взрывной ударной волны. Проводится сравнительный анализ различных вариантов аппроксимации скорости ударной волны в воздухе. Методом квадратур численно решается интегральное уравнение, описывающее «увлечение» частиц порошка продуктами детонации (ПД) взрывчатого вещества. Анализируется характер изменения скорости движения частиц во фронте волны разрежения ПД.

Ключевые слова: взрывная ударная волна, продукты детонации, частицы порошка.

Взрывное напыление можно отнести к числу эффективно используемых методов обработки поверхности материалов с целью создания износостойких покрытий и упрочнения их поверхности [1, 2]. Технологические возможности этого метода весьма широки. Изменяя тип взрывчатого вещества (ВВ), его массу, а также конструктивные особенности взрывной камеры, можно добиться высокой эффективности создаваемого покрытия.

Ранее автором было получено интегральное уравнение, описывающее динамику частиц порошка во фронте взрывной ударной волны в воздухе [3]. В основе простой физической модели лежит процесс неупругого соударения молекул продуктов детонации взрывчатого вещества с частицами порошка. При этом предполагалось, что масса молекулы т значительно меньше массы частицы порошка М. Уравнение движения частицы при этом записывается в виде [3]

$$v + Au \int_{r_0}^{r} \frac{v}{x^3 v_d} dx = Au \int_{r_0}^{r} \frac{u}{x^3 v_d} dx, \qquad (1)$$

где $A = \frac{3m_0S}{4\pi M}$, r_0 – расстояние от центра заряда взрывчатого вещества до части-

цы порошка в начальный момент времени, m_0 – масса заряда взрывчатого вещества, M – масса частицы порошка, u – массовая скорость ПД, v – скорость движения частицы порошка, v_d – скорость фронта ударной волны, S – площадь поперечного сечения частицы, r – расстояние в произвольный момент времени. Если навеска порошка закреплена на поверхности заряда BB, то r_0 – это радиус самого заряда.

Для определения массовой скорости *u*, входящей в уравнение (1), используем простую связь между скоростью и давлением продуктов детонации [4]:

Анатолий Иванович Крестелев (к.ф.-м.н., доц.), доцент.

$$u = \sqrt{\frac{2}{k+1} \cdot \frac{P}{\rho}} \quad , \tag{2}$$

где k – показатель изоэнтропы воздуха, $k \approx 1,2 \div 1,3$, P – давление в волне разрежения продуктов детонации, ρ – плотность продуктов детонации. Давление P исследовалось в работе [5] и было получено соотношение

$$P = \alpha P_{H} \left(\frac{r}{r_{0}}\right)^{-9}, P_{K} \leq P \leq P_{H};$$

$$P = \beta P_{K} \left(\frac{r}{r_{0}}\right)^{-3k}, P \leq P_{K},$$
(3)

где $\alpha = 0,43$, $\beta = 6,9$, P_h – давление в плоскости Чапмена – Жуге, P_k – давление в точке сопряжения [5]. Соотношение (3) записано для сферического заряда взрывчатого вещества. Существует аналогичное соотношение и для цилиндрического заряда BB [5].

Аналитическое соотношение для скорости фронта ударной волны v_d было получено на основе экспериментальных данных об изменении скорости воздушной ударной волны в зависимости от расстояния до центра заряда BB [4]. Так как это очень высокоскоростной процесс, то скорость определялась не в точке, а в некотором интервале. Экспериментальная зависимость аппроксимировалась линейной функцией. Для этого использовалась процедура линейной регрессии в системе MathCAD. Расчеты проводились для гексогена. В результате для скорости фронта воздушной ударной волны было получено соотношение

$$v_d(r) = a + br, \tag{4}$$

где $a = 9.5 \cdot 10^3 \, \text{м/c}$, $b = -5.5 \cdot 10^4 \, \text{c}^{-1}$.

На рис. 1 приведено «облако» исходных точек и результат линейной регрессии v(r).

Как показывает анализ, более точное совпадение исходных экспериментальных данных и их аналитической аппроксимации наблюдается при нелинейной аппроксимации. В MathCAD существует процедура линейной регрессии общего вида, когда аппроксимирующая функция задается комбинацией нелинейных функций. В результате применения этой процедуры была определена зависимость скорости фронта ударной волны от расстояния:

$$v_d(r) = v0 + ae^{-100 \cdot r} + br,$$
 (5)

где a = 11860 m/c, $b = 15610 c^{-1}$, v0 = 7310 m/c.

На рис. 1 кроме линейной аппроксимации показана также функция V(r), отображающая зависимость (5) и являющаяся результатом линейной регрессии общего вида.

Сравнительный анализ линейной и нелинейной аппроксимации скорости волны показывает, что нелинейная аппроксимация более точно отображает экспериментальную зависимость. Однако, как следует из уравнения (1), характер изменения скорости фронта ударной волны влияет на окончательный результат значительно меньше, чем, например, массовая скорость и плотность продуктов детонации. Поэтому дальнейшие расчеты проводились с линейной зависимостью скорости фронта ударной волны от расстояния.



Рис. 1. Линейная и нелинейная аппроксимации зависимости скорости ударной волны от расстояния: 1 – экспериментальные данные; 2 – линейная аппроксимация экспериментальных данных; 3 – нелинейная аппроксимация экспериментальных данных

На результат решения уравнения (1) существенно влияет массовая скорость *и* продуктов детонации, так как в рамках рассматриваемой модели именно продукты детонации «увлекают» частицы порошка. На начальном этапе расширения плотность продуктов детонации даже выше, чем плотность исходного взрывчатого вещества. Существует оценочное соотношение

$$\rho = \rho_0(\frac{k+1}{k}), \tag{6}$$

где ρ_0 – начальная плотность BB, k – показатель изоэнтропы, который для зоны химической реакции при взрыве равен 3. Если, например, плотность гексогена $\rho_0 = 1.6 \cdot 10^3 \kappa c/m^3$, то начальная плотность продуктов детонации гексогена будет $\rho = 2.1 \cdot 10^3 \kappa c/m^3$. Таким образом, порошковая насадка на заряде взрывчатого вещества оказывается под воздействием газовой струи с плотностью, сравнимой с плотностью твердого тела или жидкости и движущейся с массовой скоростью ~ 2000 ÷ 3000m/c.

При расширении продуктов детонации в газовой среде их плотность с учетом сохранения массы будет уменьшаться ~ $1/r^3$ для сферического заряда ВВ. Тогда с учетом соотношений (2), (3) массовая скорость продуктов детонации запишется в виде

$$u(r) = B1r^{-3}, P_k \le P \le P_h u(r) = B2r^{\frac{3-3k}{2}}, P \le P_k,$$
 (7)

130

где $B1 = (\frac{2\pi\alpha P_H}{3m_0 r_0^{-9}})^{0.5}, \qquad B2 = (\frac{8\pi\beta P_k}{3m_0 r_0^{-3\cdot k}(k+1)})^{0.5}.$

Численное решение уравнения (1) производилось для частиц порошка бора размером 5 мкм, в качестве взрывчатого вещества выбирался сферический заряд гексогена радиусом 2 см. Насадка распыляемого порошка располагалась непосредственно на поверхности заряда ВВ.

Уравнение (1) – это интегральное уравнение Вольтерра второго рода. Запишем его в стандартной форме:

$$v(r) - \int_{r_0}^r K(r, x) v(x) dx = f(r),$$
(8)

где ядро интегрального уравнения K(r,x) определяется соотношением

$$K(r,x) = -\frac{Au(x)}{r^3(a+bx)}.$$
(9)

При определении ядра уравнения K(r,x) использовалась линейная аппроксимация скорости фронта ударной волны. Функция f(r) зависит от массовой скорости продуктов детонации, скорости распространения воздушной ударной волны и определяется соотношением

$$f(r) = Au(r) \int_{r_0}^{r} \frac{u(x)dx}{x^3(a+bx)}.$$
 (10)

Интегральное уравнение (8) решалось методом квадратур [6]. Для определения значений искомой функции в узловых точках записывается линейное алгебраическое уравнение:

$$V_{0} = f(s_{0});$$

$$V_{k} - h \sum_{j=0}^{k} A_{kj} K(s_{k}, s_{j}) V_{j} = f(s_{k}); k = 1....n,$$
(11)

где n – число отрезков разбиения области определения, s_k – узловые точки разбиения области определения, h – шаг разбиения. Так как выбиралась квадратурная формула трапеции, то коэффициенты A_{kj} определяются простыми соотношениями $A_{k0} = A_{kk} = 0.5$, $A_{kj} = 1$. Если учесть определение функции f(r) и то, что $s_0 = r_0$, то $V_0 = 0$. Это естественно, так как предполагается, что в начальный момент времени частицы порошка покоятся.

Решение системы алгебраических уравнений для скорости в узловых точках в общем виде можно записать:

$$V_{k} = \frac{f(s_{k}) + h \sum_{j=1}^{k-1} A_{kj} K(s_{k}, s_{j}) V_{j}}{1 - h \cdot A_{kk} K(s_{k}, s_{k})} \qquad k = 1....n .$$
(12)

Соотношение (12) определяет значение скорости в узловых точках, однако, согласно [6], можно записать приближенное решение в виде непрерывной функ-

ции от расстояния r, при этом точка r располагается в интервале между ближайшими узлами $S_k \leq r \leq S_{k+1}$:

$$v(r) = \frac{f(r) + h \sum_{j=0}^{k} A_{kj} K(r, s_j) V_j + 0.5(r - s_k) K(r, s_k) V_k}{1 - 0.5(r - s_k) K(r, r)} .$$
(13)

Результаты численного решения уравнения (1) представлены на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость скорости движения частиц порошка от расстояния

Как видно из рисунка, скорость частицы очень быстро растет в начале процесса расширения продуктов детонации в окружающую среду. Это объясняется очень высокой начальной плотностью продуктов детонации и высокой их массовой скоростью. То есть частицы практически «увлекаются» разлетающимися продуктами детонации. Начальная стадия процесса развивается за время ~ $10^{-7}c$. Далее, как видно из графика, процесс замедляется по мере уменьшения плотности и массовой скорости ПД и выходит на линейную зависимость скорости от расстояния. Характерно, что уже на расстоянии ~ $1,5 \cdot r_0$ скорость движения частиц порошка достигает массовой скорости продуктов детонации. Масса частиц порошка значительно больше массы молекул ПД, и они более инертны. Следовательно, начнется обратный процесс, когда движущиеся с большей скоростью частицы порошка будут взаимодействовать с молекулами ПД, и через некоторое время рост скорости прекратится. Однако этот процесс в рамках рассматриваемой модели описать нельзя, так как предполагалось, что скорость движения молекул продуктов детонации больше скорости частиц порошка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Валюженич М.К., Кривченко А.Л., Штеренберг А.М. Модификация поверхности титановых сплавов взрывоплазменным напылением // Деформация и разрушение. 2008. Вып. 5. С. 44–47.
- Крестелев А.И., Валюженич М.К., Довбня Л.А. Использование взрывных ударных волн для нанесения покрытий на поверхности металлов // Физика прочности и пластичности материалов: Сб. тезисов XVII Междунар. конф. – Самара: СамГТУ, 2009. – С. 239-240.

- 3. *Крестелев А.И.* Моделирование процесса увлечения частиц порошка взрывными ударными волнами // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физикоматематические науки. 2014. № 2(35). С. 125–129.
- 4. Физика взрыва: Т. 1 / Под редакцией Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2004. 823 с.
- 5. *Крестелев А.И.* Термодинамический анализ взаимодействия взрывных ударных волн с поверхностью материалов // Известия СНЦ РАН. 2011. Т. 13. № 6. С. 72–76.
- 6. Арушанян И.О. Численное решение интегральных уравнений методом квадратур. М.: МГУ, 2012. 71 с.

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2015 г.

THE DYNAMICS OF THE POWDER PARTICLES IN AN EXPLOSIVE PLATING

A.I. Krestelev

Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper considers the interaction of a shock wave front with the powder particles used for the deposition of wear resistant coatings by the method of explosive spraying. Analyzed the algorithms for solving the problem in different settings explosive shock wave. Comparative analysis of various options for the approximation of the velocity of the shock wave in the air is done. By the method of quadratures numerically solved the integral equation describing the " entrainment" of the powder particles of the products of detonation (PD) explosives. The nature of changes in the velocity of the particles in the wave front of the rarefaction PD is examined.

Keywords: explosive shock wave, detonation products, the powder particles.

Anatoly I. Krestelev (Ph.D. (Phys. & Math.)), Associate Professor.