

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНОГО НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2017 А.И. Крестелев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 21.02.2017

В работе рассматривается процесс взаимодействия продуктов детонации взрывчатого вещества с частицами порошка, распыляемого при взрывном нанесении износостойких покрытий на металлы и сплавы. Качество наносимых покрытий зависит от энергетики частиц порошка и их агрегатного состояния. Численными методами рассчитывается количество теплоты, полученное частицами при этом взаимодействии. Анализируется возможность плавления частиц порошка при их движении во фронте детонационной волны разрежения и химических реакций материала частиц с продуктами детонации взрывчатого вещества.

*Ключевые слова:* взрывные ударные волны, продукты детонации, частицы порошка

В настоящее время широкое применение получили технологии, связанные с воздействием на поверхность материалов потоков частиц, обладающих очень высокой энергией. При этом, как правило, материал оказывается в экстремальных условиях высоких давлений и температур. К числу таких воздействий можно отнести действие ударной волны, возникающей при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ). Продукты детонации взрывчатого вещества, расширяющиеся в окружающее пространство, имеют очень высокую начальную плотность, массовую скорость и температуру и эти факторы используются для метания массивных тел [1] или распылений порошковых материалов с целью создания износостойких покрытий на поверхностях металлов и сплавов [2,3].

В настоящей работе рассматривается взаимодействие продуктов детонации взрывчатого вещества с частицами порошка, используемого для взрывного напыления покрытий. Как показывает анализ [2], структура и характеристики упрочняющего покрытия во многом определяются агрегатным состоянием оседающих на поверхность частиц порошка, а так же их динамическими характеристиками. То есть, важно в твердом или расплавленном состоянии частица попадает на поверхность материала, и с какой скоростью она двигалась. Анализ динамических характеристик частиц порошка, движущихся под действием продуктов детонации (ПД) взрывной ударной волны был проведен автором в работе [4]. Было показано, что скорость частиц порошка очень быстро растет и сравнивается с массовой скоростью продуктов дето-

нации. То есть процесс носит характер «увлечения» частиц продуктами детонации. В работе использовалась простая физическая модель взаимодействия продуктов детонации с частицами порошка. В основе, которой лежит неупругое соударение молекул ПД с частицами порошка. Если принять, что энергетические потери в процессе неупругого соударения переходят во внутреннюю тепловую энергию частицы порошка, то можно определить количество теплоты, которое получила частица в процессе «бомбардировки» ее молекулами продуктов детонации.

Законы сохранения энергии с учетом тепловых потерь при неупругом соударении и импульса можно записать в виде:

$$Q_n = \frac{mu_n^2}{2} + \frac{Mv_n^2}{2} - \frac{(M + nm)v_{n+1}^2}{2};$$

$$mu_n + (M + nm)v_n = [M + (n + 1)m]v_{n+1}, \quad (1)$$

$$n = 0, \dots, N,$$

где  $m$  – масса молекул продуктов детонации;  $M$  – масса частицы порошка;  $u_n$  – массовая скорость продуктов детонации  $v_n$  – скорость частицы порошка после  $n$ -го соударения;  $Q_n$  – количество теплоты, выделившееся в процессе  $n$ -го соударения.

В соотношении (1) учитывается, что массовая скорость продуктов детонации уменьшается при расширении ПД в окружающую среду для сферического заряда ВВ по закону [4]:

$$u(r) = B1 r^{-3}, \quad (2)$$

где  $B1 = 0,015$ ,  $r$  – расстояние от центра сферического заряда ВВ.

Совместное решение уравнений системы (1) позволяет определить количество теплоты  $Q_n$ :

$$Q_n = \frac{u_n^2}{2} \left[ m - \frac{m^2}{M + (n + 1)m} \right] +$$

*Крестелев Анатолий Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и физики нефтегазового производства.  
E-mail: a.krestelev@yandex.ru*

$$+ \frac{v_n^2}{2} \left[ (M + nm) - \frac{(M + nm)^2}{M + (n + 1)m} \right] - \frac{m(M + nm)v_n u_n}{M + (n + 1)m} \quad (3)$$

Соотношение (3) определяет лишь количество теплоты, которое было получено частицей порошка в результате однократного соударения с молекулой продуктов детонации. Однако интерес представляет полная тепловая энергия, переданная частице в результате ее взаимодействия с детонационной волной, распространяющейся в воздухе. Для этого просуммируем все  $Q_n$ .

$$Q = \sum_{n=0}^N Q_n, \quad (4)$$

где  $N$  – суммарное количество соударений молекул ПД с частицей порошка. Величина  $Q_n$  определяется соотношением (3). Динамическая задача определения скорости движения частицы под действием потока молекул продуктов детонации была решена автором в работе [4]. График зависимости скорости частицы от расстояния представляется в виде (рис. 1).

Как видно из графика, скорость частицы очень быстро растет на первом этапе взаимодействия взрывной волны с порошковой насадкой, что обусловлено высокой плотностью продуктов детонации в начале их расширения в воздухе ( $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$ ) и высокой начальной массовой скоростью. Дальнейшее снижение темпов роста скорости частицы связано с тем, что уже через время  $\sim 10^{-7} \text{ с}$  скорость движения частицы

порошка становится соизмеримой с массовой скоростью продуктов детонации, которая достаточно быстро спадает с ростом расстояния от центра сферического заряда ВВ. Это свидетельствует о том, что на этом этапе взаимодействия частицы порошка с детонационной волной разрежения происходит «увлечение» частицы молекулами ПД.

Для сравнения динамики частиц порошка и молекул продуктов детонации, расширяющихся в окружающее пространство, используя данные работ [4,5], представим графическую зависимость массовой скорости от расстояния до центра заряда взрывчатого вещества (рис. 2). При построении зависимости  $u = u(r)$  использовался сферический заряд гексогена радиусом 2 см и массой 120 г. Как показывает анализ, основной рост скорости движения частицы порошка происходит при давлении во фронте волны разрежения больше давления сопряжения [5], поэтому используется только скорость, определяемая соотношением (2).

Для расчета количества теплоты (3), (4) были использованы данные о скорости движения частицы, полученные в работе [4], а массовая скорость продуктов детонации определялась соотношением (2). Суммирование в соотношении (4) производилось численными методами в системе MathCAD. Зависимость количества теплоты, полученного частицей при ее движении во фронте детонационной волны разрежения, от количества соударений представлена на графике (рис. 2) в двойном логарифмическом масштабе.

В логарифмическом масштабе зависимость количества теплоты, поглощенного частицей порошка, от числа столкновений практически линейная. При количестве столкновений  $\sim 10^{12}$

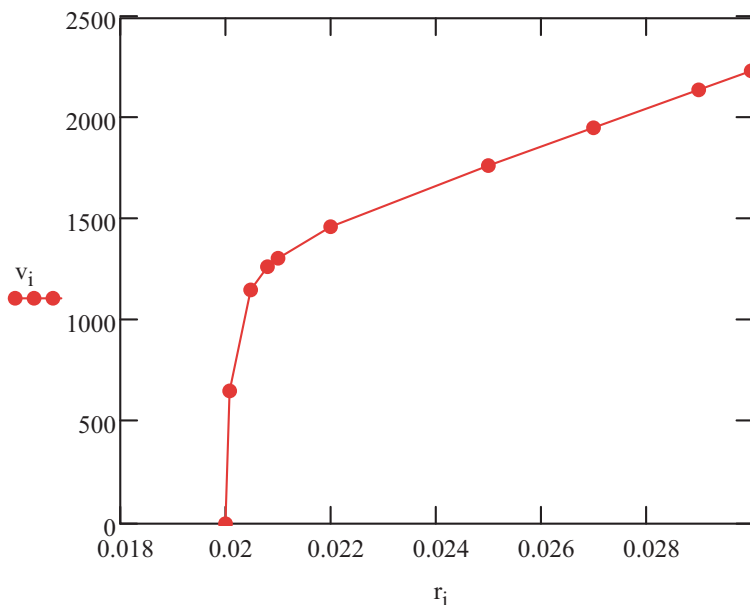


Рис. 1. Зависимость скорости движения частиц порошка от расстояния

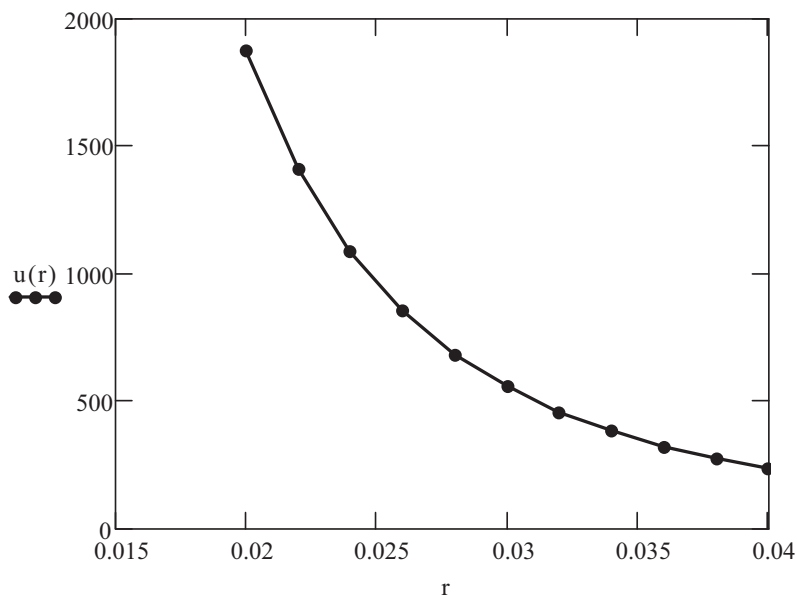


Рис. 2. Зависимость массовой скорости ПД от расстояния

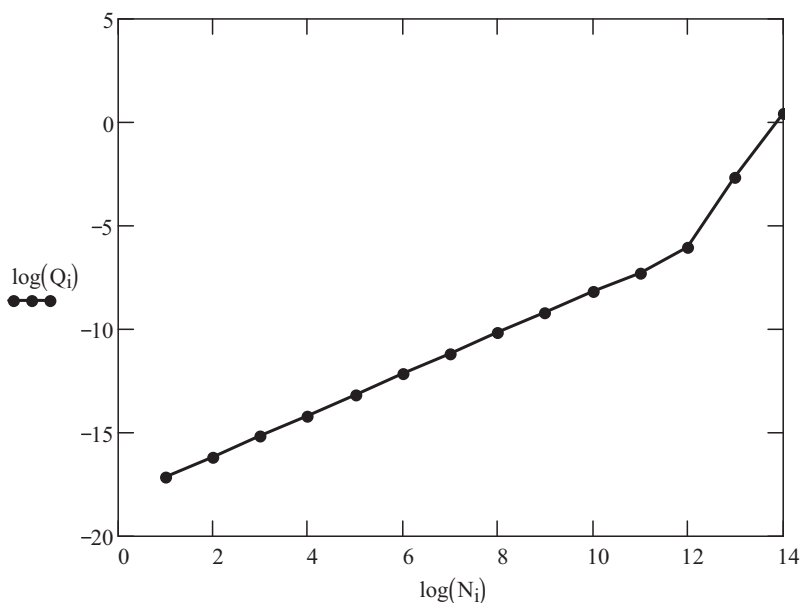


Рис. 3. Зависимость количества теплоты от числа соударений частицы с молекулами ПД

наблюдается изменение характера зависимости логарифма  $Q$  от логарифма  $N$ . Это свидетельствует об увеличении скорости роста поглощенной теплоты.

Взаимодействие частицы порошка с молекулами продуктов детонации взрывчатого вещества приводит к ее нагреванию. Важно знать до какой температуры может разогреться частица и достаточно ли теплоты, полученной при соударении для ее плавления. Агрегатное состояние частицы порошка имеет существенное значение для ее дальнейшего взаимодействия с обрабатываемой поверхностью металла или сплава. Поэтому оценим изменение температуры частицы порошка при ее движении во фронте волны разрыва продуктов детонации. Расчеты проводились для порошка бора с размером частиц 5

мкм и массой  $1,5 \cdot 10^{-15}$  кг. Изменение температуры частицы определялось соотношением:

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot M}, \quad (5)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость бора;  $M$  – масса частицы бора;  $Q$  – количество теплоты, определяемое соотношением (4). Зависимость изменения температуры частицы от количества соударений в двойном логарифмическом масштабе представлена графически на рис. 4.

Как видно из графика в логарифмическом масштабе зависимость  $\Delta T$  от числа соударений растет линейно и при  $N \sim 10^{12}$  скорость роста температуры увеличивается. Так как температура плавления бора  $\sim 2200$  К, то, как видно из графика, частица порошка может быть нагрета до температуры плавления.

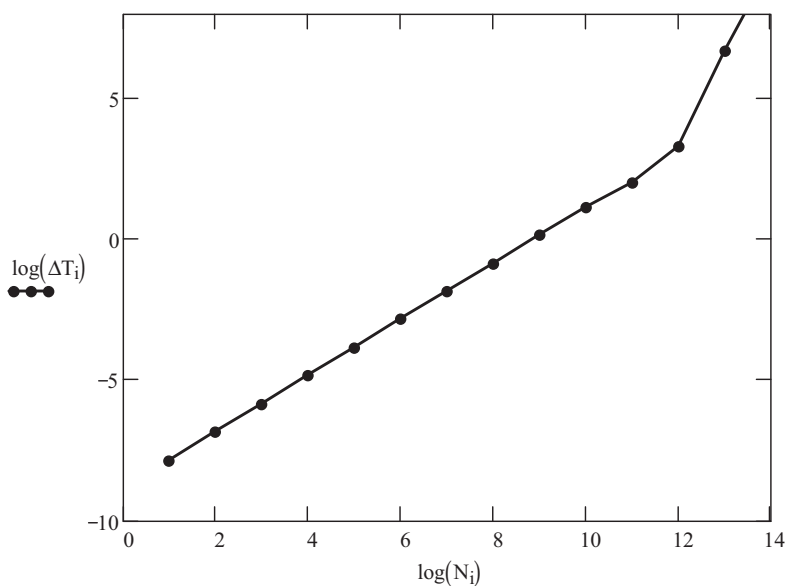


Рис. 4. Зависимость изменения температуры от числа столкновений

Если говорить конкретно о взрывном распылении порошка бора, то температура частиц бора важна еще и с точки зрения химического взаимодействия бора с продуктами детонации взрывчатого вещества. При температуре выше 1500 К бор вступает в химическую реакцию с азотом с образованием нитрида бора BN и углеродом с образованием карбида  $B_4C$ . В большинстве взрывчатых веществ эти элементы присутствуют и в результате взрывных химических превращений могут содержаться в продуктах детонации, взаимодействующих с частицами бора.

Таким образом, процесс нанесения износостойких и упрочняющих покрытий на металлы и сплавы методом взрывного напыления очень чувствителен к динамике и термодинамике частиц порошка. Изменяя характеристики взрывчатого вещества, конструктивные особенности взрывной камеры и порошковой насадки можно управлять процессом напыления и создавать покрытия необходимой структуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва: Т. 1 [под редакцией Л.П. Орленко]. М.: Физматлит, 2004. 823 с.
2. Валуженич М.К., Кривченко А.Л., Штеренберг А.М. Модификация поверхности титановых сплавов взрывоплазменным напылением // Деформация и разрушение. 2008. Вып. 5. С. 44- 47.
3. Динамика формирования детонационных покрытий / А.Ф. Беликова, А.М. Булаев, С.Н. Бурава, Ю.Н. Киселев, Э.А. Миронов // Физика и химия обработки материалов. 1989. № 4. С. 100- 106.
4. Крестелев А.И.. Моделирование процесса увлечения частиц порошка взрывными ударными волнами // Вестник СамГТУ. Серия физико-математические науки. 2014. № 2(35). С. 125- 129.
5. Крестелев А.И. Динамика частиц порошка при взрывном напылении // Вестник СамГТУ. Серия технические науки. 2015. № 2(46). С. 128- 133.

#### ENERGY TECHNOLOGY ASPECTS OF EXPLOSIVE SPRAYING WEAR-RESISTANT COATINGS

© 2017 A.I. Krestelev

Samara State Technical University

The paper deals with the interaction of the detonation products of powder particles sprayed during explosive spraying wear-resistant coatings on metals and alloys. The quality of the applied coating depends on the energy of the powder particles and their state of aggregation. Calculated by numerical methods the amount of heat produced in this interaction particles. Analyzes the possibility of melting of powder particles during their movement in the front of the detonation wave rarefaction and chemical reactions of the material particles with the detonation products of explosives.

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

Anatoly Krestelev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the General Physics and Physics of Oil and Gas Production Department.  
E-mail: a.krestelev@yandex.ru