

01; 03

© 1993

ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ,
ПОЛУЧАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКА

В.Н. Г а в р и л о в, Е.А. Л и т в и н о в

Размеры металлических частиц, получаемых методом ЭВП, и их свойства зависят от следующих параметров: начальный диаметр проволоочки, противодавление окружающей среды и плотность введенной в проводник энергии [1]. В той же работе [1] экспериментально было показано наличие двух фракций в полученном порошке, более крупной (характерный размер порядка 1 мкм) и более мелкой (размер 0.01–0.1 мкм). Высказывалось предположение, что неиспарившаяся часть проволоочки при разлете дробится, давая в итоге крупную фракцию порошка, а испарившаяся при быстром расширении конденсируется в мелкую фракцию.

В данной работе мы хотим показать, что при больших энергозатратах в проволоочку $e > 2e_s$ (e_s – энергия сублимации) численное моделирование дает качественное совпадение предсказываемых размеров частиц (в предположении конденсации пара на остаточных ионах) с экспериментом. Это послужит дополнительным доказательством вышеприведенного предположения.

Нами была выбрана следующая физическая модель. Полагаем, что все исходное вещество проволоочки испарилось, и ионизованный пар цилиндрически симметрично расширяется в окружающую среду (аргон). Считаем, что энерговыделение произошло равномерно по объему проводника. Вязкостью и теплопроводностью паров пренебрегаем. В основе нашей модели лежит совместное рассмотрение кинетики процессов эволюции заряженного и нейтрального компонентов плазмы (включая процессы ионизации и рекомбинации) при расширении в инертный газ (химические реакции не учитываются).

Математическая модель, включающая систему уравнений многожидкостной гидродинамики, начальные и граничные условия, а также методы решения, подробно описана в работе [2]. Разница заключается в том, что в [2] уже в начальный момент имеется жидкая фаза в виде капель, а здесь мы предполагаем, что капли могут возникнуть только в процессе конденсации при разлете.

Быстрое охлаждение плазмы при ее расширении приводит к „закалке“ ионного состава смеси и к переохлаждению ее. При этом наличие ионов существенно увеличивает скорость процесса появления зародышей конденсированной фазы. Количество возникших зародышей жидкой фазы или центров конденсации в единице объема зависит от достигнутой степени переохлаждения, плотности паров и скорости их расширения в данный момент [3]. Как следует из наших вычислений, повторяющих [3], в общем виде (безотносительно

к геометрии расширения) два элемента объема расширяющегося пара величина максимального переохлаждения в зависимости от параметров насыщенного состояния и констант вещества определяется из трансцендентного уравнения:

$$\frac{1}{I(\theta_{max})} \frac{d(\ln(\rho))}{dt} = D \cdot \frac{q}{T} \left\{ \frac{1.5 \cdot \theta_{max}^3}{b} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\theta_{max}}{T}\right) \right) \frac{1}{\tau \left| \frac{d(\ln(\rho))}{dt} \right|} \right\}^3 \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения: ρ - плотность пара, T - температура, q - теплота испарения, D - численная константа, равная 4.253×10^{-3} , θ_{max} - степень переохлаждения пара, $\theta = (T_p - T)/T_p$, T_p - температура насыщенного при данной плотности пара, $1/\tau = 4\pi d^2 n_r \bar{u}$ - величина порядка вероятности газокинетических столкновений молекулы пара в момент насыщения, d - радиус молекулы, \bar{u} - тепловая скорость, $b = 16\pi d^3 \omega^2 / 3k^3 q^2 T$, k - постоянная Больцмана, ϵ - коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла, ω - объем в жидкости, приходящийся на одну молекулу; $I(\theta_{max}) = C \cdot (\exp(-\beta) + y \cdot \exp(-\beta_e))$ - скорость образования центров конденсации в расчете на одну молекулу. Здесь y - степень ионизации, $\beta = b/\theta^2$, $C = 2\omega n_r \bar{u} \cdot \sqrt{6/kT}$, $\beta_e = \beta \cdot (1 + 3a^3/r_e^3 - 6a^3/(d \cdot r_e^2))$, $a = (e^2/16\pi\epsilon)^{1/3}$, где e - заряд электрона, r_e определяется из уравнения $\theta = (2\epsilon\omega/kqr_e) \cdot (1 - a^3/r_e^3)$.

Поскольку центры конденсации зарождаются в течение очень короткого промежутка времени, когда переохлаждение близко к максимальной величине θ_{max} , мы полагаем его пренебрежимо малым в сравнении с характерным временем разлета продуктов ЭВП. Далее, за счет выделения тепла переохлаждение уменьшается, и появившиеся капли начинают расти. Полное число центров равно (из расчета на одну молекулу)

$$N = \int_0^{\infty} I(\theta(t')) dt' = I(\theta_{max}) \Delta t_m = 3\pi/8(\theta_{max}) \frac{\theta^3}{b} \frac{1}{\left| \frac{d(\ln(\rho))}{dt} \right|} \quad (2)$$

Δt_m - эффективная длительность максимума переохлаждения.

Как показало численное моделирование, первые зародыши жидкой фазы возникают на периферии плазменной области, затем по мере расширения фронт конденсации движется к центру взрыва и достигает его к моменту, когда диаметр облака в 20-25 раз больше начального диаметра проводника. Далее оцениваем конечный среднекубический размер частиц, исходя из полученного количества центров конденсации и общей массы взорванной проволоки.

Поскольку имеется некоторое распределение частиц по размерам, то характерный диаметр капель зависит от способа его вычисления. Экспериментаторы часто используют так называемый объемно-поверхностный диаметр. Связь между среднекубическими и объемно-поверхностными величинами для логарифмически-нормального распределения по размерам, наиболее характерного для ультрадисперсных порошков, приведена в [4]. Всюду далее будем подразумевать логарифмически-нормальное распределение и под характерным размером понимать объемно-поверхностный диаметр.

Экспериментальные данные, приведенные на рисунках и в таблице, взяты из работы [5]. На рис. 1 сплошной кривой показана расчетная зависимость характерного диаметра медных частиц от плотности введенной энергии (при давлении окружающей среды 5 атм и начальном диаметре проволоочки 0.43 мм), а точками — значения характерного диаметра частиц, полученных экспериментально в тех же условиях.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость характерного размера частиц от диаметра взрываемого проводника (давление внешнего газа 5 атм, удельный энерговклад $e/e_s = 2,1$), сплошная линия — теоретическая кривая, точки — экспериментальные данные.

В таблице даны расчеты и экспериментальные значения размеров частиц при разном давлении окружающей среды (начальный диаметр проволоочки 0.43 мм, $e/e_s = 2,4$).

Давление аргона (атм)	Размер (мкм)	
	расчет	эксперимент
1	0.176	0.089
5	0.218	0.137
10	0.226	0.198

Значительное количественное расхождение в области энерговкладов e/e_s около 2 и при больших начальных диаметрах проволоочки (больше 0.4 мкм) мы объясняем не только наличием в разлетающихся продуктах взрыва заметного количества неиспарившегося металла, но и более выраженным стратообразованием при данных условиях, что делает разлет продуктов взрыва проволоочки существенно неоднородным.

Тем не менее, предложенная модель качественно верно предсказывает размер ультрадисперсных частиц, полученных методом ЭВП, что делает ее перспективной для дальнейшего усовершенствования в плане более точного совпадения с экспериментом. В последующем она может стать эффективным инструментом в технологии получения ультрадисперсных порошков.

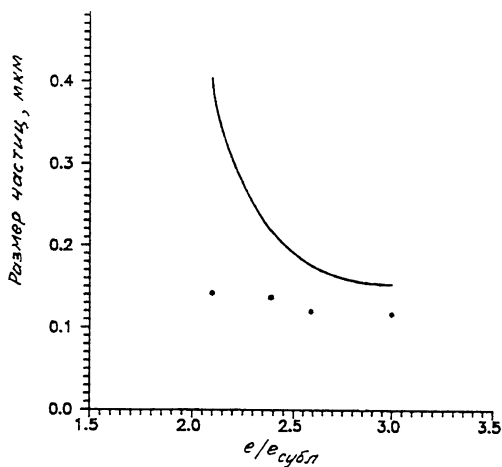


Рис. 1.

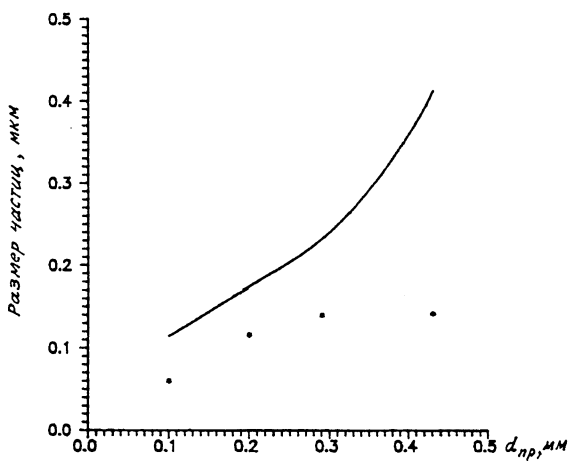


Рис. 2.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К о т о в Ю.А., Я в о р с к и й Н.А. // ФХОМ. 1978.
№ 4. С. 24-29.
- [2] В о л к о в В.П., Г а в р и л о в В.Н., Л и т в и н о в Е.А. //
Деп. ВИНТИ, № 1448. В. 92 от 20.04.92.
- [3] Р а й з е р Ю.П. // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. В. 6. С. 1741-
1750.
- [4] Р а й с т П. Аэрозоли. М.: Мир, 1987.
- [5] Л е р н е р М.И. Канд. дис., Томск, политехн. инс., 1988.

Поступило в Редакцию

23 июля 1992 г.

В окончательной Редакции

27 декабря 1992 г.