

08;12

## **Диспергирование микрокапель металлов под действием электронного пучка при динамическом удержании в электростатической ловушке**

© Ю.Л. Ермолаев, М.В. Горохов, В.М. Кожевин,  
Д.А. Явсин, С.А. Гуревич

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Ermolaev.FTI@gmail.com

Поступило в Редакцию 1 июля 2013 г.

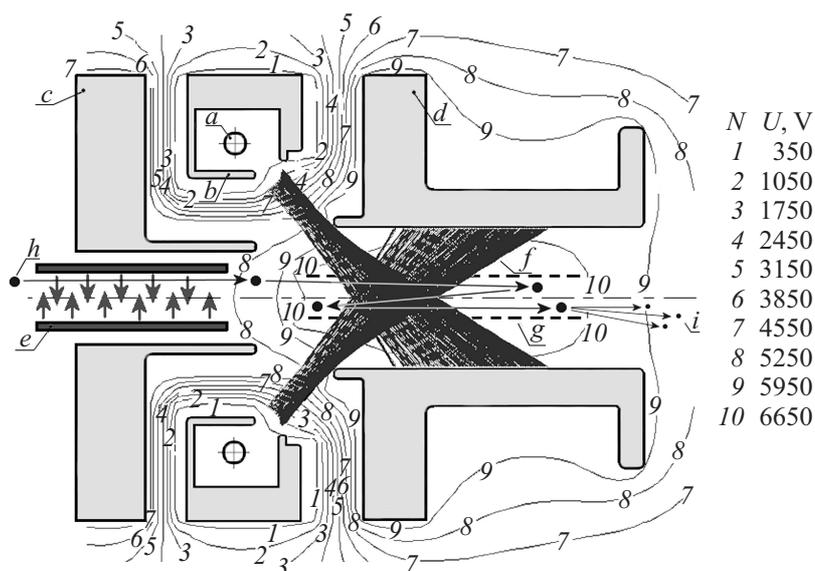
Проведены численные исследования процесса получения наночастиц чистых металлов путем плавления частиц исходного порошка инфракрасным излучением и их электрической зарядки в электронном пучке с последующим дроблением на нанокაпли. Показана возможность значительного увеличения времени пребывания капель в рабочей зоне за счет эффекта электростатической ловушки, что позволяет снизить требования к электронному пучку, расширить диапазон начальных условий и повысить стабильность процесса в целом, осуществляя каскадное дробление капель всех размеров в едином режиме.

Структуры на основе аморфных наночастиц чистых металлов, осажденных на подложках, привлекательны для использования в различных прикладных целях. Однако их применение ограничивается недостаточно высокой производительностью существующих методов получения таких наночастиц. Анализ показал, что возможно осуществление стационарного режима формирования капель расплава металла в потоке электронов [1,2]. Необходимым условием получения аморфных металлических наночастиц является дробление исходных капель до наноразмеров, которое, в свою очередь, может быть осуществлено в случае их непрерывной зарядки до предела неустойчивости Рэлея [3]. Однако такая технология предъявляет довольно жесткие требования к плотности тока, поддержанию температуры капель в пределах оптимального диапазона и обеспечению достаточной продолжительности их пребывания в пучке. Использование плотностей тока электронного пучка от  $100 \text{ mA/cm}^2$  и более может привести к искажению поля

объемным зарядом, выбросу заряженных капель из рабочей зоны, а также их перегреву, при котором резко возрастает нежелательный сброс заряда из-за термоэмиссии.

В работе предложена и численно исследована новая разновидность подобного метода, отличающаяся применением источника инфракрасного (ИК) излучения для предварительного расплавления частиц исходного порошка, а также динамическим удержанием заряжающихся капель в электростатической ловушке, образованной специально сформированным распределением потенциала, с целью их многократного прохождения через зону взаимодействия с электронным пучком для зарядки и деления.

Расчет трехмерных электростатических полей, сформированных системой электронов, осуществлялся с использованием интегрального аналога уравнения Пуассона. Для определения поля пространственного заряда пучка применялась матричная функция источника (модифицированная функция Грина). Стационарное распределение тока в электронном пучке моделировалось традиционным методом „трубок тока“ [4], причем на этапе траекторного анализа задавались типичные энергетические и угловые распределения электронов у поверхности катода в режиме ограничения тока эмиссии объемным зарядом. Затем для полученных пространственных профилей полей и тока рассчитывалась временная динамика капель металла. Численная модель процесса диспергирования включала систему самосогласованных дифференциальных уравнений, описывающих движение капель в трехмерном пространстве внутри установки под действием силы тяжести и локальных электрических полей, их нагрев ИК-источником и электронным пучком, охлаждение за счет собственного теплового излучения, плавление (с учетом скрытой теплоты фазового перехода), а также зарядовую кинетику: зарядку капли электронами пучка и ее одновременную разрядку за счет процесса термоэмиссии. В модели использовались зависящее от локальной энергии электронов кулоновское сечение взаимодействия заряженной капли с электронами пучка, полуэмпирические аппроксимации зависимости коэффициента вторичной эмиссии от эффективной энергии налетающих электронов (согласующиеся с экспериментальными данными для исследуемых металлов [5]) и модель термополевой эмиссии с поправкой Шоттки. При достижении каплей критической величины заряда Рэлея  $Q_R = 8\pi\sqrt{\epsilon_0\alpha R_0^3}$ , где  $\alpha$  — энергия поверхностного натяжения жидкого металла,  $R_0$  — радиус капли, инициировалось ее раздробление из-за



**Рис. 1.** Общая схема установки:  $a$  — катод с тороидальной эмитирующей поверхностью,  $b$  — фокусирующий электрод,  $c$  и  $d$  — аноды,  $e$  — источник ИК-излучения,  $f$  — траектории электронов пучка,  $g$  — сетка,  $h$  — микрочастица на входе в блок,  $i$  — капли после диспергирования (цифрами 1–10 обозначены эквипотенциали, номера которых  $N$  соответствуют значениям потенциала  $U$ , показанным справа сверху).

развития неустойчивости, с отделением в „дочернюю“ каплю 1% массы и 25% заряда „материнской“.

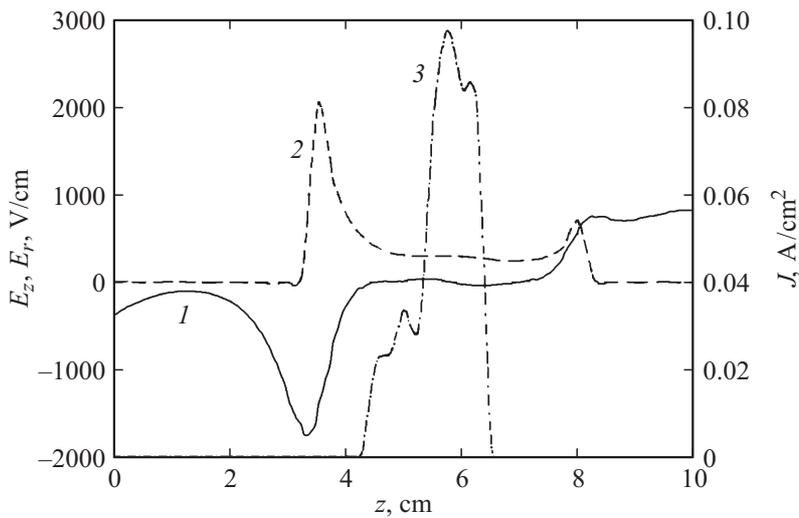
Для выполнения детального численного исследования динамики, нагрева, зарядки и диспергирования капель в условиях, характерных для проектируемой экспериментальной установки, была разработана специальная вычислительная программа Nephastus.

На рис. 1 показана условная схема, поясняющая работу блока диспергирования. Конфигурация аксиально-симметричной электронной пушки дана в разрезе вдоль продольной оси  $z$ . Схема совмещена с картиной изолиний потенциала и траекторий электронов, полученной из расчета электронно-пучковой системы. Основные размеры вакуумной зоны блока: длина 9 см, внутренние диаметры эмиттера ( $a$ ) — 6 см,

анода ( $c$ ) — 1.5 см, анода ( $d$ ) — 2.3 см, сетки ( $g$ ) — 1 см. В реальной конструкции роль эмитирующей поверхности выполняет спираль накала. Источником ИК-излучения служит спиральный нагревательный элемент, внутри которого микрочастицы движутся еще вне пучка. Основной идеей данной конструкции является использование соосных трубчатых анодов и вставной сетки; ее расположение относительно продольной оси и потенциал подбираются в ходе вычислительного и натурального эксперимента. Вдоль общей оси анодов движутся частицы порошка, расплавившиеся благодаря ИК-облучению. Выходящий из тороидального формирующего электрода конический самопересекающийся электронный пучок проходит через зазор между анодами, концентрируется вблизи оси и облучает капли, сообщая им электрический заряд и дополнительно поддерживая в расплавленном состоянии. В зоне действия пучка эффективные энергии ускоренных электронов превышают значение, при котором коэффициент вторичной эмиссии из металла  $\sigma < 1$  [5], и можно ожидать быстрой отрицательной зарядки капель. В частности, для меди это соответствует потенциалу  $\approx 2.8$  kV. Двигаясь внутри цилиндрической сетки, достаточно прозрачной для пучка, заряженные капли испытывают воздействие продольных и радиальных электрических полей, подобранных оптимальным образом. В результате они захватываются в электростатическую ловушку и совершают в ней квазипериодические движения с отражениями от концов и стенок сетки. Многократно проходя через зону воздействия электронного пучка, капли заряжаются до предельной величины  $Q_R$  и дробятся на мелкие дочерние наночастицы.

В исследованных вариантах использовалась сетка с оптимизированными размерами и расположением. Максимальная интенсивность ИК-облучателя составляла  $20$  W/cm<sup>2</sup>, потенциалы анодов 6.5 kV, сетки 7 kV, плотность тока эмиссии  $30$  mA/cm<sup>2</sup>. В процессе численной оптимизации выяснено, что такой ток обеспечивает достаточную скорость зарядки, что особенно важно для одновременного дробления как крупных, так и мелких (дочерних) капель, при этом объемный заряд еще заметно не влияет на структуру пучка. Сетка экранирует поле анода вблизи оси системы, а на ее концах наблюдаются небольшие провалы потенциала, формирующие неоднородное поле. При данных значениях потенциалов и достаточной геометрической прозрачности сетки она мало изменяет электронный пучок.

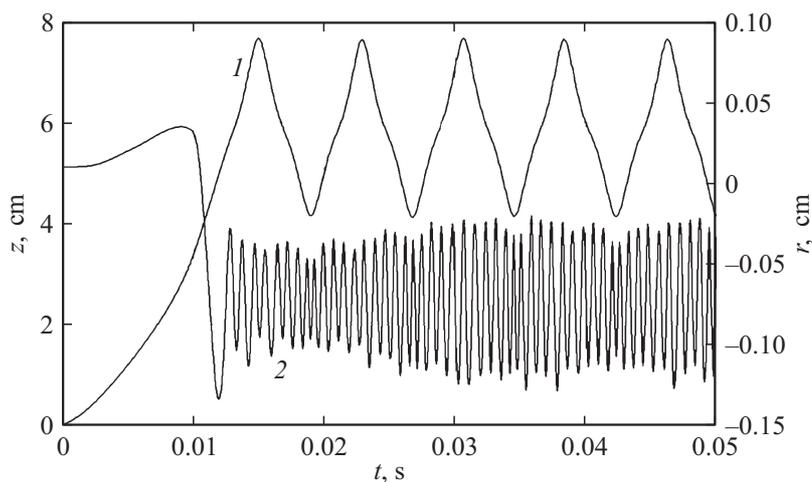
Характерные профили продольного  $E_z(z, r = 0)$  и радиального  $E_r(z, r = 0)$  электрических полей внутри сетки, вблизи оси системы,



**Рис. 2.** Пространственные распределения: 1 — продольного  $E_z(z, r = 0)$  и 2 — радиального  $E_r(z, r = 0)$  электрического поля, 3 — плотности тока пучка  $J(z, r = 0)$ , на оси симметрии системы.

а также плотности тока пучка  $J(z, r = 0)$  приведены на рис. 2. При движении отрицательно заряженных капель (на рис. 1 слева направо, в реальной установке — сверху вниз) участки с отрицательным продольным полем являются для них ускоряющими, а с положительным — тормозящими; при обратном движении — наоборот. Аналогично положительное радиальное поле, созданное сеткой во всей рабочей области (рис. 2), обеспечивает эффективное ограничение движения частиц в поперечном направлении. Эта конструкция и реализует идею электростатической ловушки. Зарядка капель происходит при прохождении ими через область электронного пучка, которую можно определить из его продольного профиля на рис. 2.

Расчеты для широкого диапазона начальных размеров, температур и скоростей частиц с учетом разброса их начальных отклонений от оси системы показали, что подобная ловушка может захватить одновременно различные типы капель, обеспечивая их колебательное движение в продольном и радиальном направлениях, многократную



**Рис. 3.** Изменение во времени координат капли: 1 — продольной  $z(t)$ , 2 — поперечной  $r(t)$ .

зарядку и дробление. Это иллюстрирует рис. 3, на котором показаны результаты одного из вариантов расчета, в котором брались частицы порошка меди с начальным диаметром  $2\ \mu\text{m}$ , влетающие в рабочую область со скоростью  $100\ \text{cm/s}$  при температуре  $1600\ \text{K}$ . На рис. 3 показано изменение во времени продольной  $z$  и поперечной  $r$  координат капли. Видно, что в продольном направлении за время наблюдения капля совершает несколько колебаний вперед-назад между участками тормозящего поля (ср. с рис. 2), при этом каждый раз пересекает область воздействия пучка. В радиальном же направлении капля совершает множество быстрых колебаний внутри сетки, вблизи ее границы, каждый раз отбрасываясь запирающим полем. При этом происходит эффективная зарядка и дробление капли.

Аналогичные результаты получены для порошков серебра, никеля и платины, для частиц с начальными размерами  $1\text{--}20\ \mu\text{m}$ , в широком диапазоне продольных скоростей, соответствующих условиям экспериментов. Удержание капли в ловушке проверялось до относительно больших времен:  $0.2\text{--}1\ \text{s}$ , при этом в зависимости от начальных условий наблюдалось образование из одной исходной до  $110\text{--}1245$  дочерних капель в секунду. Моделировалось также каскадное диспергирование:

полученная после первого деления микрокапля диаметром  $0.34 \mu\text{m}$  оставалась в ловушке, продолжала заряжаться и повторно делилась до размеров  $5.8 \text{ nm}$  с частотой образования порядка 240 нанокпель в секунду.

Таким образом, результаты детального численного моделирования показали, во-первых, перспективность применения в составе рассматриваемой технологии источника ИК-нагрева, позволяющего выбирать параметры электронного пучка исходя главным образом из требований эффективной зарядки, а не плавления частиц, и, во-вторых, возможность значительного увеличения времени пребывания капель в рабочей зоне за счет их захвата в электростатическую ловушку, образованную неоднородными полями у сетки, что позволяет расширить диапазон начальных условий для частиц (по сорту вещества, размеру, входной скорости) и заметно повысить стабильность всего процесса диспергирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № 16.513.11.3137.

## Список литературы

- [1] *Jaworek A.* // Powder Technology. 2007. V. 176. P. 18–35.
- [2] *Горохов М.В., Кожевин В.М., Явсин Д.А., Гуревич С.А.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 9. С. 46–51.
- [3] *Горохов М.В., Кожевин В.М., Явсин Д.А., Анкудинов А.В., Ситникова А.А., Гуревич С.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 6. С. 135–140.
- [4] *Трегубов В.Ф.* // Изв. ЛЭТИ. 1982. В. 315. С. 34–41.
- [5] *Бронштейн И.М., Фрайман Б.С.* Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 407 с.