

Влияние температуры плавления материала проводника на дисперсность продуктов электрического взрыва

А. П. Ильин, Д. В. Тихонов, Л. О. Толбанова

Экспериментально установлена зависимость дисперсности нанопорошков, полученных с помощью электрического взрыва проводников в аргоне, от температуры плавления материала проводника. С увеличением температуры плавления проводника дисперсность нанопорошков возрастает.

Введение

Процессу формирования наночастиц — конечных продуктов электрического взрыва проводников (ЭВП) предшествуют ряд стадий. Прохождение мощного импульса электрического тока ($5 \cdot 10^5$ А) за 1 – 3 мкс приводит к разрушению проводника на капли перегретой жидкости, пар и плазму [1]. В процессе разлета продуктов взрыва происходит их охлаждение: релаксационные процессы в плазме, конденсация пара на центрах в газовой фазе и на жидких каплях. Именно на этой стадии и формируются конечные продукты ЭВП. Существенную роль при этом играют процессы коалесценции, слияния и спекания. Наиболее интенсивный рост частиц происходит при их слиянии в жидкой фазе, и более длительное время нахождения в жидкофазном состоянии будет приводить к образованию более крупных частиц. Чем ниже температура плавления материала проводника, тем дольше он будет находиться в жидкофазном состоянии. Необходимо также учесть, что охлаждение продуктов ЭВП происходит по экспоненте. Если средняя скорость охлаждения составляет более 10^9 К/с, то реальная скорость охлаждения ниже $5 \cdot 10^3$ К не превышает $1 \cdot 10^3$ К/с.

Цель настоящей работы — экспериментальное установление корреляции между дисперсностью продуктов ЭВП и величинами температур плавления материалов проводников.

Методика эксперимента

Порошки изготавливали с помощью электрического взрыва проводников на опытно-промышленной установке УДП-4Г (рис. 1) в среде аргона при избыточном давлении $1,5 \cdot 10^5$ Па. Установка снабжена механизмом автоматической подачи проволоки в межэлектродный промежуток. В качестве взрывааемых проводников использовали проволоку ряда металлов диаметром 0,3 мм (Cu, Ni, Sn (61 масс.%) — Pb, Mo, W). Размер и форму частиц определяли с помощью растрового микроскопа JSM-840 (фирма Jeol, Япония). Площадь удельной поверхности ($S_{уд}$) и

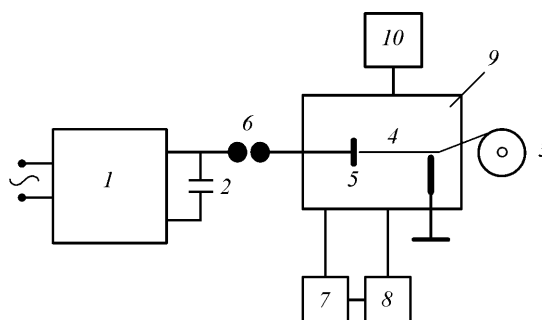


Рис.1. Структурная схема опытно-промышленной установки УДП-4Г: 1 — источник питания; 2 — накопитель энергии; 3 — механизм подачи проволоки; 4 — взрываемый отрезок проволоки; 5 — высоковольтный электрод; 6 — коммутатор; 7 — накопитель нанопорошка; 8 — вентилятор; 9 — взрывная камера; 10 — система газового снабжения.

среднеповерхностный диаметр частиц (\bar{a}_s) определяли с помощью низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ).

Взрываема проволока с помощью механизма подачи 3 непрерывно движется во взрывную камеру 9. В это время происходит зарядка емкостного накопителя 2 от источника питания 1. При достижении проволокой минимального зазора происходит взрыв отрезка проволоки 4. Образующийся аэрозоль с помощью вентилятора 8 поступает в накопитель 7, где нанопорошок отделяется от аргона. Рабочее напряжение, подаваемое на проводник, регулируется с помощью коммутатора 6. Частота взрывов составляет около 1 Гц. Производительность установки для алюминия достигает 50 г/ч, а для вольфрама — 300 г/ч. Для других металлов производительность установки УДП-4Г лежит в пределах 50–300 г/ч.

Результаты экспериментов

Согласно экспериментальным данным ЭВП может сопровождаться следующим за взрывом процессом диспергирования проводника и последующим дугowym разрядом (рис. 2б). При этом, как правило, дисперсность продуктов возрастает, поэтому в работе подбирали электрические параметры, при которых не происходил пробой и дуговой разряд по продуктам ЭВП (рис. 2а).

В табл. 1 приведены электрические параметры ЭВП и характеристики полученных нанопорошков: температура плавления ($T_{пл}$, °С), введенная в проводник энергия (e/e_c , отн.ед.), энергия дуговой стадии, отнесенная к энергии сублимации (e_d/e_s , отн.ед.), площадь удельной поверхности нанопорошка ($S_{уд}$, м²/г), среднеповерхностный диаметр частиц (\bar{a}_s , мкм), энергозатраты на получение 1 м² нанопорошка при ЭВП (E , Дж/м²), рентгеновская плотность материала проволоки (ρ , г/см³). При этом были выбраны проводники с различными температурами плавления. Процесс взрыва проводников протекал с бесконечной паузой тока, то есть при отсутствии или с малой по энергии дуговой стадией.

На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны энергозатраты на образование 1 м² поверхности нанопорошка при ЭВП.

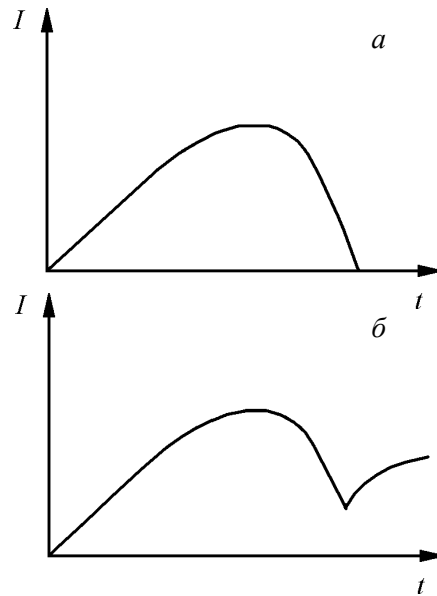


Рис. 2. Изменение электрического тока во времени при электрическом взрыве проводника: а — с бесконечной паузой тока (согласованный взрыв); б — взрыв с переходом в режим дугowego разряда.

Известно, что добавки (0,5–1 об.%) химически активных газов во взрывную камеру приводят к повышению дисперсности конечных продуктов ЭВП [2]. В табл.2 представлены экспериментальные результаты по влиянию добавки азота (1 об.%) в аргон на дисперсность полученных порошков и энергозатраты на получение 1 м² нанопорошка в сравнении с ЭВП в аргоне без добавок.

Электрический взрыв проводников тугоплавких металлов протекает как правило с дуговой стадией, причем развитие дуговой стадии наблюдается уже на спаде электрического тока, введенного в проводник. При этом на соотношение энергий ЭВП и дуговой стадии оказывают влияние даже небольшие изменения электрических параметров (табл. 2).

Измерения распределения частиц по диаметру проводили с использованием прибора “Mastersizer 2000”. Результаты измерений приведены на рис. 3. Согласно полученным данным более 30% частиц в порошке вольфрама (рис. 3а) и приблизительно столько же частиц в порошке молибдена (рис. 3б) имели диаметр менее 100 нм. При этом нанопорошок

Таблица 1

Электрические параметры получения нанопорошков и их характеристики

№	Состав нанопорошка	$T_{пл}$, °С	e/e_c , отн.ед.	e_d/e_s , отн.ед.	$S_{уд}$, м ² /г	\bar{a}_s , мкм	E , Дж/м ²	ρ , г/см ³
1	61% Sn – Pb	180	0,97	0,01	4,03	0,17	487	8,86
2	Cu	1089	0,92	0	4,8	0,14	1023	8,9
3	Ni	1453	1,16	0,09	7,2	0,11	1178	8,9

Таблица 2

Электрические параметры получения нанопорошков молибдена и вольфрама и их характеристики

№	Состав проводника	Газ-среда при ЭВП	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	e/e_c , отн.ед.	e_d/e_s , отн.ед.	$S_{уд}, \text{м}^2/\text{г}$	\bar{a}_s , мкм	E , Дж/м ²
1	Mo	Ar	2625	0,74	1,02	3,5	0,38	3515
2	Mo	Ar + N ₂		0,69	0,53	4,9	0,12	1720
3	W	Ar	3410	0,45	0,78	1,5	0,20	3797
4	W	Ar + N ₂		0,43	0,93	2,6	0,12	2422

молибдена имел более высокую дисперсность. Электрический взрыв молибденовых проводников, вероятно, протекал в более оптимальных для диспергирования условиях (табл.2): полученные в аргоне нанопорошки имели площадь удельной поверхности 1,5 и 3,5 м²/г, соответственно для вольфрама и молибдена.

Интерес представляло также изучение величины энергозатрат, расходуемых на повышение дисперсности нанопорошков сплава Cu–45%Ni, полученных с помощью ЭВП. Были получены 5 образцов нанопорошков путем взрыва проволочек сплава с бесконечной паузой тока в среде аргона. В табл.3 представлены величины израсходованной электрической энергии на образование 1 м² поверхности

Таблица 3

Зависимость энергозатрат на формирование 1 м² поверхности нанопорошков сплава Cu – 45 % Ni в атмосфере аргона, давление 0,15·10⁶ Па

E , Дж/м ²	1870	2160	1775	1660	1740
$S_{уд}, \text{м}^2/\text{г}$	2,9	3,2	4,7	5,7	6,3

нанопорошка сплава (E , Дж/м²) для образцов с различной площадью удельной поверхности ($S_{уд}$, м²/г).

Таким образом, энергозатраты на формирование 1 м² поверхности нанопорошков сначала возрастают, а затем снижаются. При этом методами рентгенофазового анализа и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на поверхности частиц после ЭВП обнаружен интерметаллид состава Cu_{3,8}Ni (картотека JCPDS-ICDD, карточка 09-0205).

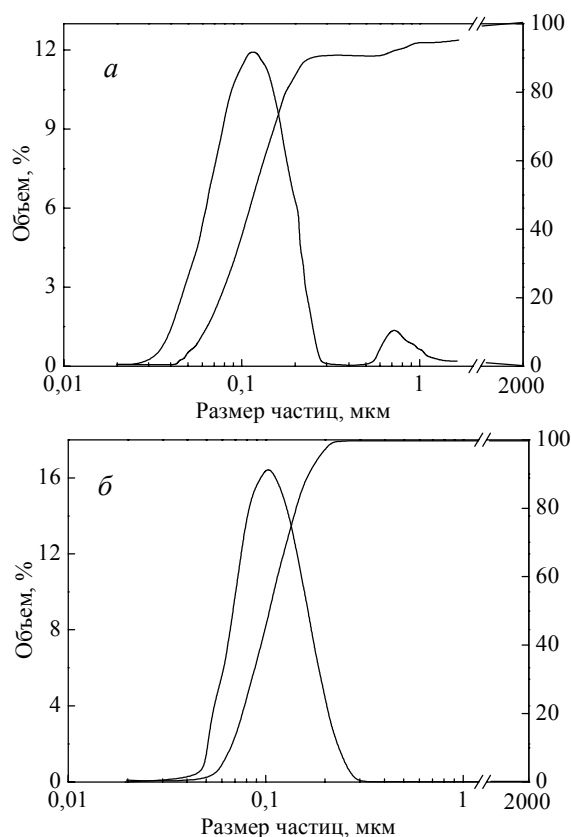


Рис.3. Распределение частиц нанопорошка вольфрама (а) и молибдена (б) в зависимости от диаметра.

Обсуждение результатов

Согласно полученным результатам (табл. 1), для металлов, имеющих близкую по величине плотность, наблюдается корреляционная зависимость между среднеповерхностным диаметром частиц (\bar{a}_s) и температурой плавления ($T_{пл}$) металла: с повышением $T_{пл}$ диаметр \bar{a}_s уменьшается. В то же время возрастают и энергозатраты на образование 1 м² поверхности нанопорошков. Таким образом, в условиях ЭВП в среде химически инертного аргона для металлов и сплавов, имеющих близкую по величине плотность, при одинаковой введенной в проводник электрической энергии и в отсутствие дуговой стадии наблюдается рост дисперсности продуктов ЭВП с увеличением температуры плавления металла. Такая закономерность может быть объяснена уменьшением времени нахождения продуктов ЭВП в жидко-капельном состоянии при их охлаждении.

В условиях ЭВП тугоплавких металлов, как правило, за взрывом следует разряд по продуктам взрыва — дуговая стадия. В табл. 2 приведены результаты изучения влияния добавок химически активного газа — азота на дисперсность продуктов ЭВП. Температура плавления молибдена ниже температуры плавления вольфрама в 1,3 раза.

Согласно экспериментальным данным, добавление азота сильнее повышает дисперсность более легкоплавкого металла — молибдена, частицы которого в среде аргона после ЭВП более длительное время остаются в жидко-капельном состоянии, в отличие от частиц вольфрама. Взаимодействие с азотом, по видимому, приводит к формированию пленки нитридов, которая препятствует слиянию частиц. Вместе с тем, при ЭВП в среде аргона энергозатраты на образование 1 м² поверхности нанопорошков молибдена и вольфрама близки по величине (табл. 2). При ЭВП в аргоне с добавкой азота энергозатраты на 1 м² для молибдена снизились в 2 раза, в то время как для вольфрама — только в 1,6 раза, что подтверждает предположение о более значительном эффекте снижения времени жидко-капельного взаимодействия частиц для более легкоплавкого металла.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что с повышением температуры плавления металла проводника дисперсность продуктов ЭВП в среде аргона возрастает при условии, если металлы имеют

близкую по величине плотность. Одновременно снижаются энергозатраты на образование 1 м² поверхности нанопорошков с увеличением температуры плавления металла проводника.

2. Добавка азота в аргон приводит к повышению дисперсности продуктов ЭВП молибденовых и вольфрамовых проводников. При этом снижаются и энергозатраты на образование 1 м² поверхности нанопорошков. Более значительный эффект в снижении энергозатрат наблюдается для металла с более низкой температурой плавления: для молибдена в 2,5 раза, а для вольфрама — лишь в 1,6 раза (табл. 2).

Литература

1. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990, 289 с.
2. Лернер М. И. Управление образованием ультрадисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников. Дисс. на соиск. уч. степ. к. т. н. Томский политехнический институт, 1988, 153 с.

Ильин Александр Петрович — Томский политехнический университет, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой. Специалист в области физики и химии нанопорошков и наноматериалов, горения нанопорошков металлов, синтеза керамических материалов сжиганием порошков металлов в воздухе

Тихонов Дмитрий Владимирович — НИИ высоких напряжений (г. Томск), кандидат технических наук, научный сотрудник. Специалист в области техники высоких напряжений, электровзрывной технологии получения нанопорошков, свойств нанопорошков.

Толбанова Людмила Олеговна — Томский политехнический университет, аспирант, НИИ высоких напряжений, младший научный сотрудник. Специалист в области физической химии металлических нанопорошков, горения нанопорошков металлов, синтеза керамических материалов сжиганием порошков металлов в воздухе.