

Характеристики и свойства электровзрывных нанопорошков молибдена и вольфрама

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

Исследован дисперсный и фазовый состав нанопорошков, полученных с помощью электрического взрыва молибденовых и вольфрамовых проводников. Установлено влияние энергии дуговой стадии разряда и состава окружающей газовой среды на характеристики нанопорошков. Изучена термическая устойчивость полученных порошков молибдена при нагревании на воздухе.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, нанопорошок, молибден, дисперсность, энергия, дуговой разряд.

The disperse and phase composition of the nanopowders, obtained by electrical explosion of molybdenum and tungsten wires is investigated. The influence of the arc stage energy of discharge and gas medium content on nanopowders characteristics is established. The thermal resistance of the obtained molybdenum powders at heating in air is studied.

Key words: wire electrical explosion, nanopowder, molybdenum, dispersion, energy, arc discharge.

Введение

Молибден и вольфрам — металлы VI группы Периодической системы, обладающие такими свойствами как тугоплавкость, высокая жаропрочность, низкий коэффициент термического расширения, коррозионная стойкость, высокими упругими свойствами и другими, находят применение для изготовления деталей и устройств, работающих в экстремальных условиях [1]. Удачное сочетание ценных физико-химических и механических свойств позволяет использовать эти металлы в качестве основных компонентов сталей и других сплавов для производства конструкционных материалов в промышленности. Молибден, вольфрам и их сплавы также применяют для изготовления обрабатывающего инструмента, деталей, работающих при высокой температуре длительное время, в том числе и в условиях радиационного воздействия. Основные области потребления молибдена и вольфрама — электротехническая, электронная, атомная промышленность, самолетостроение и ракетостроение и другие.

Традиционный метод получения молибденового и вольфрамового порошков основан на высоко-

температурном восстановлении оксидов молибдена MoO_3 и вольфрама WO_3 водородом. Как правило, этим методом практически невозможно получить нанодисперсные порошки молибдена и вольфрама. Снижение размеров частиц до нанометрового диапазона (≤ 100 нм) — один из способов придания веществу качественно новых свойств, позволяет значительно улучшить технические параметры конструкционных материалов и открывает широкие перспективы развития новой техники. Известно, что с уменьшением размеров частиц свойства порошков изменяются: повышается их химическая активность, снижается температура спекания, появляются новые свойства, не характерные для материалов в массивном (грубодисперсном) состоянии [2].

Электрический взрыв проводников (ЭВП) находит широкое применение для получения нанодисперсных порошков (НП) тугоплавких металлов и их химических соединений. В литературе практически отсутствуют сведения о получении НП молибдена и вольфрама методом ЭВП и их свойствах. Поэтому представляет интерес изучение особенностей процесса электровзрывного получения НП этих металлов и факторов, позволяющих регулировать свойства конечных продуктов.

Применимость метода ЭВП для получения НП вольфрама была показана в работах [3, 4]. Было установлено, что фазовый состав электровзрывных порошков вольфрама включает полиморфные модификации α -W и β -W, а поверхностный слой вольфрамовых частиц, образующийся при пассивировании в воздухе, состоит из оксида W_3O . Особенность НП-вольфрама, полученного методом ЭВП, — присутствие β -W. Эта фаза имеет пониженную рентгеновскую плотность ($19,1 \text{ г/см}^3$) в сравнении с α -W ($19,3 \text{ г/см}^3$). По данным работы [5] оксидный слой наиболее мелкой фракции порошка представляет собой хорошо окристаллизованный оксид W_3O , а более крупные частицы покрыты аморфным оксидным слоем, элементный состав которого близок к WO_2 .

Цель работы — исследование влияния вида газовой среды в разрядной камере и энергетических параметров электровзрыва на свойства порошков, образующихся при электрическом взрыве молибденовых и вольфрамовых проводников.

Материалы и методики экспериментов

Нанопорошки молибдена и вольфрама получали на опытно-промышленной установке УДП-4Г, принципиальная схема которой показана на рис. 1. Установка работает следующим образом. От высоковольтного источника питания 1 заряжается емкостной накопитель энергии 2. Механизм подачи проволоки 3 обеспечивает автоматическую подачу взрываемого отрезка проволоки 4 в промежуток между двумя электродами 5 и 11. При достижении проволокой пробивного промежутка до высоковольтного электрода 5 срабатывает коммутатор 6, происходит разряд емкостного накопителя на этот отрезок

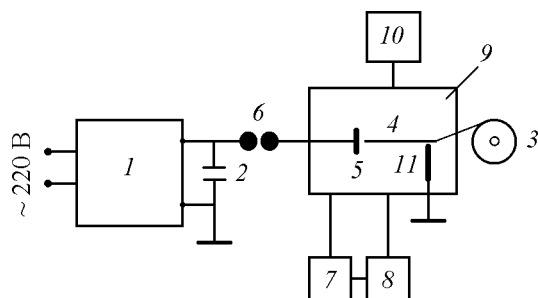


Рис. 1. Принципиальная схема установки УДП-4Г для производства нанопорошков с помощью ЭВП: 1 — источник питания; 2 — накопитель энергии; 3 — механизм подачи проволоки; 4 — взрываемый проводник; 5 — высоковольтный электрод; 6 — коммутатор; 7 — накопитель нанопорошка; 8 — вентилятор; 9 — взрывная камера; 10 — система газовой снабжения; 11 — заземленный электрод.

проволоки — и он взрывается. Образовавшийся порошок собирается в накопителе 7. Отделенный от порошка газ с помощью вентилятора 8 подается в камеру. Объем разрядной камеры 9 перед работой вакуумировали, а затем заполняли газовой атмосферой. Эти функции выполняет система газовой снабжения 10. В качестве газовой атмосферы при производстве порошков молибдена и вольфрама использовался аргон, аргон с добавкой 10 об. % азота, азот и азот с добавкой 5 об. % водорода. Давление рабочего газа в разрядной камере установки составляло $1,5 \cdot 10^5$ Па. После получения проводилось пассивирование порошков медленным окислением компонентами воздуха.

Измерение тока в контуре проводили с помощью омического шунта и осциллографа С8-17. Напряжение на взрывающемся проводнике измеряли с использованием омического делителя напряжения. Коммутацию накопителя энергии и взрываемых проводников проводили с помощью управляемого разрядника. Электрический взрыв проводников осуществляли в режиме “быстрого взрыва” с бесконечной паузой тока или с дуговой стадией. Энергетические параметры электровзрыва регулировали путем изменения зарядного напряжения, величины зарядной емкости или длины взрываемого проводника. Величина удельной энергии (e), введенной в проводник, принимала значения от 0,4 до $1,5e_c$ (e_c — энергия сублимации материала проводника), а энергии дуговой стадии (e_d) — от 0,2 до $1,7e_c$. Параметры электрического контура установки: емкость батареи конденсаторов $C = 2,32 \text{ мкФ}$; напряжение зарядки накопителя энергии $U = 15 - 30 \text{ кВ}$; индуктивность разрядного контура $L = 0,58 \text{ мГн}$.

Для получения нанопорошков взрывали молибденовые и вольфрамовые проводники диаметром 0,3 и 0,2 мм, длиной $l = 0,05 - 0,08 \text{ м}$. Содержание примесей металлов в взрываемых проводниках составляло ~0,4 масс. %

Полуколичественный фазовый анализ состава полученных порошков проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3,0 с использованием $\text{Cu } K_\alpha$ -излучения трубки. Дисперсность и форму частиц оценивали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840. Методом низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) определяли площадь удельной поверхности ($S_{уд}$) порошков. Функции распределения частиц порошка по диаметру были получены с помощью анализатора “Mastersizer 2000”. Химическую активность порошков исследовали с помощью термического анализа, включающего термогравиметрию (ТГ) и дифференциально-термический анализ (ДТА). В работе

использовали термоанализатор Q-600 (США) Научно-аналитического центра Томского политехнического университета. Анализ проводили в режиме линейного нагрева в интервале 20 – 1000 °С со скоростью нагрева 10 град./мин в атмосфере воздуха.

Молибденовые нанопорошки

Для исследования влияния энергетических характеристик ЭВП на дисперсность получаемых порошков молибденовые проводники диаметром 0,3 мм и длиной 70 мм взрывали в атмосфере аргона. Регулирование энергии, введенной в проводник до взрыва, и энергии дуговой стадии разряда осуществляли за счет изменения зарядного напряжения. Условия получения порошков молибдена и значения площади удельной поверхности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Площадь удельной поверхности электровзрывных порошков молибдена в зависимости от энергетических параметров электрического взрыва

№	U, кВ	e/e_c	e_d/e_c	$S_{уд}$, м ² /г
1	29	0,8	1,6	3,30
2	19	0,9	0,2	2,50
3	24	0,9	0,8	2,55
4	21	1,0	0,4	2,37
5	27	1,0	1,1	3,15

Изменение зарядного напряжения в условиях проводимых экспериментов от 19 до 29 кВ существенно увеличило энергию, выделяемую в дуговом разряде: $e_d/e_c = 0,2 - 1,6$. Величину удельной энергии e/e_c , введенной в проводник, в данных экспериментах меняли незначительно — от 0,8 до 1,0. Поэтому четкой зависимости дисперсности порошков от величины энергии, введенной в проводник, в исследованном диапазоне энергий не наблюдали.

На рис. 2 показана зависимость площади удельной поверхности порошков молибдена от энергии дуговой стадии разряда. Увеличение дисперсности порошков наблюдается после превышения величины энергии дуговой стадии, равной $1,0e_c$. Порошки молибдена с наибольшей площадью удельной поверхности ($S_{уд} = 3,3$ м²/г) получены в экспериментах, когда энергия дуговой стадии принимала максимальное значение — $1,6e_c$.

Полученные порошки молибдена имеют трехмодальное распределение частиц по диаметру (рис. 3), характерное для всех электровзрывных порошков, что связано с механизмом разрушения проводника и последующего охлаждения первичных продуктов ЭВП [6]. Первый максимум соответствует диаметру

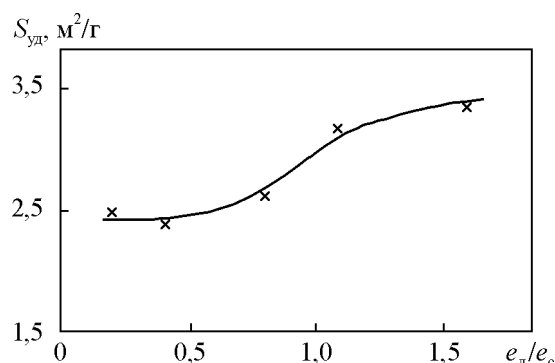


Рис. 2. Зависимость площади удельной поверхности электровзрывных порошков молибдена от энергии дуговой стадии.

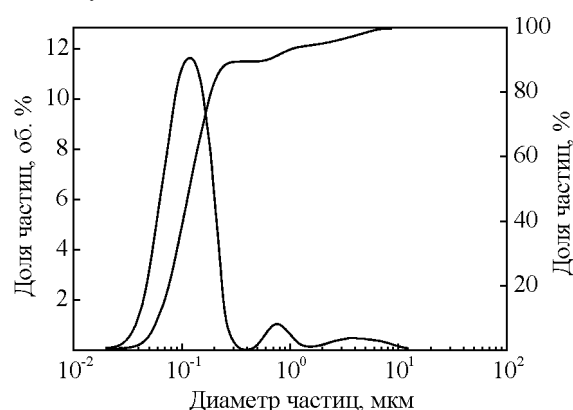


Рис. 3. Распределение по диаметру частиц порошка молибдена, полученного при ЭВП в аргоне при $e/e_c = 0,9$ и $e_d/e_c = 0,8$ (образец № 3, табл. 1)

частиц 0,11 – 0,12; второй — 0,6 – 0,9; третий — 3 – 8 мкм.

Анализ снимков, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, показал, что продукты электровзрыва молибденовых проводников представляют собой порошки, частицы которых имеют сферическую форму (рис. 4). Среди частиц микрометрового диапазона имеются частицы, диаметр которых меньше, чем 100 нм. Частицы нанометрового диапазона покрывают поверхность больших частиц и образуют индивидуальные агломераты.

Для исследования влияния состава газа на дисперсность порошков молибдена были проведены эксперименты по электрическому взрыву молибденовых проводников диаметром 0,2 мм и длиной 60 мм в следующих средах: 1) аргон, 2) аргон с добавкой 10 об. % азота, 3) азот, 4) азот с добавкой 5 об. % водорода. Условия экспериментов и значения площади удельной поверхности полученных порошков представлены в табл. 2. Давление газа во всех случаях составляло $1,5 \cdot 10^5$ Па.

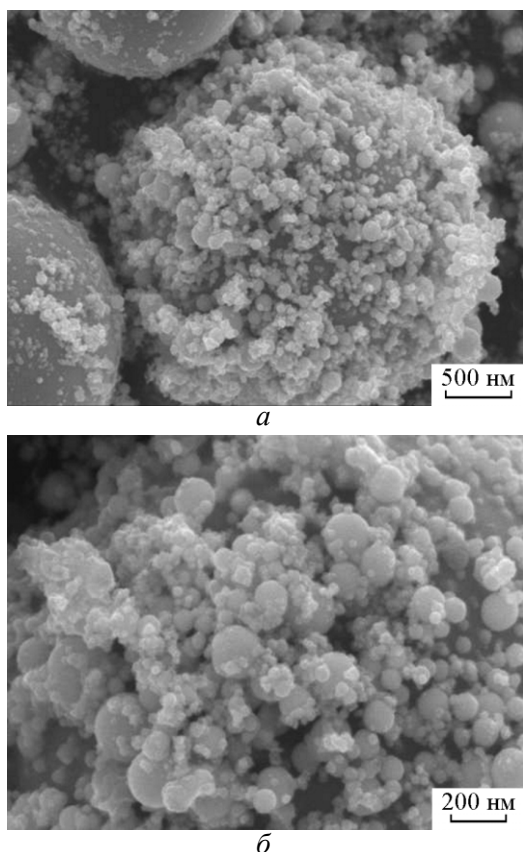


Рис. 4. Микрофотографии порошка молибдена (образец № 3, табл. 1)

Порошки молибдена с наибольшей площадью удельной поверхности (табл. 2) ($S_{уд} = 4,9 \text{ м}^2/\text{г}$) получены при использовании в качестве окружающей среды азота. Данный результат объясняется формированием в процессе разлета и охлаждения первичных продуктов взрыва химического соединения, предположительно Mo_2N , на поверхности частиц молибдена, препятствующего слиянию частиц и увеличению их размеров. На рентгенограмме продуктов взрыва не обнаружено рефлексов, соответствующих нитридным фазам, что связано с неустойчивостью нитридов молибдена в воздухе.

Таблица 2

Площадь удельной поверхности электровзрывных порошков молибдена в зависимости от электрических параметров и состава газа во взрывной камере

№	U_0 , кВ	e/e_c	e_d/e_c	Газ	$S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{г}$
1	12,4	0,6	0,6	Аг	3,4
2	12,4	0,7	0,5	Аг+10 об. % N_2	3,5
3	12,4	0,7	0,5	N_2	4,9
4	12,4	0,7	0,5	N_2 +5 об. % H_2	2,4

Таким образом, добавки химически активных газов в инертный газ, а именно, использование азота

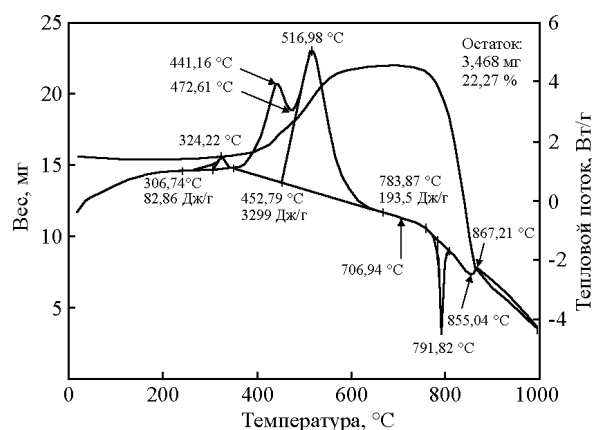


Рис. 5. Термограмма нанопорошка молибдена, полученного в атмосфере аргона при $e/e_c = 0,6$ и $e_d/e_c = 0,6$

в качестве окружающей среды при получении порошков электрическим взрывом проводников позволяют добиться повышения их дисперсности на 44 %.

По результатам проведенных экспериментов можно отметить, что уменьшение диаметра взрываваемого молибденового проводника с 0,3 до 0,2 мм при ЭВП в аргоне и давлении газа $1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ не привело к существенному изменению дисперсности (табл. 3) при значительном снижении рабочего напряжения (с 29 до 12,4 кВ). Следовательно, порошки той же дисперсности можно получить при меньших энергозатратах.

Таблица 3

Зависимость площади удельной поверхности электровзрывных порошков молибдена от диаметра взрываваемого проводника

№	d , мм	l , мм	U , кВ	e/e_c	e_d/e_c	$S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{г}$
1	0,3	70	29	0,8	1,6	3,3
2	0,2	60	12,4	0,6	0,6	3,4
3	0,2	60	15,1	0,8	1,1	3,5

Активность полученных порошков молибдена (образец № 1, табл. 2) определяли с помощью дифференциального термического анализа при нагревании в воздухе. Процесс окисления порошка протекал в две стадии с максимумами 441 и 517 °C (рис. 5) и сопровождался увеличением массы образца. Наличие двух максимумов тепловыделения связано с бимодальным распределением частиц по диаметру: сначала окисляется фракция более мелких частиц, а затем – крупная фракция. При дальнейшем нагревании, начиная с 784 °C, наблюдается эндотермический эффект и резкое уменьшение массы образца, связанные с возгонкой оксида молибдена (VI). На термограмме НП-молибдена при температуре $\sim 307 \text{ °C}$

происходит выделение тепла (~8 кДж/моль) без изменения массы образца. Такой тепловой эффект объясняется протеканием релаксационных процессов в структуре НП-молибдена.

По результатам ДТА были рассчитаны параметры активности НП-молибдена: температура начала окисления $T_{н.о.} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; степень окисленности $\alpha = 42,3\%$; максимальная скорость окисления $V_{\max} = 0,007\text{ масс.}\%/с$; удельный тепловой эффект составляет 3299 Дж/г.

Вольфрамовые нанопорошки

Хорошо известно [7, 8], что повышение энергии, введенной в проводник, приводит к увеличению дисперсности порошков, получаемых методом ЭВП. Для исследования влияния энергетических характеристик ЭВП на дисперсность НП вольфрама проводочки взрывали в атмосфере аргона при давлении газа $1,5 \cdot 10^5\text{ Па}$. Диаметр вольфрамовых проводников составлял 0,3 мм. Условия получения порошков и значения площади удельной поверхности представлены в табл. 4.

Таблица 4

Площадь удельной поверхности электровзрывных порошков вольфрама в зависимости от энергетических параметров

№	U, кВ	l, мм	e/e_c	e_d/e_c	$S_{уд}, \text{ м}^2/\text{г}$
1	28	80	0,9	0,8	1,9
2	28	60	0,8	1,3	1,8
3	28	50	0,6	1,7	1,9
4	23	50	0,7	1,0	1,7
5	20	50	0,5	0,7	1,6

На рис. 6 показаны зависимости площади удельной поверхности порошков от введенной в проводник энергии (а) и от удельной энергии дуговой стадии разряда (б). Видно, что к увеличению дисперсности приводит как повышение удельной энергии, введенной в проводник, так и повышение удельной энергии дуговой стадии. Наибольшей дисперсностью обладают образцы, полученные при значениях энергии дуговой стадии более чем $1,0e_c$ (образцы 2 и 3 табл. 4), а также образец 1, полученный при максимальном в данной серии экспериментов значении введенной в проводник энергии $e/e_c = 0,9$.

Следует отметить, что при одном и том же напряжении 28 кВ (табл. 4, образцы 1 – 3) уменьшение длины проводников с 80 до 50 мм приводит к относительно медленному уменьшению электрической энергии, введенной в проводник, и к интенсивному росту энергии дуговой стадии. При этом площадь удельной поверхности порошков остается практи-

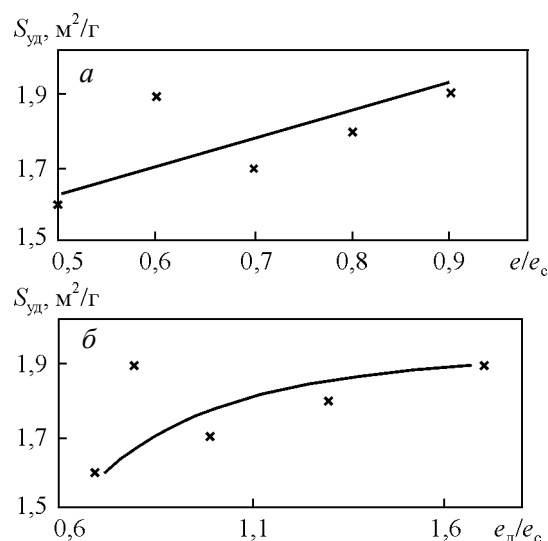


Рис. 6. Зависимость площади удельной поверхности электровзрывных порошков вольфрама от удельной энергии: а – введенной в проводник; б – дуговой стадии.

чески постоянной ($1,8 - 1,9\text{ м}^2/\text{г}$). При постоянной длине проводников (50 мм) снижение напряжения, подаваемого на взрываемые проводники, с 28 до 20 кВ, приводит к уменьшению как энергии, введенной в проводник, так и энергии дуговой стадии. Площадь удельной поверхности порошков в этом случае также уменьшается с 1,9 до $1,6\text{ м}^2/\text{г}$.

Для исследования влияния состава газа на дисперсность порошков вольфрама эксперименты по электрическому взрыву вольфрамовых проводников различных диаметров были проведены в следующих средах: в атмосфере аргона, в аргоне с добавкой 10 об. % азота, в азоте и в азоте с добавкой 5 об. % H_2 . Условия экспериментов и значения площади удельной поверхности полученных порошков представлены в табл. 5. Давление газа во всех случаях составляло $1,5 \cdot 10^5\text{ Па}$, кроме образца 9, который был получен при ЭВП в среде азота при давлении 0,3 атм. Длина взрывааемых проводников $l = 60\text{ мм}$.

Таблица 5

Площадь удельной поверхности электровзрывных порошков вольфрама в зависимости от состава газа во взрывной камере

№	d, мм	U, кВ	e/e_c	e_d/e_c	Газ	$S_{уд}, \text{ м}^2/\text{г}$	$a_s, \text{ нм}$
1	0,2	13,7	0,5	0,8	Ар	1,5	207
2	0,2	13,7	0,5	0,7	Ар+10 об. % N_2	1,8	173
3	0,2	13,7	0,5	0,7	N_2	1,9	164
4	0,2	13,7	0,5	0,7	N_2 +5 об. % H_2	1,9	164
5	0,3	22,9	0,4	1,1	Ар	1,9	164
6	0,3	22,9	0,4	1,1	Ар+10 об. % N_2	2,4	130
7	0,3	22,9	0,7	0,8	N_2	1,7	183
8	0,3	22,9	0,7	0,8	N_2 +5 об. % H_2	1,7	183
9	0,3	22,9	0,4	0,9	$\text{N}_2, 0,3 \cdot 10^5\text{ Па}$	2,6	120

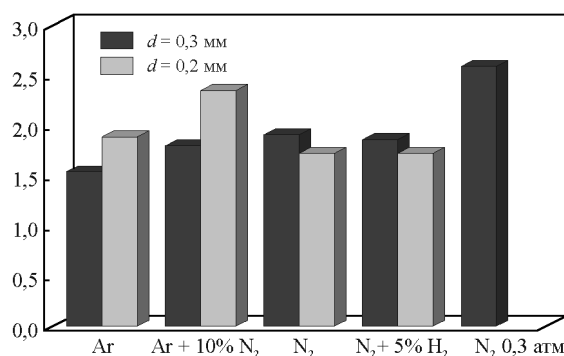


Рис. 7. Зависимость площади удельной поверхности электровзрывных порошков вольфрама от состава газовой среды во взрывной камере.

Результаты, представленные на рис. 7, показывают, что состав газа в разрядной камере при взрыве существенно влияет на дисперсность порошков. Так, при электрическом взрыве вольфрамового проводника диаметром 0,2 мм использование азота в качестве окружающей среды позволило получить порошки вольфрама с большей площадью удельной поверхности ($S_{уд} = 1,9 \text{ м}^2/\text{г}$). При электрическом взрыве вольфрамового проводника диаметром 0,3 мм порошки высокой дисперсности ($S_{уд} = 2,4 \text{ м}^2/\text{г}$) были получены в среде аргона с добавкой азота, что в этом случае объясняется не только влиянием состава газовой среды, но и высоким значением энергии дуговой стадии разряда ($e_d/e_c = 1,1$), как это было показано ранее.

Порошки вольфрама максимальной дисперсности в условиях данных экспериментов удалось получить, понизив давление азота с $1,5 \cdot 10^5$ до $0,3 \cdot 10^5$ Па. Площадь удельной поверхности порошков в этом случае составила $2,6 \text{ м}^2/\text{г}$ (рис. 7).

Более высокая дисперсность порошков при взрыве в азоте при пониженном давлении (образец 9, табл. 5) в сравнении с нанопорошками, полученными в аргоне (образцы 1 и 5, табл. 5) и в азоте (образцы 3 и 7, табл. 5), объясняется влиянием пониженного давления во взрывной камере. При пониженном давлении плотность продуктов взрыва при разлете понижается быстрее, чем при взрыве в условиях повышенного давления, и вероятность коагуляции и спекания частиц уменьшается.

Согласно графикам распределения частиц по диаметру (рис. 8) полученные при электрическом взрыве вольфрамовых проводников порошки имеют трехмодальное распределение по размерам. При замене рабочего газа с аргона на азот при давлении $1,5 \cdot 10^5$ Па диаметр частиц, соответствующий первому максимуму на кривой распределения, уменьшается от 0,691 до 0,171 мкм, а средний диаметр частиц

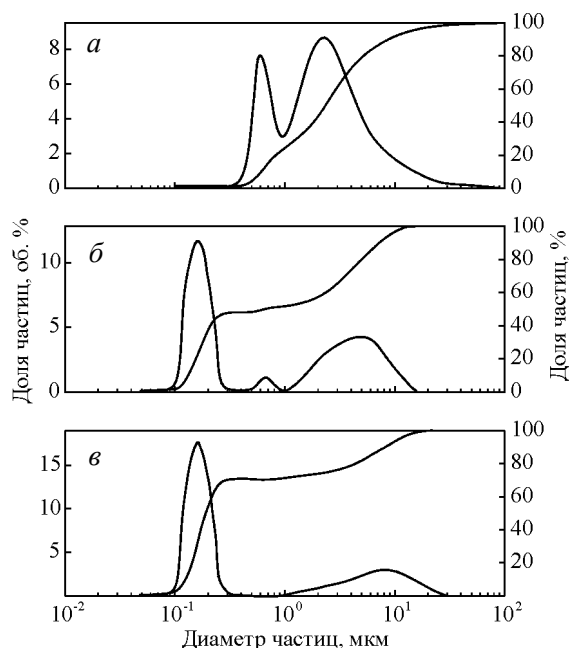


Рис. 8. Распределение по диаметру частиц вольфрамового порошка, полученного при ЭВП в аргоне, $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па (а), в азоте, $P = 1,5 \cdot 10^5$ Па (б), в азоте, $P = 0,3 \cdot 10^5$ Па (в)

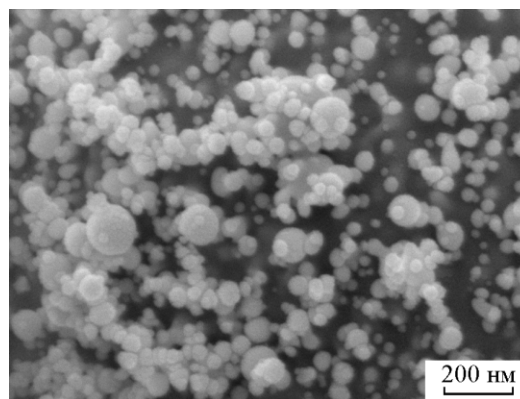


Рис. 9. Микрофотография частиц нанопорошка вольфрама (образец 2 табл. 4)

уменьшается от 2,40 до 0,69 мкм (рис. 8а, б). При использовании азота при уменьшении давления с $1,5 \cdot 10^5$ до $0,3 \cdot 10^5$ Па диаметр частиц, соответствующий первому максимуму, не изменяется и равен 0,171 мкм, а средний диаметр частиц в порошке уменьшается от 0,69 до 0,20 (рис. 8б, в). Число частиц, попадающих в первый максимум на кривой распределения, увеличивается, соответственно.

Изучение распределения показало также, что с ростом энергии, введенной в проводник, число частиц, относящихся к первому максимуму, увеличивается.

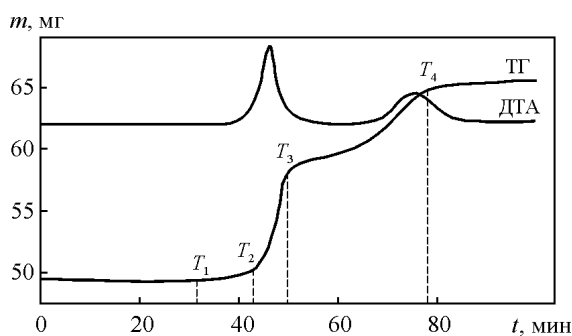


Рис. 10. Типичная дериватограмма образцов нанопорошков вольфрама: ТГ-зависимость массы образцов во время нагрева; ДТА-зависимость выделения теплоты во время нагрева, скорость нагрева — 10 град./мин, атмосфера — воздух.

Следует отметить, что на графиках распределения отсутствуют частицы нанодисперсного диапазона. Вероятно, в процессе разлета продуктов диспергирования проводника образуются агломераты, наличие которых вносит погрешность в определение размера частиц порошка, так как электронно-микроскопические исследования (рис. 9) указывают на наличие частиц нанодисперсного диапазона.

Активность полученных порошков вольфрама определяли с помощью дифференциального термического анализа при нагревании в воздухе (рис. 10). Процесс окисления порошков включал три стадии. Анализ проводили по следующим параметрам: температура начала первой стадии окисления (T_1 , °C), второй стадии окисления (T_2 , °C), степень превращения (степень окисленности) порошков в интервале температур до 1000 °C (α , %), максимальная скорость окисления $V_{\max}$, масс. %/с). Указанные параметры приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры химической активности при нагревании на воздухе порошков, полученных электровзрывом вольфрамовых проводников

№ образца из табл. 2	T_1 , °C	T_2 , °C	α , % $\leq 1000^\circ\text{C}$	$V_{\max}$, масс. %/с
1	310	465	23,7	0,0061
3	310	470	23,8	0,0070
4	320	475	23,9	0,0065
9	310	515	23,7	0,0097

Для исследованных образцов характерна зависимость T_2 на второй стадии — стадии интенсивного окисления, от вида рабочего газа и от давления. Температура начала окисления на второй стадии T_2 повышается при использовании химически активных газов и при уменьшении давления во взрывной камере. Максимальную скорость окисления имеет

образец, полученный в азоте при давлении $0,3 \cdot 10^5$ Па, что объясняется наибольшей дисперсностью этого образца. Параметры термической активности тесно коррелируют с дисперсностью исследованных порошков и с условиями их получения.

Выводы

1. Установлено, что при электрическом взрыве молибденовых проводников в газах и образовании сферических частиц дисперсность нанопорошков увеличивается с ростом энергии дугового разряда: при увеличении e_d/e_c от 0,2 до 1,6 площадь удельной поверхности возрастает с 2,4 до 3,3 м²/г. При электрическом взрыве вольфрамовых проводников в газах дисперсность конечных продуктов — нанопорошков определяется соотношением длины, диаметра проводника, введенной в проводник энергии и энергией дуговой стадии. В исследованных диапазонах энергии площадь удельной поверхности порошков, полученных в аргоне при давлении $1,5 \cdot 10^5$ Па, слабо зависит как от величины введенной в проводник электрической энергии, так и от энергии последней дуговой стадии и составляет 1,6–1,9 м²/г.

2. Показано, что при замене аргона на азот во взрывной камере ($e/e_c = 0,7$; $e_d/e_c = 0,5$) получен нанопорошок молибдена с максимальной дисперсностью: площадь удельной поверхности достигает 4,9 м²/г. Азот является химически активной средой: на поверхности частиц образуются тугоплавкие нитриды, препятствующие укрупнению наночастиц молибдена. В качестве наиболее значимого параметра регулирования дисперсности может быть использовано понижение давления газа во взрывной камере и использование химически активных газов. Применение азота в качестве рабочего газа при пониженном давлении $0,3 \cdot 10^5$ Па позволило получить порошки вольфрама с площадью удельной поверхности 2,6 м²/г и средним диаметром 0,196 мкм.

3. При нагревании нанопорошка молибдена в воздухе наблюдалось выделение запасенной энергии: тепловой эффект 8 кДж/моль при 280–340 °C не сопровождался изменением массы образца. Тепловой эффект связан с релаксационными процессами в структуре наночастиц молибдена.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-08-12077-офи.

Литература

1. Зеликман А.Н. Молибден. М.: Металлургия, 1970, 440 с.

2. Ген М.Я., Зискин М.С., Петров Ю.И. Исследование дисперсности аэрозолей алюминия в зависимости от условий их образования. Доклады Академии наук СССР, 1959, т. 127, с. 366 – 368.
3. Ильин А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете. Известия Томского политехнического университета, 2003, т. 306, № 1, с. 133 – 139.
4. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Яблуновский Г.В. Получение нанопорошков вольфрама методом электрического взрыва проводников. Известия Томского политехнического университета, 2005, т. 308, № 4, с. 68 – 70.
5. Громов А.А., Ильин А.П., Верещагин В.И. Исследование процесса окисления электровзрывного нанопорошка вольфрама в воздухе. Известия Томского политехнического университета, 2003, т. 306, № 6, с. 59 – 62.
6. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение. Под ред. А.П. Ильина. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2005, 148 с.
7. Чейс В. Введение. Электрический взрыв проводников: Сб. науч. тр. Под ред. А.А. Рухадзе. М.: Мир. 1965, с. 7 – 11.
8. Котов Ю.А., Яворовский Н.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников. Физика и химия обработки материалов, 1978, № 4, с. 24 – 29.

Ильин Александр Петрович — Томский политехнический университет, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, заведующий лабораторией. Специалист в области физической химии наноматериалов, горения, взаимодействия энергии высокой плотности мощности с металлами. E-mail: ilyin@tpu.ru.

Назаренко Ольга Брониславовна — Томский политехнический университет, доктор технических наук, профессор. Специалист в области электрического взрыва проводников, взаимодействия энергии высокой плотности мощности с металлами, физико-химических свойств нанопорошков. E-mail: olganaz@tpu.ru.

Тихонов Дмитрий Владимирович — Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент. Специалист в области электрического взрыва проводников, взаимодействия энергии высокой плотности мощности с металлами. E-mail: dv_1@mail.ru.

Толбанова Людмила Олеговна — Томский политехнический университет, кандидат технических наук, старший преподаватель. Специалист в области физико-химических свойств нанопорошков, горения, химического связывания азота воздуха. E-mail: tolbanowa@tpu.ru.