

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии
и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН**

80 лет

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

УДК 669.1; 546.1; 546.3

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.
Сборник научных трудов.
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

Редакционная коллегия

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

Получение порошков в плазменных реакторах на базе электродугового плазмотрона

*Ю.В. Цветков, А.В. Самохин, Н.В. Алексеев, А.Г.
Ю.В. Асташов, М.А. Синайский, Д.Е.Кирпичев, А.А. Фадеев*

ИМЕТ РАН

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-437-450

Реферат. Приведены результаты исследований синтеза нанопорошков металлов и их неорганических соединений, а также сфероидизации порошков металлов с размером частиц порядка 10^1 мкм в потоках термической плазмы, генерируемой в электродуговых плазмотронах.

Введение

Плазменная порошковая металлургия является ведущим направлением исследований лаборатории «Плазменные процессы в металлургии и обработке материалов». Ранее на базе созданных впервые отечественных технологических плазматронов была продемонстрирована перспективность применения низкотемпературной плазмы для получения порошков с особыми свойствами, в том числе с позиции энергетики и экологии.

Развиты физико-химические и энергофизические основы плазменного восстановления и синтеза (термодинамика, кинетика, механизм, математическое моделирование). Впервые в мире осуществлено на примере плазменно – водородного восстановления оксидов вольфрама в промышленном масштабе получение ультрадисперсных (по нынешней технологии нанодисперсных) порошков вольфрама и их применение для получения твердых сплавов повышенных механических и эксплуатационных свойств. Предложены плазменные технологии получения широкой номенклатуры нанодисперсных и сферических порошков металлов, сплавов, соединений и композитов.

Наноразмерные порошки элементов и их неорганических соединений являются основой для создания наноструктурных материалов, таких как наноструктурная функциональная керамика различного назначения, твердые сплавы с повышенной износостойкостью и ударной вязкостью, дисперсно-упрочненные и модифицированные конструкционные сплавы с повышенными физико-механическими характеристиками, наноструктурные

защитные термо-, коррозионно- и износостойкие покрытия, полимерные композиты с наполнителями и модификаторами из неорганических наночастиц, и др. [1-6].

Плазменный синтез является наиболее универсальным методом получения нанопорошков элементов и их различных неорганических соединений и композиций в контролируемой газовой атмосфере – инертной, восстановительной и окислительной [7-11].

Для генерации термической плазмы используются различные виды электрических разрядов – дуговой (ЭД), высокочастотный (ВЧ), сверхвысокочастотный (СВЧ), а также комбинированные разряды [8]. Мощность современных ЭД плазматронов достигает 3 – 5 МВт при ресурсе работы до 10^3 ч, использование V-образных ЭД плазматронов [12], в которых вольфрамовые электроды работают в среде инертного газа аргона, позволяет практически исключить присутствие примесей материала электродов в потоке термической плазмы и обеспечить получение высокочистых целевых продуктов. Разработанные плазматроны мощностью 300 – 2400 кВт, имеющие тепловой КПД 70 – 85 %, обеспечивают в настоящее время работу промышленных установок переработки различных видов отходов и металлургических печей [13].

В настоящее время в ИМЕТ РАН ведутся активные исследования синтеза нанопорошков в потоках термической плазмы, генерируемой в ЭД плазматронах. Важнейшим направлением исследований является разработка плазменных технологий получения нанопорошков с заданными физико-химическими свойствами, определяемыми исходя из их конкретного применения при создании новых материалов. Для этого решаются задачи управления дисперсным, фазовым и химическим составом получаемых нанопорошков как непосредственно в процессе их получения в плазменных реакторах, так и при последующей дополнительной термохимической и термовакуумной обработке.

В связи с интенсивным развитием аддитивных технологий проводятся исследования и разработки процессов сфероидизации порошков металлов и сплавов с размером частиц 10-100 мкм в потоках термической плазмы ЭД плазматронов.

В данной статье приводится обзор результатов исследований, выполненных в ИМЕТ РАН по синтезу нанопорошков и сфероидизации порошков с размером частиц порядка 10^1 мкм в потоках термической плазмы, генерируемой в ЭД плазматронах.

Генерация термической плазмы

Для генерации термической плазмы в лабораторных и пилотных установках ИМЕТ РАН использовались разработанные электродуговые плазмотроны постоянного тока номинальной мощностью 30 - 150 кВт с самоустанавливающейся длиной дуги и газовой стабилизацией разряда, а также плазмотроны с межэлектродной вставкой (рис. 1). Плазмотроны обеспечивали устойчивую генерацию потоков термической плазмы восстановительных, окислительных и инертных сред с равновесной среднемассовой температурой $3 - 10 \cdot 10^3$ К для осуществления процессов получения нанопорошков (табл. 1) и процессов сфероидизации.



а



б

Рис.1. Электродуговые плазмотроны ИМЕТ РАН номинальной мощностью 30 кВт (А) и 150 кВт (В)..

Плазменный реактор

Синтез нанопорошков в потоке термической плазмы электродугового плазмотрона эффективно реализуется в реакторе с ограниченным струйным течением [7-11]. Плазменная струя, генерируемая в электроразрядном генераторе термической плазмы, истекает в объем, который ограничен охлаждаемой цилиндрической поверхностью при соотношении характерных размеров $D_r/D_p \gg 10$, где D_r – диаметр реактора, D_p – выходной диаметр сопла плазмотрона. Образование наночастиц в плазменных реакторах происходит в результате конденсации компонентов из газовой фазы и сопровождается осаждением полученных наночастиц на поверхностях, ограничивающих высокотемпературный газодисперсный поток. Осаждение наночастиц на

непосредственно водоохлаждаемую поверхность позволяет предотвратить их спекание в образующемся слое, однако не ограничиваемый рост толщины слоя наночастиц, осаждающихся на поверхность реактора, будет неизбежно приводить к повышению температуры в слое и, соответственно, к спеканию и укрупнению частиц, а также к возможному изменению их фазового и химического состава.

Для получения конечного продукта плазменного синтеза в виде нанопорошка, наночастицы в котором сохраняют свойства, определенные условиями их формирования в газовом потоке, необходимо исключить или свести к минимуму возможность протекания физико-химических превращений в слое осажденных частиц. Это может быть обеспечено при условии, если температура в слое будет ниже некоторого порогового значения, при превышении которого в слое могут протекать химические и фазовые превращения материала наночастиц, а также их рост. Для выполнения этого условия необходимо не допускать превышения толщиной слоя наночастиц установленного значения, производя периодическое удаление растущего слоя частиц со стенок реактора в герметичные сборники.

Разработанная конструкция плазменного реактора с ограниченным струйным течением для синтеза нанопорошков защищена патентом РФ [14]. Общий вид плазменного реактора на базе ЭД плазмотрона мощностью 30 Квт представлен на рис. 2.

Дисперсный состав нанопорошков и морфология частиц

Дисперсный состав нанопорошков, являясь их важнейшей характеристикой, определяет возможность их использования при решении научных задач и в практических приложениях.

В таблице 1 представлена совокупность процессов получения металлов и их неорганических соединений, реализованных в реакторе с ограниченным струйным течением на базе ЭД плазмотрона номинальной мощностью 30 кВт. В качестве плазмообразующих газов использовались как различные индивидуальные газы, так и газовые смеси. Исходным сырьем являлись порошки элементов и их соединений с размерами частиц, не превышающими 25 – 40 мкм, жидкие реагенты подвергались предварительному испарению перед подачей в реактор.

По результатам электронно-микроскопических исследований все полученные нанопорошки являются полидисперсными и состоят из частиц, имеющих равноосную форму (рис. 3), присутствия нанообъектов с ориентированными формами роста не обнаружено.



Рис.2. Общий вид плазменной установки с реактором с ограниченным струйным течением на базе ЭД плазматрона мощностью 30 кВт.

Формирование наночастиц в условиях плазмохимического синтеза происходит по макромеханизмам «пар – жидкость – кристалл» (ПЖК), «пар – кристалл» (ПК) и смешанному, включающем совокупность указанных механизмов (ПЖК-ПК). Механизм формирования наночастиц в конкретном процессе может быть оценен на основе термодинамических расчетов зависимости выхода целевого продукта (вещества нанопорошка) от температуры. Положим, что рассматриваемое вещество существует в жидком и твердом состоянии, его выход зависит от температуры и при этом: T^* - минимальная температура, которой соответствует максимум выхода вещества наночастиц, T_k - максимальная температура, при которой вещество наночастиц существует в конденсированном состоянии, $T_{пл}$ – температура плавления вещества. При учете того, что плазменный процесс происходит при снижающейся температуре, первоначально превышающей T_k , температурные условия формирования наночастиц по указанным выше макромеханизмам можно записать как:

механизм ПЖК $T_{пл} < T^* < T_k$, все частицы имеют сферический габитус (рис. 4а; 5-1; 5-5);

механизм ПК $T^* < T_k < T_{пл}$, все частицы имеют огранный габитус (рис. 4б; 5-2, 5-9, 5-10);

механизм ПЖК-ПК $T^* < T_{пл} < T_k$ частицы имеют как сферический, так и огранный габитус (рис. 4в; 5-6; 5-7).

Таблица 1.

Нанопорошки, получаемые в плазменном реакторе.

	Нанопорошок	Реагенты	Плазмообразующий газ	Удельная поверхность м ² /г
Individual metals				
	W, Mo, Ni, Co, Re	Me _x O _y , H ₂ , C ₃ H ₈ +air	H ₂ +N ₂ , C ₃ H ₈ +air	2 - 30
		CuCl	H ₂ +N ₂	2 - 5
	Cu	Cu(HCOO) ₂	N ₂	2 - 7
		Cu(CH ₃ COO) ₂ *H ₂ O	N ₂	5 - 35
		Cu	N ₂	20 - 36
Metal-matrix composition materials				
	W – Ni – Fe (W – 95 % by weight)	WO ₃ , NiO, Fe ₂ O ₃ , H ₂	H ₂ +N ₂	4-10
	W – Cu (W – 80 % by weight)	WO ₃ , CuO	H ₂ +N ₂	4-10
	Ag – SnO ₂	Ag, SnO ₂	air	5-12
Nitrides, carbides, carbonitrides				
	TiN	Ti (TiH ₂), N ₂ TiCl ₄ , H ₂ , N ₂	N ₂ H ₂ +N ₂	12-18 11 – 39
	AlN	Al, NH ₃ , N ₂	N ₂	30-70
	TiC	TiCl ₄ , H ₂ , CH ₄	H ₂ +Ar	15-30
	TiCN	TiCl ₄ , H ₂ , N ₂ , CH ₄	H ₂ +N ₂	13 - 23
	SiC	SiCl ₄ , H ₂ , CH ₄	H ₂ +Ar	15-30
0	WC(C _{total} =6.2 % by weight)	WO ₃ , CH ₄ , H ₂	H ₂ +N ₂	20-40
Oxides				
2	Al ₂ O ₃	Al, O ₂	Air	15-35
3	Al ₂ O ₃ -MeO (Me=Mg, Co)	Al, Me, O ₂	Air	15-25
4	AlON	Al, NH ₃ , N ₂ , O ₂	N ₂	30-50
5	TiO ₂	TiCl ₄ , O ₂	O ₂ +Ar	30-120
6	SiO ₂	SiCl ₄ , O ₂	O ₂ +Ar	120-250
7	ZrO ₂	ZrCl ₄ , O ₂	O ₂ +Ar	18 – 32
8	ZrO ₂ -Al ₂ O ₃	ZrCl ₄ , Al, O ₂	O ₂ +Ar	17
9	Y ₂ O ₃	Y(COOH) ₃ , O ₂	O ₂ +Ar	12-25

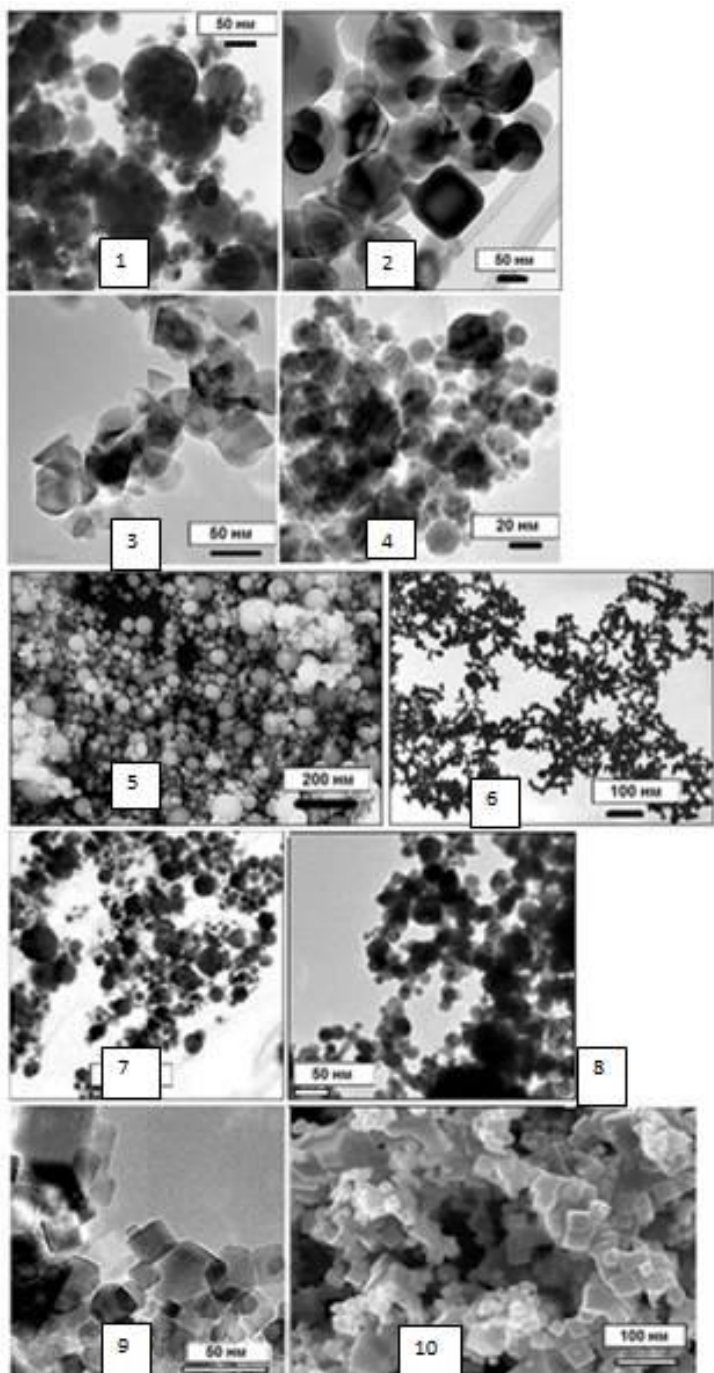


Рис.3. ТЕМ и SEM микрофотографии нанопорошков. 1- Al_2O_3 , 2 – TiO_2 , 3 – SiC , 4 – W-C , 5 – Cu , 6 – W , 7 – W-Cu , 8 – W-Ni-Fe , 9 – TiC , 10 - TiCN

Механизм ПЖК реализуется, если в условиях снижающейся температуры процесса максимальный выход вещества наночастиц

обеспечивается при температурах, превышающих температуру плавления (рис. 4а). В свою очередь механизм ПК определяет формирование наночастиц, если образование вещества наночастиц происходит при температурах ниже температуры плавления вещества наночастиц (рис. 4б) или вещество вообще не существует в жидком состоянии. Если при формировании наночастиц в условиях снижения температуры процесса вещество претерпевает кристаллизацию (затвердевание) до достижения максимума выхода, то происходит смена механизма формирования частиц с ПЖК на ПК, и в получаемом продукте будет присутствовать как сферические, так и ограниченные частицы (рис. 4в).

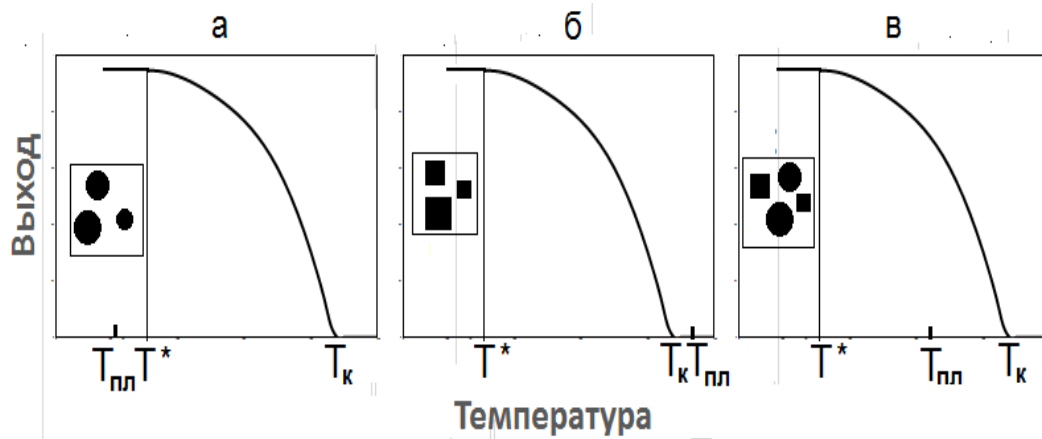


Рис.4. Варианты соотношения характерных температур при формировании наночастиц по различным макромеханизмам.

Как следует из микрофотографий полученных нанопорошков (рис. 5), в реализованных процессах формирование наночастиц может происходить по всем трем указанным механизмам ПЖК, ПК и ПЖК-ПТ.

На основании полученных микрофотографий нанопорошков Al_2O_3 , TiO_2 , Cu, W, TiN, TiCN и композиции W-C, формирование частиц в которых происходило по всем указанным выше механизмам, построены гистограммы распределения частиц по размеру и проведен их статистический анализ (рис.5, [15]).

Установлено, что логарифмически нормальная функция распределения частиц по размеру

$$p(d) = \frac{1}{d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln d - m}{\sigma}\right)^2\right)$$

где d - диаметр частицы, m - медиана распределения, σ - среднеквадратичное отклонение, достоверно (с коэффициентом корреляции более 0,95) описывает все исследуемые объекты в широком диапазоне изменения дисперсного состава исследованных нанопорошков. Следует подчеркнуть, что ранее соответствие логнормальному распределению частиц по размерам было подтверждено для нанопорошков, получаемых в процессах, где формирование частиц происходит по коагуляционному механизму, т.е. ПЖК [16]. Установленное экспериментально логнормальное распределение частиц по размерам при отсутствии коагуляционного роста в соответствии с [1] может быть обусловлено логнормальным распределением времени пребывания частиц в зоне роста.

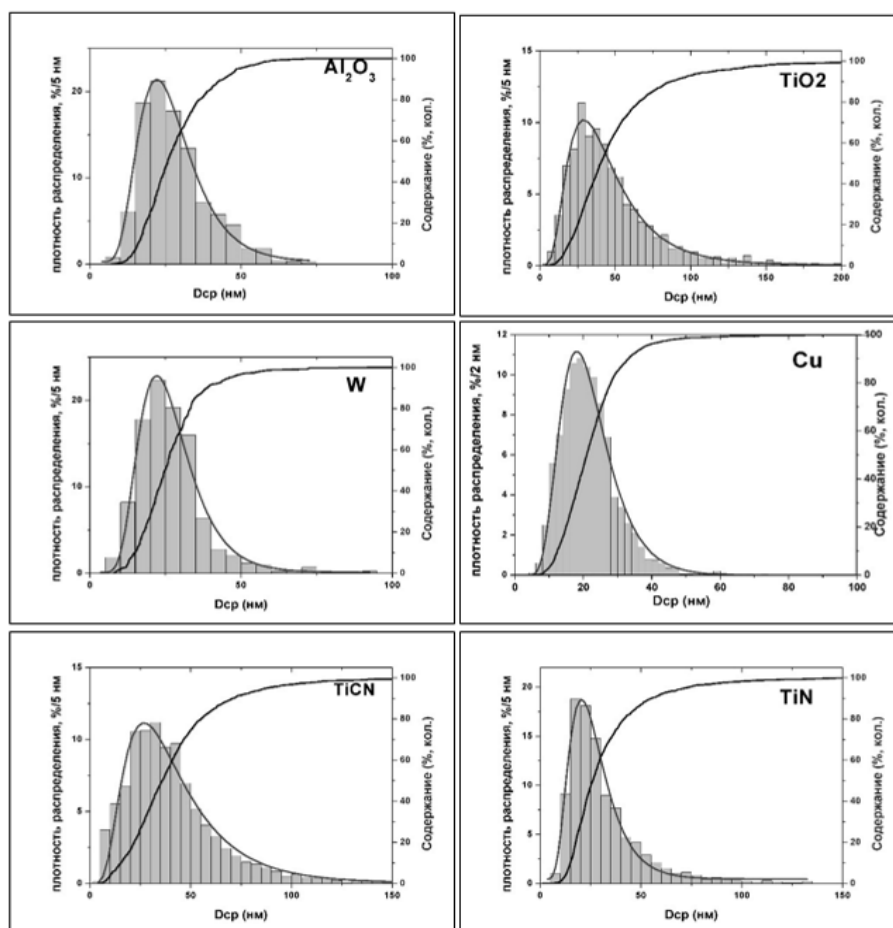


Рис.5. Распределения частиц по размеру нанопорошков Al₂O₃, TiO₂, W, Cu, TiCN и TiN.

Экспериментально установлено для реализованных процессов получения нанопорошков (табл. 1), формирование частиц в которых происходит по различным макромеханизмам, что средний размер получаемых частиц нанопорошков возрастает при увеличении концентрации используемого прекурсора в исходных газовых компонентах [18-25]. Влияние параметров плазменного процесса, а также характерных размеров реактора исследовано в [20] для получения нанопорошков вольфрама и никеля при восстановлении их оксидов WO_3 и NiO в водородно-азотной и пропано-воздушной плазме. Показано, что кроме упомянутой выше концентрации прекурсора на средний размер частиц получаемых порошков металлов могут оказывать влияние характерные размеры плазменного аппарата – диаметр реактора и диаметр сопла плазмотрона, определяющие размер высокотемпературной зоны, в которой происходит формирование частиц. На закономерности образования и роста частиц могут оказывать влияние химические процессы, протекающие на их поверхности. Выполненная совокупность исследований получения различных нанопорошков в плазменном реакторе свидетельствует о том, что влияние параметров процесса на средний размер получаемых частиц является многофакторной задачей, в которой заметное влияние принадлежит физико-химическим особенностям процесса.

Результаты исследований показали, что средний размер частиц зависит от параметров синтеза – начальной концентрации прекурсора, энтальпии и скорости истечения струи плазмы, при этом степень влияния указанных параметров определяется индивидуальными особенностями реализуемого процесса. Получение частиц предельно малых размеров в реакторе с ограниченным струйным течением может быть достигнуто лишь при значительном снижении начальной концентрации паров или увеличении скорости истечения струи. Снижение начальной концентрации влечет за собой снижение производительности синтеза, а повышение скорости имеет реальные физические и технические ограничения.

Управление размером частиц, формирующихся по механизму ПЖК в потоке термической плазмы, может обеспечиваться за счет изменения времени коагуляционного роста частиц, т.е. принудительным завершением процесса после окончания стадии фазового перехода пар – жидкость, например, в результате вдува холодного газа. В [21] такая схема организации процесса была реализована при синтезе нанопорошка оксида алюминия окислением порошка металла в потоке воздушной плазмы. В объеме реактора с ограниченным струйным течением был организован распределенный

радиальный ввод закалочного газа на периферии высокотемпературного потока, закалка проводилась на различном расстоянии от входа в реактор, что позволяло варьировать временем пребывания частиц в зоне коагуляционного роста. Изменение интенсивности вдува и места ввода закалочного газа позволило обеспечить варьирование среднего размера частиц в диапазоне 35 – 75 нм.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что реактор с ограниченным струйным течением на базе ЭД плазмотрона обеспечивает возможность получения широкой номенклатуры нанопорошков элементов, их неорганических соединений и композитов.

Сфероидизация металлических порошков

Исходными материалами для изготовления изделий из металлов и сплавов методами аддитивных технологий являются сферические порошки с размером частиц порядка 10^1 мкм. Обработка порошков, имеющих неправильную форму частиц, в термической плазме обеспечивает их оплавление, приводящие к формированию сферических частиц.

При обработке в потоке термической плазмы аргона, генерируемой в электродуговом плазмотроне, порошков титана, изготовленных в процессе гидрирования-дегидрирования, получены сферические порошки титана фракций 40-70 мкм и менее 40 мкм, счетная степень сфероидизации которых достигает 96%, при этом средний коэффициент округлости частиц составляет 1,01 (рис.6).

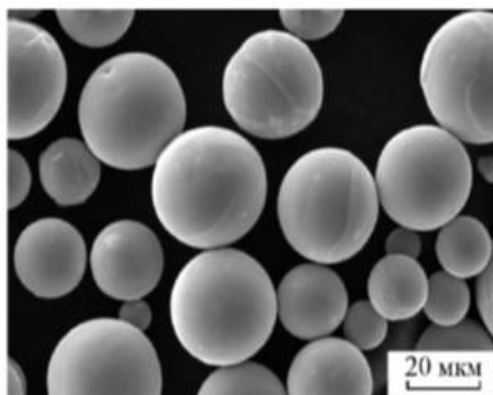


Рис.6. Микрофотографии сфероидизированного порошка титана.

Выполненные экспериментальные исследования показали принципиальную возможность получения беспористых сферических порошков многокомпонентных сплавов металлов из исходных ультрадисперсных порошковых компонентов сплава, имеющих размер частиц менее 1 мкм. На примере модельного высоколегированного сплава Fe-Ni-Cr показана возможность получения сферических порошков сплава с размерами частиц в диапазоне от 25 до 50 мкм в процессе, включающем следующие стадии: микрогрануляция ультрадисперсного порошка, термообработка микрогранул (сушка при 100°C, удаление органической связки при 300°C, термохимическая обработка в среде H₂ при 1000°C, вакуумная обработка при 1200°C), классификация термообработанных микрогранул с выделением фракции микрогранул от 25 до 50 мкм, сфероидизация выделенной фракции микрогранул в потоке термической плазмы, классификация с выделением фракции микронного и субмикронного диапазонов размеров. Микрофотографии микрогранул компонентов сплава и сфероидизированных в плазме частиц представлены на рис. 7.

Представленные результаты экспериментов свидетельствуют о возможности получения сферических порошков металлов и сплавов из различных исходных порошковых материалов в плазменном аппарате с ограниченным струйным течением на базе электродугового плазмотрона.

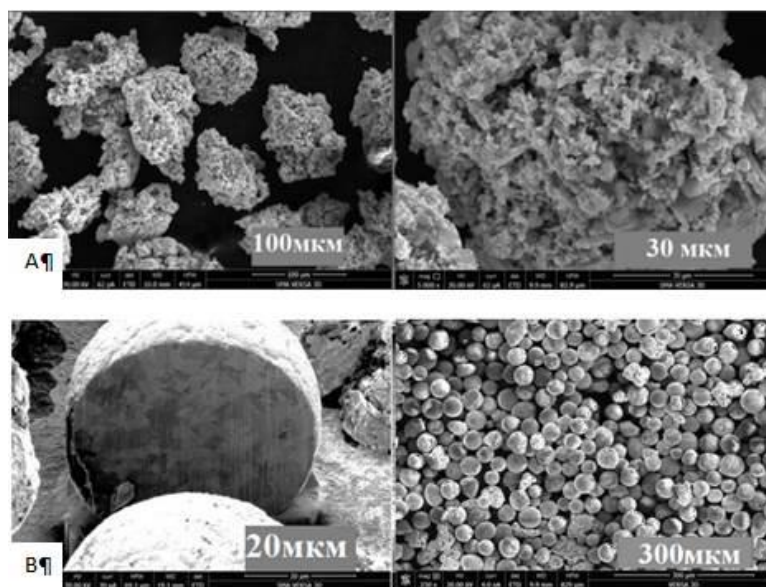


Рис.7. Микрофотографии гранул компонентов сплава (А) и сфероидизированных в плазме частиц (В).

Заключение

Представленные результаты исследований и разработок свидетельствуют о широких возможностях плазменных процессов и аппаратов для получения нанопорошков металлов и их различных неорганических соединений с заданными свойствами. Нанопорошки, полученные в плазменных установках, были использованы при проведении большого числа НИОКР по созданию новых материалов с особыми и улучшенными свойствами.

Наряду с получением нанопорошков плазменный реактор с ограниченным струйным течением обеспечивает возможность сфероидизации порошков металлов и сплавов для их использования в аддитивных технологиях.

Накопленный опыт является основой для создания эффективных промышленных производств порошков с использованием плазменных реакторов на базе электродугового плазмотрона.

Литература

1. Gogotsi Yu. Nanomaterials Handbook, CRC Press, 2006.
2. Koch C. C. Nanostructured Materials: Processing, Properties and Applications, William Andrew, 2006.
3. Wang Z.L., Liu Y., and Zhang Z. Handbook of Nanophase and Nanostructured Materials, Springer, 2002.
4. Shaw D., Liu B. Handbook of Micro and Nanoparticle Science and Technology. Springer, 2010.
5. Hosokawa M., Nogi K., Naito M. and Yokoyama T. Nanoparticle Technology Handbook, Elsevier. 2008
6. Каламазов Р.У., Цветков Ю.В. Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена. М., Металлургия, 1988- 192 с.
7. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. М., Наука, 1980.
8. Туманов Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах. 2010, Физматлит, 968 с.
9. Цветков Ю.В. Термическая плазма в нанотехнологиях. Наука в России 2006, №2, 120-126
10. Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов. Химия высоких энергий, 2006, т.40, № 2, с.120-126
11. Цветков Ю.В., Самохин А.В. Плазменная нанопорошковая металлургия. Киев, Автоматическая сварка, ноябрь, 2008, с. 171-175
12. Жуков М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы. 1999 г., Наука, 712 с.
13. Plasma Torches by Westinghouse Plasma Corporation. <http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2012/11/WPC-Plasma-Torches-Eng-Email-Feb-2012.pdf>.

14. Патент РФ №2311225, 2007 г.
15. Синайский М.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Расширенные характеристики дисперсного состава для нанопорошков плазмохимического синтеза. Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11-12. С. 110-115.
16. Granqvist C. G., Buhrman R. A. Ultrafine metal particles. *Journal of Applied Physics* 47, 2200 (1976)
17. Kiss L. B., Soderlund J., Niklasson G. A., Granqvist C. G. New approach to the origin of lognormal size distributions of nanoparticles. *Nanotechnology*, 1999, № 10, p. 25–28.
18. Алексеев Н.В., Балихин И. Л. Куркин Е.Н. и др. Формирование ультрадисперсного порошка оксида алюминия в условиях ограниченной струи воздушной плазмы. *Физика и химия обработки материалов*. 1994. № 4-5. С. 72-78.
19. Алексеев Н.В., Балихин И.Л., Куркин Е.Н., Самохин А.В., Троицкая Е.В., Троицкий В.Н. Синтез ультрадисперсных порошков нитрида и карбонитрида титана в струе азотной плазмы. *Физика и химия обработки материалов*. 1995. № 1. С. 31-39.
20. Алексеев Н.В., Самохин А.В., Гречиков М.И. Управление дисперсностью металлических порошков, получаемых в процессах плазменного восстановления. *Физика и химия обработки материалов*. 1997. № 6. С. 54-60.
21. Алексеев Н. В., Самохин А. В., Куркин Е. Н., Агафонов К. Н., Цветков Ю. В. Синтез наночастиц оксида алюминия при окислении металла в потоках термической плазмы. *Физика и химия обработки материалов*. 1997. Т. 3. С. 33–39.
22. Alekseev N.V., Samokhin A.V., Tsvetkov Yu.V. Synthesis of titanium carbonitride nanopowder by titanium tetrachloride by treatment in hydrocarbon-air plasma. *High Energy Chemistry*. 1999. v. 33. № 3. pp.194-197.
23. Kolesnikov A. Alexeev N., Samokhin A. Controlled synthesis of alumina nanoparticles in a reactor with self-impinging plasma jets. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Vol. 5, 2007, Article A95.
24. Самохин А.В., Поляков С.Н., Асташов А.Г., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. Моделирование процесса синтеза нанопорошков в плазменном реакторе струйного типа. II. Формирование наночастиц. *Физика и химия обработки материалов*. 2014. № 3. С. 12-17.
25. Самохин А.В., Синайский М.А., Алексеев Н.В. и др. Синтез наноразмерных порошков диоксида циркония и композиций на его основе в термической плазме электродугового плазматрона. *Перспективные материалы*. 2015. № 4. С. 49-60.