



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244
г. Самара, 443100
Тел. (846) 2784-3111 Факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru

17.11.16 № 39/3964

На № _____ от _____

Сибирский федеральный университет
Ученому секретарю
Диссертационного совета Д212.099.19
И.В. Карпову

660041, г. Красноярск,
проспект Свободный, 82

Направляем отзыв профессора А.П. Амосова и доцента Кондратьевой Л.А. на автореферат докторской диссертации А.В. Ушакова «ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ И НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ»

Приложение: *Отзыв в 2 экз., на 3 л. каждый.*

Ученый секретарь университета,
доктор технических наук

Ю.А. Малиновская

ОТЗЫВ

на автореферат докторской диссертации А.В. Ушакова
«ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
НАНОДИСПЕРСНЫХ И НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ»

В настоящее время в науке и промышленности наблюдается повышенный интерес в изучении, получении и применении наноразмерных материалов. Основные требования, предъявляемые к методу получения наночастиц – он должен позволять получать наноразмерные частицы в широком (от 1 до 100 нм) диапазоне размеров с возможностью управления параметрами процесса, а также должен быть высокопроизводительным, экономически эффективным, обеспечивать воспроизводимое получение порошков контролируемого состава и др. Самым эффективным способом получения нанодисперсных материалов называется газофазный синтез, в частности метод испарения-конденсации. Однако он обладает низкой производительностью из-за отсутствия эффективных недорогих испарителей, многоступенчатостью процесса из-за необходимости консервации и хранения полученных полуфабрикатов, сильной агломерацией частиц, слабой управляемостью процесса синтеза многофазных систем.

В данной работе для получения нанодисперсных материалов предложен плазмохимический синтез, который обладает следующими достоинствами: высокая чистота, необходимая для синтеза нанодисперсных материалов; широкие возможности для генерации активной плазмы, которой можно управлять с помощью электрических и магнитных полей с последующим получением нанодисперсных материалов методом конденсации из плазменной фазы. Однако в этом методе получения нанодисперсных материалов (плазмохимический синтез материалов в плазме дугового разряда низкого давления) есть много нерешенных проблем, которые необходимо решить: широкое дисперсионное распределение наночастиц из-за присутствия в плазме крупных капель, отсутствие математических моделей процессов испарения и конденсации в плазме дугового разряда низкого давления, недостаточная изученность направленного плазмохимического синтеза в различных реакционных средах. Следовательно, задача исследования процессов получения нанодисперсных и наноконпозиционных материалов в плазме дугового разряда низкого давления и исследования их физико-химических и технологических свойств является актуальной.

При решении перечисленных в диссертации задач диссертантом был получен целый ряд новых важных результатов. Был создан плазмохимический реактор с импульсным дуговым испарителем для синтеза нанодисперсных материалов металлов, сплавов, и химических тугоплавких соединений, обеспечивающий: плазменно-дуговое испарение токопроводящих материалов, проведение управляемых плазмохимических реакций в контролируемой реакционной среде, регулирование температуры катода 300-1100 К, номинальный ток высоковольтного источника питания дугового испарителя 2,3 кА, регулирование тока стационарного разряда 20-500 А, рабочего давления в камере 10-200 Па. Разработана и создана технологическая оснастка для синтеза наноконпозиционных материалов (полуфабрикатов), обеспечивающая проведение плазменной обработки поверхностного слоя частиц порошковых материалов толщиной 0,1-1 мкм, равномерное осаждение полученных в

плазмохимическом реакторе наночастиц на порошковые материалы дисперсностью 0,1-50 мкм.

Разработана математическая модель термического взаимодействия микрокапельной фракции дугового разряда с нагретым буферным газом в прикатодной области. Показано, что микрокапельная фракция с характерным размером от 10 нм до 50 мкм, являющаяся основным продуктом эрозии в катодном пятне дугового разряда низкого давления, эффективно испаряется в прикатодной области благодаря теплообмену с окружающим нагретым газом, причем оптимальное давление находится в области 100 Па. В работе наглядно представлена математическая модель физических процессов в прикатодной области вакуумной дуги. Показано, что термические процессы поддерживаются искровыми разрядами в среде металлического пара материала катода с образованием лавинно-стримерного перехода и для разработки технологии достаточно учитывать только параметр подобия pd .

Установлен механизм влияния теплового состояния катода на дисперсность получаемых наноматериалов. Показано, что увеличение температуры катода от 300 до 1100 К приводит к увеличению среднего размера наночастиц от 10 до 30 нм, что связано с увеличением степени и неравномерности полей пересыщения пара в прикатодной области и уменьшением скорости движения образующихся капель.

Установлен механизм смешанного коагуляционного и диффузионного формирования наночастиц из кластерной плазмы и пересыщенного пара, в результате чего формируется бимодальное распределение наночастиц по размерам и развитая поверхность наночастиц. В области давлений 10-200 Па была установлена корреляционная связь между зависимостями вычисленного из рентгенограмм среднего размера наночастиц и напряжения на разрядном промежутке дугового испарителя от давления газовой смеси на основе кислорода, азота, ацетилена и аргона в плазмохимическом реакторе, что говорит о схожих физических процессах синтеза наночастиц в дуговом разряде низкого давления для охлаждаемого катода. Экспериментально найдено, что для всех типов газовых смесей и предложенной конструкции дугового испарителя оптимальное значение давления для синтеза наноматериалов находится в диапазоне 70-100 Па. Установлено, что производительность вакуумного плазмохимического реактора и фазовый состав наноматериалов определяется особенностью реакционной среды.

Разработан метод синтеза нанокomпозиционных материалов на основе нанопорошков плазмохимического синтеза. Введение до 20 мас.% несверхпроводящих наноразмерных порошков CuO в поликристаллические ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -у приводит к созданию композитов нового типа с наноразмерными дефектами в виде капель и усов. Изучение сверхпроводящих свойств полученных композитов выявило существенное увеличение плотности критического тока J_c до 105 А/см² и пик эффект в области сильных магнитных полей до 5 Тл.

Таким образом, в диссертации был создан высокопроизводительный плазмохимический комплекс для синтеза нанодисперсных и нанокomпозиционных материалов в плазме дугового разряда низкого давления в различных реакционных средах, получены нанодисперсные материалы на основе тугоплавких неорганических соединений и исследованы их уникальные физико-химические и технологические свойства. Разработанные в работе подходы и методы имеют важное практическое значение для порошковой металлургии и материаловедения.

По содержанию автореферата следует сделать следующие замечания.

1. Не упоминается такой достаточно известный метод получения нанопорошков и нанокompозитов как СВС-самораспространяющийся высокотемпературный синтез.
2. Недостаточно подробно описан плазмохимический реактор на рисунке 1.
3. Не указано, из каких материалов изготавливались катоды.
4. Нет результатов рентгенофазового анализа синтезированных нанопорошков.
5. Не указана чистота синтезированных нанопорошков.

Однако эти замечания не имеют существенного значения.

Диссертационная работа А.В. Ушакова отличается фундаментальностью и высоким научным уровнем проведенных исследований с использованием самых современных экспериментальных методов, многосторонним детальным подходом к процессу получения нанодисперсных и нанокompозиционных материалов в плазме дугового разряда низкого давления и исследования их физико-химических и технологических свойств, а также практической важностью полученных результатов исследований.

Без сомнения, диссертационная работа А.В. Ушакова соответствует всем требованиям, в том числе пункта 9, Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям; она является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области порошковой металлургии и композиционных материалов; ее автор, Анатолий Васильевич Ушаков, достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Зав. кафедрой «Металловедение,
порошковая металлургия, наноматериалы»,
Самарского государственного технического
университета, д.ф.-м.н., профессор
Телефон: (846) 242-28-89. E-mail: egundor@yandex.ru.
443110, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус.


Амосов
Александр
Петрович

Доцент кафедры «Металловедение,
порошковая металлургия, наноматериалы»,
Самарского государственного технического
университета, к.т.н., доцент
Телефон: (846) 242*28-89. E-mail: schiglou@yandex.ru.
443110, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус.


Кондратьева
Людмила
Александровна

Подпись А.П. Амосова и Л.А. Кондратьевой заверяю
Ученый секретарь ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет»,
доктор технических наук



Ю.А. Малиновская

17.11.16