

## ОТЗЫВ

на автореферат кандидатской диссертации Г.В. Трусова  
«НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МИКРОСФЕР Ni ИЗ РЕАКЦИОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ И  
СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ИСКРОВОГО  
ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ МИКРОСФЕР»

Процесс растворного СВС наноструктурных материалов, называемый в рассматриваемой диссертации синтезом горения растворов (СГР), привлекает большое внимание исследователей из-за своей простоты и эффективности, надежды на масштабирование и создание промышленных производительных технологий наноструктурных материалов. Особый интерес представляет разработка модифицированного метода пиролиза аэрозолей, основанного на комбинации СГР и пиролиза аэрозолей, который позволяет расширить спектр производимых структур до наноструктурированных микросфер и использовать их для получения высокопористых материалов с ячейками микронных размеров методом искрового плазменного спекания (ИПС). В связи с этим актуальность диссертации Г.В. Трусова не вызывает сомнения.

При проведении диссертационных исследований Г.В. Трусовым получен ряд новых важных научных результатов. По результатам экспериментального исследования закономерностей формирования микрочастиц в трубчатом проточном реакторе впервые определено влияние соотношения горючее/окислитель, концентрации реагентов, температуры и атмосферы газа-носителя на фазовый состав, размер кристаллитов, диаметр микросфер, образующихся в процессе пиролиза и горения реакционных аэрозолей. Показано, в частности, что полые микросферы Ni с наноструктурированными оболочками формируются при температуре выше  $500^{\circ}\text{C}$  и соотношении горючее/окислитель  $\geq 2$  в неокислительной атмосфере (Ar, N<sub>2</sub>). Впервые исследованы микроструктура и атомно-кристаллическая структура реакционного геля, образующегося из водного раствора нитрата никеля и глицина. Показано, что вначале образуется гель с аморфной структурой, который при термообработке или длительной сушке постепенно кристаллизуется, формируя новый энергетический материал. Исследован механизм пиролиза реакционного геля методами ДСК и МС; с помощью динамической рентгенографии определена динамика образования кристаллических фаз продуктов реакции *in situ* в волне горения частиц реакционного геля. На основании полученных результатов разработана новая макрокинетическая модель формирования полых микросфер из частиц геля. Впервые с помощью искрового плазменного спекания без нагрузки полых никелевых микросфер получены материалы с пористостью до 92% и установлен механизм формирования высокопористых структур в данных системах, заключающийся в одновременном уменьшении пористости стенки микросферы (спекание наночастиц), уменьшении диаметров микросфер (с увеличением толщины их стенок) и образовании шеек между микросферами. Установлено, что полые металлические микросферы никеля после пропускания электромагнитного СВЧ-излучения обладают магнитными потерями в пределах диапазона 1- 15 ГГц с максимумом магнитных потерь расположенным на частоте 4 ГГц, отнесённому к ферромагнитному резонансу в магнитных оболочках, сравнимому по поведению с тонкими плёнками с учётом влияния сферической геометрии, что позволяет их считать перспективным материалом для экранирования электромагнитного излучения. Установлено, что полые металлические

микросферы никеля в процессах паровой конверсии этанола обладают высокой каталитической активностью при низкой температуре 250°C и высокой селективностью по водороду ~ 50%, а композитные нанопорошки Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обладают каталитической стабильностью на протяжении двух десятков часов. Выявлен механизм разрушения спечённых пористых образцов в процессе одноосного сжатия, заключающийся в прохождении линии излома по зонам контакта микросфер в случае высокопористых материалов пористостью  $\geq 88\%$  и по серединам микросфер при пористости в интервале 53% – 88%. Впервые определена прочность на сжатие отдельных микросфер методом наномеханического тестирования с одновременным наблюдением в просвечивающем электронном микроскопе; результаты показали, что модуль упругости и предел прочности отдельной микросферы выше, чем у спеченного высокопористого материала. Установлено, что температуропроводность высокопористого материала на основе полых микросфер никеля составляет 4,2 мм<sup>2</sup>/с, что в 5 раз ниже, чем температуропроводность беспористого никеля (22 мм<sup>2</sup>/с), а теплопроводность примерно в 70 раз ниже теплопроводности беспористого никеля (89,8 Вт/(м\*К)), что указывает на возможность создания данным методом металлических теплоизолирующих материалов.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследований заключается в установлении закономерностей и механизмов горения реакционных гелей и аэрозолей, образующих твердые продукты, которые вносят вклад в теоретические основы физики и химии горения водных растворов, содержащих органическое горючее и неорганический окислитель. Исследования микроструктуры и атомно-кристаллической структуры реакционных гелей, показывающие формирование новых аморфных и кристаллических энергетических материалов, позволяют по-новому взглянуть на механизмы физико-химических превращений, происходящих в процессе синтеза широкого круга материалов методами горения растворов и гелей. Разработанный и запатентованный модифицированный одностадийный метод синтеза полых металлических микросфер никеля Ni комбинацией методов горения растворов и пиролиза аэрозолей имеет практическое значение для изготовления защитных экранов от СВЧ излучения в диапазоне 1-15 ГГц, катализаторов с высокой активностью, селективностью и стабильностью что позволяет рекомендовать их для промышленного использования, в том числе замены дорогостоящих импортных катализаторов. Разработанный и запатентованный новый способ создания материала пористостью до 92%, на основе полых микросфер никеля, консолидированных методом искрового плазменного спекания может быть использован для создания легких и прочных материалов и изделий (модуль Юнга 0.4 ГПа при пористости 92% и удельном весе 0,7 г/см<sup>3</sup> и др.), обладающих хорошими теплоизолирующими свойствами (в 70 раз ниже теплопроводности беспористого никеля) при нормальной и повышенной температуре.

По содержанию автореферата возникли следующие замечания.

1. В автореферате на стр. 8 утверждается, что метод СГР позволяет на основе недорогих компонентов и с очень высокой скоростью синтеза получать большие объёмы высокоомогенизированных порошков необходимого размера и состава. Однако представленные результаты по синтезу в экспериментальной установке, показанной на рис. 1, когда реакционная смесь с общей концентрацией реагентов 0,5 М, помещалась в рабочую камеру ингалятора, после распыления аэрозоль водного раствора поступал в трубчатую печь с потоком газа-носителя со скоростью 1 – 4 л/мин, а на выходе из трубчатой печи аэрозоль продуктов реакции улавливался стеклянным пористым фильтром

Шотта, подсоединённым к водоструйному насосу, позволяют усомниться в очень высокой скорости синтеза и получении больших объёмов порошков. Короче говоря, необходимо было привести данные по производительности этой экспериментальной установки.

2. Не проведено исследование по возможности масштабирования разработанного процесса получения микросфер никеля, например, при увеличении диаметра сопла ингалятора, скорости подачи реакционного раствора и т. п., что важно для применения разработанного процесса в качестве основы промышленной технологии.

3. Нельзя признать удачным использование слово «темплат» на стр. 3 автореферата в предложении: «Пористые структуры получают путём спекания порошков с использованием извлекаемых темплатов и порообразователей или ограничением давления и температуры процесса.» Согласно металлургическому словарю: «ТЕМПЛЕТ — [templet, template] - плоский образец, вырезанный из металлического полуфабриката или изделия для изучения микроструктуры или механических свойств.»

Однако эти недостатки не имеют существенного значения. В целом работа выполнена на высоком научном уровне и имеет большое научное и практическое значение. Она выделяется не только высоким научным уровнем, но и большим объемом проведенных исследований и полученных результатов, достаточным для двух кандидатских диссертаций: одной – по синтезу микросфер никеля, второй – по применению микросфер никеля для получения высокопористых материалов с ячейками микронных размеров методом ИПС. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, в том числе п. 9, к кандидатским диссертациям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842. Автор диссертации, Трусов Герман Валентинович, достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Автор отзыва дает согласие на обработку персональных данных.

Зав. кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», доктор физико-математических наук (01.04.17 – Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва), профессор

Амосов  
Александр Петрович

Тел. (846) 242-28-89. E-mail: [egundor@yandex.ru](mailto:egundor@yandex.ru).  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус.

30 мая 2023 г.

Подпись А.П. Амосова удостоверяю  
Ученый секретарь ФГБОУ ВО «СамГТУ»  
доктор технических наук



Ю.А. Малиновская