

# РАЗВИТИЕ РАБОТ В ОБЛАСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

И.М. КАМЕНСКИХ, В.Ф. ПЕТРУНИН

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ*

## Введение

Наноиндустрия должна стать основой 6-го экономического уклада и помочь выйти из экономического кризиса, в первую очередь начавшим раньше и успешно разрабатывающим наноматериалы и нанотехнологии. России для этого необходимо не только изучать и перенимать зарубежный опыт, но и опираться на свой значительный и во многом приоритетный задел [1].

Нанотехнологии – «ключевые» технологии современности, которые на какой-то период времени будут определять развитие всех других технологий. Основой нанотехнологий являются материалы со структурными элементами нанометрового масштаба [2]. Понятия «нанокристаллический» и «наноструктурный» материалы были введены Г.Глейтером для слабокристаллизованных тонких пленок, целенаправленные исследования особенностей структуры и свойств которых начались в 80-е годы прошлого столетия, признание важности и государственную поддержку получили в США и Японии в 90-е годы, а теперь более 50 стран развивают нанотехнологии в качестве приоритетного научно-технического направления [3]. В нашей стране исторически первыми наноструктурированными материалами были специально разработанные для промышленного производства и успешно использованные ещё в 50-е годы XX в. оксалатные металлические порошки, при решении проблем «уранового проекта» [4]. Разделение изотопов урана на заводе УЭХК проводилось с помощью диффузионного метода, при этом размеры пор и качество фильтров из никелевых порошков определяли эффективность всего метода газовой диффузии. В середине 50-х годов на УЭХК были созданы уникальные нанотехнологии двухслойных никелевых фильтров с размером пор около 90 нм. За 20 лет себестоимость была снижена в разы, а размер пор уменьшен до 16 нм. Основой технологии являлось электрохимическое и термодиффузионное диспергирование никеля, последующая непрерывная прокатка и спекание в атмосфере водорода никелевых порошков в пористую ленту толщиной около 90 мкм. За разработку этих фильтров и организацию их массового производства (до 60 млн шт./год) разработчикам была присуждена в 1958 году Ленинская премия (И.Д. Морохов, В.Н. Лаповок, С.П. Чижик Ю.Л. Голин др.).

После того как технология получения урана перешла на новый метод, эти материалы оказались не нужными. Но еще тогда было замечено, что эти материалы обладают необычными свойствами, например, окисляясь на воздухе могли нагреваться до температуры 800 – 1000 градусов, и рядом других необычных свойств. В 60-е годы был разработан и опубликован левитационный (испарением и конденсацией) метод получения ультрадисперсных (нано-) порошков [5], а в 70-е годы – с помощью электрического взрыва проводников [6]. В 1975 году руководством Минсредмаша была поставлена задача перед группой ученых изучить необычные свойства наноматериалов и найти им возможные сферы применения. Был сделан обзор литературных данных, позволивший понять почему при размерах меньше 100 нм тот или иной материал приобретает необычные свойства. Соизмеримость с фундаментальными физическими величинами: длиной свободного пробега электронов в металлах, размером магнитного домена в магнитных материалах, размером электрического домена в сегнетoeлектриках, механически протяженными дефектами (дислокация и дисклинация), амплитудой тепловых колебаний атомов (фононов) и др. [7]. Оказалось, что очень многие фундаментальные физические величины в твердом теле имеют масштаб от 1 до 100 нанометров. И когда размер частицы порошка или материала становится равной или сравнимой с той или другой физической величиной, то его соответствующие свойства меняются. Этот обзор был доложен в 1977 г. заместителю Министра Морохову И.Д., а потом Президенту Академии наук СССР Александрову А.П., высоко оценившим обнаруженную закономерность.

После этого в открытом (гражданском) варианте новое научно-техническое направление «Ультрадисперсные системы» оформилось созданием координационного Совета при АН СССР (предс. Морохов И.Д., уч. секр. Петрунин В.Ф.) и успешно развивалось до 1992 г., однако менее успешно — позже. Было проведено три всесоюзных конференции «Физикохимия ультрадисперсных систем» и более 20 семинаров. Сейчас из 2 тысяч специалистов, работавших в этой сфере перед распадом СССР, только около 50 остались в России, а более 100 работают за рубежом. Для развития способов получения и организации производства ультрадисперсных (нано-) порошков в НПО «Красная Звезда» в 1978 г. была создана специальная лаборатория. С этой же целью совместным приказом МИНСРЕДМАША СССР и МИНВУЗа СССР в 1979 г. была создана отраслевая лаборатория Росатома в МИФИ «Ультрадисперсные (нано-) материалы». Это была первая лаборатория в учебных заведениях и одна из первых в нашей стране, которой специально задачей ставилось изучение особенностей атомного строения и свойств ультрадисперсных (нано-) сред и других материалов с несовершенной структурой. Сотрудники этой лаборатории вместе с другими энтузиастами возобновили в 1996 г. и провели IV-VIII Всероссийские конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем».

## Фундаментальные исследования

Особенности наноструктурного (ультрадисперсного) состояния вещества наиболее заметно проявляются при изучении разделенных наночастиц, когда их размер можно рассматривать как физический параметр наряду с составом, температурой и давлением. К главным физическим причинам особенностей ультрадисперсных (нано-) материалов можно отнести три: ограничение действия законов классической физики из-за малого размера, значительный рост удельной поверхностной энергии и экстремальные условия синтеза. По этим причинам наноструктурные материалы являются одним из видов неравновесного состояния вещества, в котором могут реализовываться нестабильные (метастабильные) структуры (фуллерены, нанотрубки), высокотемпературные фазы (алмаз, кубический оксид циркония), структурная, концентрационная или фазовая неоднородности по радиусу наночастицы и другие [8]. По критерию, предложенному Л.Д. Ландау, — по функции атомного распределения — наноматериалы занимают промежуточное положение между кристаллами и аморфными веществами (рис. 1).

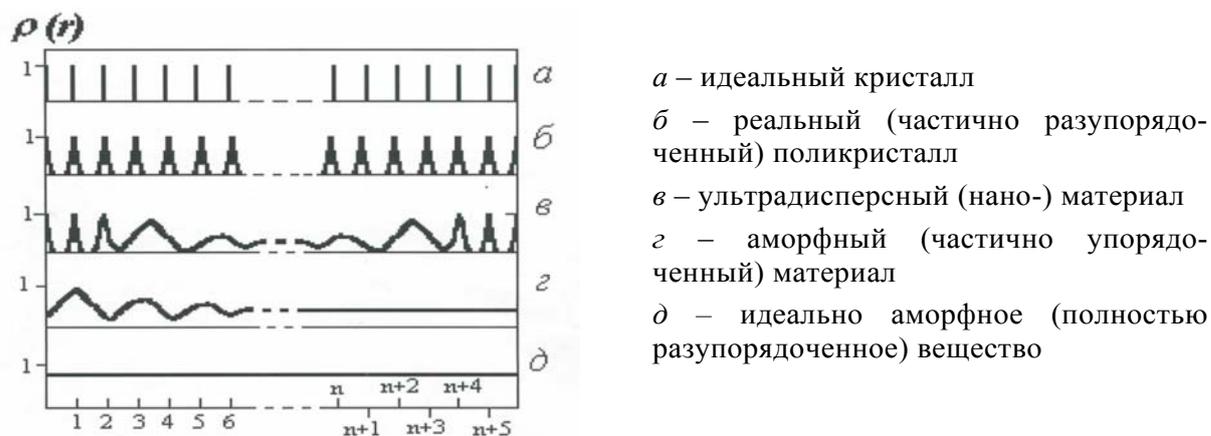


Рис. 1 Функция атомного распределения

Этим обуславливаются особенности свойств ультрадисперсных (нано-) материалов которые часто своеобразны, а иногда уникальны, что можно широко использовать практически. Свойства наносистем определяются, в первую очередь, свойствами индивидуальных наночастиц и их взаимодействием. Первые зависят от элементного и фазового состава, атомного строения (типа и степени упорядочения), дефектности и морфологии, размера и количества кристаллитов. Вторые определяются размером взаимодействующих частиц, их поверхностной энергией, концентрацией и равномерностью плотности. И те и другие проявляют размерную зависимость, а при размерах сравнимых с длиной волны де Бройля появляются и квантовые размерные эффекты.

Обобщая многочисленные расчетные и экспериментальные данные, можно отметить, что отличие свойств наноматериалов по сравнению со свойствами аналогичных крупнокристаллических проявляется следующим образом [9]. **Механические:** увеличение твердости (из-за отсутствия протяженных дефектов) (рис. 2) в сочетании с высокой (супер-) пластичностью (благодаря развитой сетке границ), увеличение предела текучести, уменьшение порога хладноломкости. **Электрические:** размерная зависимость работы выхода электронов и электросопротивления, полупроводниковый характер проводимости очень малых наночастиц металлов (из-за ограниченного числа свободных электронов). **Магнитные:** суперпарамагнетизм (при размере частиц менее 1 домена), максимальная коэрцитивная сила в монокристаллических частицах, гигантское магнетосопротивление. **Термические:** уменьшение температур Дебая, плавления, фазовых переходов, спекания на 15 — 20 % (из-за изменения спектра фононов) при увеличении коэффициента термического расширения (рис.3) и теплоемкости. **Оптические:** изменение электромагнитных спектров излучения и поглощения, увеличенное рассеяние, способность реализации «черного тела». **Химические:** увеличение растворимости (до 20 — 25 %) в кислотах, понижением температур химических реакций, отсутствие «индукционного» периода.

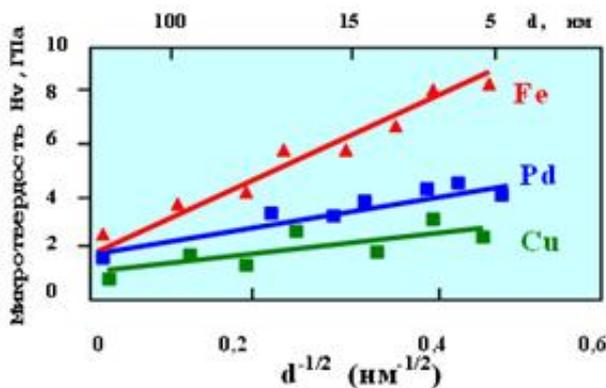


Рис. 2 Влияние размера зерна на микротвердость

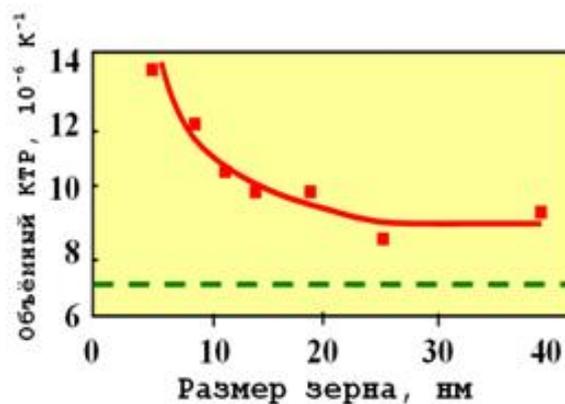


Рис. 3 Влияние размера на коэффициент термического расширения селена

Стоит заметить, что некоторые свойства зависят от размера частиц, а некоторые от размера кристаллитов (доменов) (рис. 4), что надо учитывать при разработке и использовании наноструктурных материалов [10].

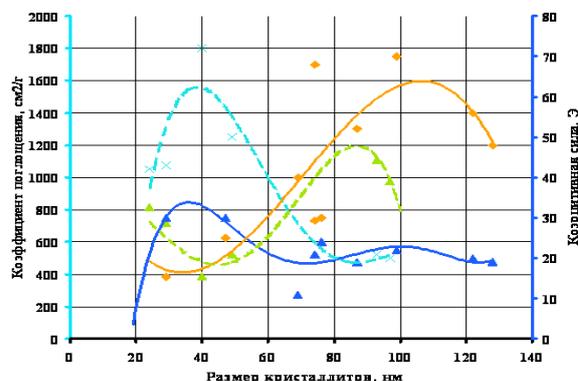


Рис. 4 Зависимость оптических и магнитных характеристик НП феррит-гранатов от размера зерна (кристаллитов)

### Способы получения

С 1996 г. работы по ультрадисперсным (нано-) материалам ведутся в рамках отраслевых научно-технических программ (Л.Д. Рябев, И.М. Каменских, В.Ф. Петрунин), включающих получение ультрадисперсных порошков и других наноматериалов, исследования свойств, разработку методик аттестации, а также их использования для улучшения характеристик материалов и совершенствования технологий, применяемых на предприятиях атомной энергетики и других отраслей [10]. В различных организациях разработано несколько способов получения ультрадисперсных (нано-) материалов: химический способ получения нано-кристаллических оксидных порошков (МИФИ); электрохимический способ получения нанопорошков (Уральский Электрохимкомбинат); способ получения нанокристаллических порошков металлов из их гидридов (ОАО ВНИИНМ); плазмохимический способ получения нанокристаллических порошков (Сибирский химический комбинат); лазерно-плазменный синтез алмазных пленок (в ГНЦ РФ ТРИНИТИ); детонационный способ получения наноалмазов (комбинат Электрохимприбор); жидкометаллическая технология получения наноматериалов (ГНЦ РФ – ФЭИ и ОЦНТ г. Обнинск); АДУ – технология получения нанопорошков  $UO_{2+x}$ .

Химический метод [11] синтеза нанокристаллических оксидных порошков представляет собой двух-стадийный процесс, заключающийся в синтезе прекурсора с последующей его термообработкой до нанокристаллических оксидов. Данный метод позволяет в широких пределах варьировать морфологию (размер и форму), атомно-кристаллическую структуру и химический состав получаемых частиц (в случае многокомпонентных систем). Схема химического процесса, используемого в этом методе следующая.



Специалисты ГНЦ РФ-ФЭИ и ОЦНТ разработали и довели до практической реализации новую и по ряду признаков уникальную технологию получения наноматериалов [12], заключающуюся в управляемом селективном окислении металла, растворенного в инертной по отношению к используемому окислителю жидкометаллической среде. Процесс отработан в лабораторных условиях, показана возможность перехода к опытно-промышленной реализации данной технологии. Материалы, получаемые указанным методом, в силу своей волокнистой наноструктуры (характерный размер волокон (диаметр) в зависимости от условий синтеза -5-50 нм, шаг между волокнами – 5-100 нм) обладают чрезвычайно высокой контролируемой открытой пористостью (до 99%) и удельной поверхностью (до 800 м<sup>2</sup>/г), рекордно низкой теплопроводностью (0,01-0,03 Вт/(мхК) при 130-1500 К) и плотностью (примерно 0,03-0,04 г/см<sup>3</sup> в исходном состоянии), а также высокой каталитической и сорбционной активностью. Важнейшим качеством этих материалов является длительная устойчивость их структуры при высоких температурах (вплоть до 1000°С в исходном виде и до 1500° после проведения их химической модификации). Установлено, что синтезируемый наноматериал является уникальным сырьем при создании новых материалов для конкретных прикладных задач: катализ, сорбция, новые керамические композитные и функциональные мембраны топливных элементов, высокотемпературные фильтроматериалы, полимерные и резинотехнические изделия и др.

Одно из основных направлений имеющих, важное значение для отрасли атомной энергетики, применение наноматериалов в производстве топливных таблеток из диоксида урана. Исследования отраслевой лаборатории МИФИ совместно с ВНИИХТ показали, что использование нанопорошков позволяет модернизировать технологию производства или повысить характеристики топливных таблеток [13]. Так, было выяснено, что при добавлении нанопорошков диоксида урана в крупнокристаллические традиционные порошки при спекании топливных таблеток можно либо снизить температуру спекания на 15 %, либо увеличить размер зерна с 8-10 микрон до 25-30 микрон, что увеличивает их ресурс и позволяет использовать такие таблетки в новых типах реакторов (рис. 5).

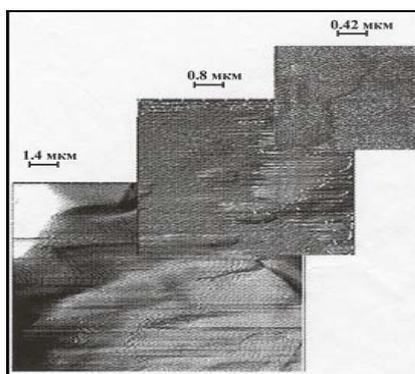


Рис. 5 АСМ-изображение участков поверхности спечённых топливных таблеток

Известно что, оксиды некоторых редкоземельных металлов и в первую очередь диспрозия, эффективно поглощают нейтроны. Сотрудниками МИФИ показано (рис. 6), что нанопорошки этих металлов, будучи добавленными в крупнокристаллические, позволяют получить компактные нейтроно-поглощающие материалы для систем управления защиты реактором. А оксиды тяжелых металлов свинца и молибдена могут быть использованы для повышения эффективности и облегчения защиты от рентгеновского и гамма-

излучения в медаппаратуре, спецодежде, а также для покрытия стен помещений, где присутствуют большие фоны рентгеновского излучения.

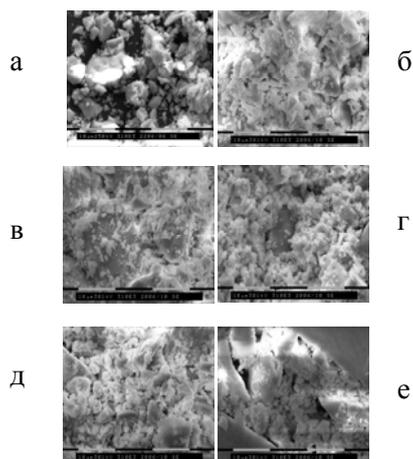


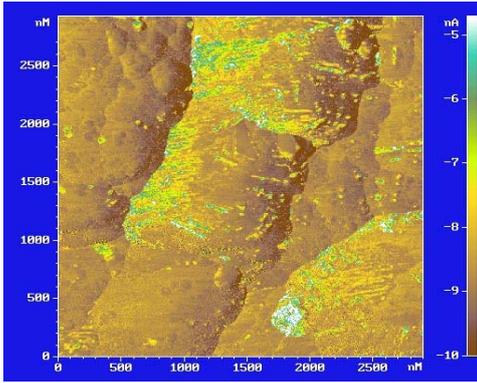
Рис. 6 СЭМ микрофотографии порошка (а) и керамики (б-е)  $Dy_2Hf_2O_7$ , полученной при различных условиях горячего прессования: б -  $1100^{\circ}C/5$  мин; в -  $1100^{\circ}C/10$  мин; г -  $1100^{\circ}C/20$  мин; д -  $1100^{\circ}C/60$  мин; е -  $1200^{\circ}C/20$  мин

Разработанные в отраслевой лаборатории МИФИ нанокристаллические порошки оксидов иттрия, титана и магний-алюминиевой шпинели использованы для нанодисперсионного упрочнения конструкционных сталей. В ВНИИНМ разработаны [14] технологии получения (ДУО)-мартенситных сталей со свойствами, обеспечивающими при использовании их в качестве конструкционных материалов для оболочек реакторов на быстрых нейтронах, что повышает конкурентоспособность таких реакторов за счет достижения необходимого уровня выгорания; разработаны рекомендации по выбору технологической схемы создания новых металлургических производств ДУО-сталей.

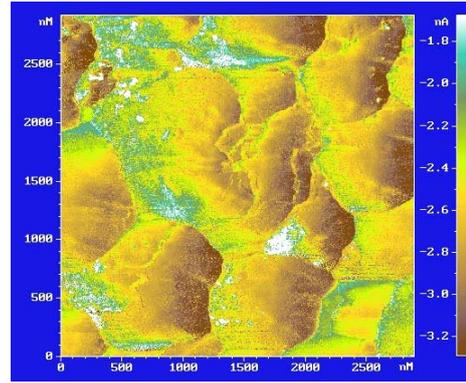
На СХК созданы установки по выпуску 24 тонн в год нанокристаллических порошков оксидов металлов, которые могут быть сырьем для получения изделий конструкционной керамики [15]. В установках осуществляется плазмохимический синтез, в частности происходит термическое разложение диспергированных на капли растворов солей металлов в плазме дугового и высокочастотного разряда. Полученная керамика имеет следующие характеристики.

Материал керамики	Размер частиц, мкм	Относительная плотность	Прочность на изгиб, МПа	Твердость, ГПА
$Al_2O_3$	1–1,5	0,92	350	18–20
$ZrO_2 + 3$ моль % $Y_2O_3$	0,4–0,6	0,95	400	10–12
76 % $ZrO_2 + 20$ % $Al_2O_3 + 4$ % $Y_2O_3$	0,3–0,6	0,98	1100–1200	15–16

Керамические изделия успешно работают в тяжелых условиях трения и износа в различных областях техники благодаря: высокой стойкости режущей кромки лезвия при резке труднообрабатываемых материалов; стойкости в агрессивных средах; высокой прочности и вязкости; высокой износостойкости. Защитные пластины для центрифуг (СвердНИИХИМмаш) из нанокерамики на основе оксида алюминия с высокой износостойкостью изготавливаются из наноразмерных порошков магнитно-импульсным прессованием и спеканием.



Спекание при 1450 °С, 6 мин d = 190 нм



Спекание при 1450 °С, 30 мин d = 260 нм

Рис. 7 АСМ-изображение нанокерамики для деталей центрифуг

Разработана (ВНИИНМ) и запатентована технология получения нанокристаллических магнитных материалов методом центробежного распыления расплава, создано [14] первое и пока единственное в России их опытно-промышленное производство. Нанокристаллические магнитные материалы превосходят известные ферриты бария и стронция по магнитной энергии в 6—8 раз. Высокие магнитные свойства композитных магнитов достигаются при точном соблюдении фазового состава материала и создании структуры с размером кристаллитов основной магнитной фазы 20—30 нм. Для этого используется многоэтапная технология, включающая: получение слитков исходных сплавов в вакуумных индукционных печах; центробежное распыление и получение порошков сплавов в аморфном состоянии; кристаллизационный отжиг и получение порошков с требуемой нанокристаллической структурой.

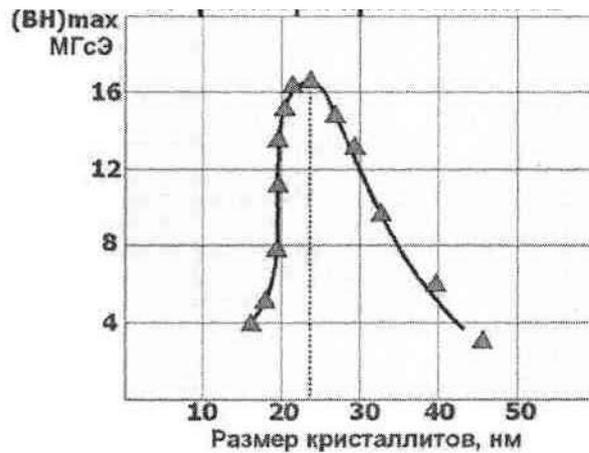


Рис. 8 Зависимость магнитной энергии от размера кристаллитов

Разработаны (ВНИИНМ) технические высокопрочные Cu-Nb тонкие провода диаметром от 0.4 до 0.05 мм со следующими свойствами: предел прочности 1300-1600 МПа, электропроводность 70-80 % от меди. Показана принципиальная возможность создания контактных проводов нового поколения с существенно более высоким комплексом свойств путем использования наноструктурных компонентов. Получены (ВНИИНМ) нанопорошки Ta и Nb для высокоемких конденсаторов, с рекордными электрофизическими свойствами: с удельным зарядом до 150 000 мкКл/г [14].

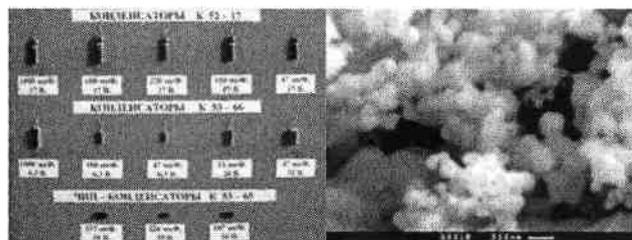


Рис. 9 Высокоемкие конденсаторные нанопорошки Ta и Nb: а- конденсаторы; б- нанопорошки

## Нанотехнологии и нанопродукция

Несмотря на известные экономические трудности 90-х годов прошлого столетия, но благодаря целевым программам в атомной отрасли в настоящее время имеется значительный интеллектуальный, методический и производственный потенциал для создания наноиндустрии. На родине наноразмерных материалов УЭХК сохранено [15] производство никелевых порошков с размерами кристаллитов от 10 до 30 нм, никелевых пористых лент и продукции на их основе: аккумуляторов и генераторов (рис. 10), фильтрующих элементов и фильтров с тонкостью фильтрации до 10 нм. Эти фильтры используются в атомной промышленности для улавливания радиоактивных аэрозолей, применяются в электронной промышленности для чистых комнат, а также в микробиологической, фармацевтической и пищевой промышленности для стерилизации газов. Фильтры превосходят зарубежные аналоги по фактическому количеству стерилизаций и дешевле по цене.



ЭХГ с жидким циркулирующим электролитом



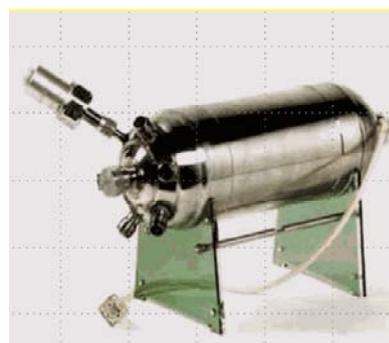
Электромобиль «Антэл-2» с генератором «Фотон МВВ»



Батарея аккумуляторная 20НКБН-25-У3



Никель-водородная аккумуляторная батарея 21НВ-7

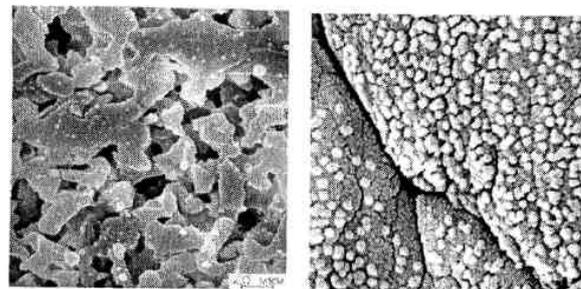
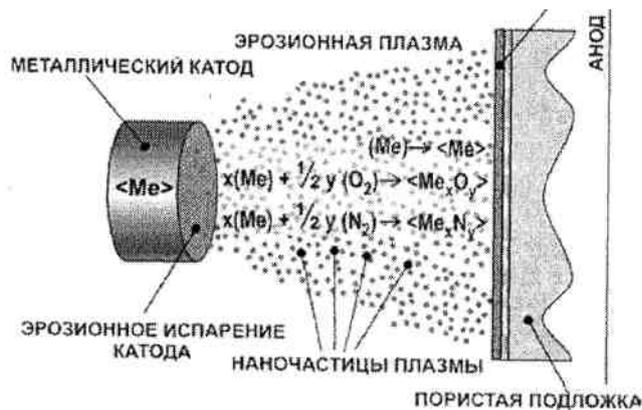


Никель-водородная аккумуляторная батарея 21НВ-7

Рис. 10 Продукция УЭХК выпускаемая с применением нанотехнологий

Крупным направлением работ с использованием наноструктурных компонентов является производство нейтрализаторов выхлопных газов. На сегодня в России УЭХК – единственное предприятие, которое системно и эффективно работает в направлении развития автокатализаторов. Результаты исследовательской деятельности, и самостоятельной, и в кооперации с научными центрами, позволяют обеспечить ужесточающиеся требования по выбросам отработанных газов двигателей (Евро-2,3,4) при постоянном снижении расхода драгоценных металлов.

В ГНЦ РФ- ФЭИ и ОЦНТ создан [12] широкий набор наноструктурных фильтрующих мембран для очистки жидкостей и газов. Это позволяет подбирать оптимальные свойства мембран в зависимости от состава очищаемой жидкости и условий фильтрования. Фильтрующие элементы, сорбенты, катализаторы изготавливаются по технологии плазмохимического синтеза наноструктурных мембран на пористых подложках. В зависимости от назначения и условий фильтрования подложка может быть полимерной, керамической, металлической или композиционной. Наноструктурированные мембраны обеспечивают высокую тонкость фильтрации и возможность эффективной регенерации (самоочистки) без разборки конструкции фильтров. Авторы проекта уже сейчас располагают базой данных, которая позволяет выбирать требуемые параметры мембраны и подложки для конкретных задач фильтрации. То есть, создан принципиально новый класс фильтрующих материалов, которые имеют наноразмерную структуру, обуславливающую ряд важных технико-экономических преимуществ (рис. 11,12).



а б

Рис.11 Схема нанесения мембран на поверхность подложки

На основе аэрогелевых нанопорошков совместно с НПО «Технология» сотрудники ОЦНТ разработали и освоили производство широкого ассортимента керамических изделий: подшипники и другие пары трения из карбида кремния, тигли и стаканы из оксида алюминия, автомобильные свечи, уплотнительные кольца, зубья шнеков дробления из диоксида циркония, чувствительные элементы (твердые электролиты) датчиков газовых примесей в жидких металлах и в воздухе.

Для формируемой нанoeлектроники России в ТРИНИТИ разработаны мощные источники экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения для литографических установок, обеспечивающих разрешение элементов полупроводниковых схем ~32 нм. Технология таких источников основана на использовании плазмы Z-пинча в ксеноне или вакуумной искры в парах металла (олова), инициируемой эксимерным лазером и эффективно излучающей в диапазоне 13,5 нм. Выбор длины волны излучения 13,5 нм обусловлен использованием многослойных MoSi зеркал с высоким коэффициентом отражения (~70%) в литографической установке для оптической системы сбора и проецирования излучения на фоторезист. Средняя мощность излучения 200 Вт, частота следования импульсов до 4 кГц, размер плазмы (по полувысоте профиля яркости) 0,5x1,5 мм<sup>2</sup>, ресурс 100 млн. импульсов. Созданные источники предназначены для производства сверхбольших интегральных схем следующего поколения.



а б

Рис. 13 Источники с использованием плазмы Z-пинча (а) и с использованием вакуумной искры в парах металла (б).

Поскольку борсодержащие порошки в наноразмерном состоянии приводят к увеличению коэффициента поглощения нейтронов в 1,5 раза и коэффициента рассеяния гамма-излучения на 30-50%, то использование (НИКИМТ, МИФИ) нанопорошков В<sub>4</sub>С или ВN совместно с нановольфрамом в композитах (рис. 14) позволяет получать универсальные радиационнозащитные материалы [16]. Опытные образцы из разработанного нанокompозита подвергали радиационным испытаниям путем гамма и нейтронного облучения. По результатам проведенного исследования предложена новая конструкция транспортного универсального контейнера ТУК-84, которая по сравнению с используемым в настоящее время позволяет снизить вес ТУКа на 20-30%, что ведет к увеличению его загрузки на 10-30%, т.е. может быть уменьшен потребный парк ТУКов и, следовательно, стоимость обслуживания ОЯТ может быть значительно снижена. Использование прочного алюминиевого сплава в качестве основы увеличивает теплопроводность нейтронозащитных материалов, а высокотвердые упрочняющие наночастицы из В<sub>4</sub>С или ВN повышают

прочность композитов без снижения нейтронозащитной способности и жесткости ТУКов, что создает необходимые условия для безопасного хранения и транспортировки ОЯТ. Использование композитов для нейтронной защиты в хранилищах ЯТ (Новосибирский комбинат химконцентратов) приведет к повышению ядерной и экологической безопасности и улучшению условий труда обслуживающего персонала при его хранении.



Рис. 14 Алюминийматричные борсодержащие композиты (боралкомы)

Ультрадисперсный (нано-) бериллий, разработанный [14] первоначально как перспективный материал для изготовления окон рентгеновских трубок, пропорциональных счетчиков гамма-излучения, полупроводниковых детекторов электронных пушек оказался представляющим большой интерес при разработке микросфер-капсул для водородной мишени лазерного термоядерного реактора. Поэтому во ВНИИНМ начато изготовление различных деталей специального назначения (рис. 15).



Рис. 15 Длинномерная деталь из пористого нанобериллия. Длина трубчатой части – 600 мм, диаметр – 40 мм, плотность – 0,27 г/см<sup>3</sup>. Диаметр фланца – 108 мм, толщина – 8 мм, плотность – 0,40 г/см<sup>3</sup>. Прочность при сжатии материала: в трубчатой части – 24 МПа, во фланцевой части – 45 МПа.

На основе технологии получения ультрадисперсных (нано-) порошков алмазов [9] на комбинате «Электрохимприбор» разработаны нанотехнологии для получения абразивов и абразивных паст, присадки к промышленным маслам, композиционных электрохимических покрытий инструментов и конструкционных деталей (рис. 16). Абразивы предназначены для шлифовки и полировки плит из мрамора, гранита, керамики. Присадки имеют немного отличающиеся и дополняющие друг друга характеристики и назначения: АЛКОН – антифрикционная и упрочняющая к индустриальным и моторным маслам, АСТА – каталитическая и восстановительная, БАГТИ – антифрикционная и восстановительная. Моющеполирующее средство ФИД предназначено для обработки изделий из мягких сплавов, в т.ч. посуды и ювелирных изделий, а полирующая паста ФИН предназначена для финишной тонкой обработки лазерных зеркал и других высокотехнологических поверхностей до 13-14 классов шероховатости и выше. Наноконпозиционные покрытия инструментов, изделий и деталей позволяют улучшить их характеристики: твердость и износостойкость, жаростойкость, защитно-декоративную и антикоррозионную отделку, восстановление размеров, электропроводность и отражательную способность и др.



Рис. 16 Конструкционные детали, инструменты, изделия с хромалмазным покрытием

В НПО «Луч» разработана нанотехнология изготовления бесшовных труб (диаметром 5-60 мм и толщиной стенки 3,0-0,05 мм) и трубчатых переходников (диаметром 8-30 мм и толщиной 2,0-0,3 мм) цирконий (титан) – нержавеющая сталь (рис. 17), которая базируется на экструзии заготовки, герметизированной в оболочке, прецизионном профилировании методами обработки давлением, с использованием термообработки и облагораживающих химических процессов. При этом используются эффекты нанолегирования: переход  $\omega$  - фазы в стабильное состояние, удвоение прочности и повышенная, сравнимая с платиной, химическая стойкость.



Рис. 17 Трубчатые переходники и биметаллические трубы с поперечной слоистостью

Типографские краски, разработанные в МИФИ, для защиты ценных бумаг и изделий от подделки на основе ультрадисперсных (нано-) порошков (с размерами частиц 0,005–0,5 мкм), изготовленных в СХК, в качестве пигментов обладают совокупностью трех защитных признаков (магнитные свойства, цвет, ИК-прозрачность) и позволяют идентифицировать продукцию (или упаковку) (рис.18). Проведены лабораторные и производственные испытания нано-красок в ЗАО «Опцион» (печать ценных бумаг) и в Объединении «Гознак» [17].



Рис. 18 Примеры типографских оттисков с идентификационными признаками нано-краски

В МИФИ разработаны [18] тонкие нанокompозитные многослойные радиопоглощающие материалы для защиты потребителя от электромагнитного излучения (мобильного телефона, СВЧ-печи и др.). Толщина материала 1-2 мм, плотность материала 0,3 г/см<sup>3</sup>, диапазон СВЧ-поглощения 0,8÷12,0 см. Окна прозрачности для основной частоты передающе-приемных устройств любые в диапазоне 0,8÷12,0 см, в зависимости от параметров защищаемого устройства. Среднее ослабление излучения в указанном 10 дБ, пиковое ослабление излучения 40 дБ. Количество слоев материала может быть от 5 до 10 в зависимости от параметров защищаемого устройства.

#### Выводы

В атомной отрасли России созданы значительный исторически приоритетный научно-производственный, методический и интеллектуальный задел, а также отраслевой коллектив высококвалифицированных специалистов в области наноматериалов и нанотехнологий. Для использования имеющего задела в планах дальнейшего развития атомной энергетики Росатому необходима специальная отраслевая программа работ по разработке и применению ядерных наноматериалов и нанотехнологий, чтобы создать наноиндустрию отрасли и обеспечить конкурентоспособность на российском и международном рынках. Для более успешного участия организаций и предприятий Росатома в конкурсах ФЦП и ГК «Роснотех» необходимо создать отраслевой научно-образовательный центр «НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ», который смог бы координировать работы организаций и предприятий отрасли и более эффективно использовать имеющийся потенциал.

#### Литература

1. Петрунин В.Ф. VIII Всерос. конф. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем//10-14 ноября 2008, Белгород//Сб. науч. трудов, М: МИФИ, 2009, с. 16-21.

2. Петрунин В.Ф. 3-я Всерос. конф. По наноматериалам // 20-24 апреля 2009, Екатеринбург: Ур. изд., 2009, с. 36-39.
3. Андриевский Р.А. // Российские нанотехнологии, 2, №11-12 (2007), с. 6-10.
4. Круглов А.К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. 2-е издание, испр. М:// ЦНИИатоминформ, 1995. с. 380.
5. Ген М.Я., Миллер А.В.//Поверхность, 1983, №2, с. 150-154.
6. Котов Ю.А., Яворский Н.А.//ФХОМ, 1978, №4, с. 24-30.
7. Морохов И.Д., Петинов В.И., Петрунин В.Ф., Трусов Л.И.//УФН, т.133(1981), в.4, с. 653-692.
8. Petrunin V.F. // Nanostruct. Mater., 1999. v 12. p. 1153 — 1156.
9. Петрунин В.Ф.// Инженерная физика , №4 (2001) , с, 20-27
10. Petrunin V.F. , Shlyaroshikova T.V., Popov V.V. // 9<sup>th</sup> Inter. Conf. on Nanostruct. Mater. // 01-06 June 2008, Rio de Janeiro // Abstracts, p. 15 h.
11. Petrunin V.F., Popov V.V., Zhu Hongzhi // Inorg. Mat., 40 (2004), №3, p. 251-258.
12. Асхадулин Р.Ш., Мартынов П.Н.// VI Всесоюз. конф. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем // 19-23 авг. 2002, Томск// Сб. науч.трудов, М: МИФИ, 2003, с. 451-455.
13. Петрунин В.Ф., Федотов А.В., Малыгин А.Б., Шилов В.В. // Патент РФ №2186431.
14. Журнал «В мире нано», №1 (2009), <http://www.rusnanonet.ru>
15. Данченко Н.И., Стихин А.С. // Атомпресса, №33 (819), авг. 2008, с. 4.
16. Гульбин В.Н., Петрунин В.Ф., // IV Межд. ядер. форум, 28 сент.-2 окт. 2009, С. Петербург // Сб. тезисов докл., М.: ИК РАН – РНЦ КИ, 2009, с. 36-39.
17. Петрунин В.Ф., Шляпошникова Т.В., Коровин С.А., Попов В.В. // Патент РФ №2294949.
18. Воронин И.В., Горбатов С.А., Петрунин В.Ф. // Патент РФ №2294948.