

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

УДК 539.975(082)

*П. А. ВИТЯЗЬ<sup>1</sup>, Л. Н. ДЬЯЧКОВА<sup>2</sup>, А. А. АНДРУШЕВИЧ<sup>3</sup>***ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ (ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ IV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ-2014: БЕЛАРУСЬ – РОССИЯ – УКРАИНА»)**<sup>1</sup>*Президиум НАН Беларуси,*<sup>2</sup>*Институт порошковой металлургии НАН Беларуси,*<sup>3</sup>*Белорусский государственный аграрно-технический университет**(Поступила в редакцию 15.01.2015)*

Наноструктурные материалы и сплавы обладают уникальными свойствами (повышенная прочность и одновременно высокая пластичность, высокая коррозионная стойкость, повышенные магнитные и другие функциональные свойства), что дает возможность создавать принципиально новые конструкционные и функциональные материалы. Кроме того, их технологические характеристики позволяют применять прогрессивные методы получения изделий сложной формы. Поэтому исследования в области разработки наноматериалов и нанотехнологий ведутся практически во всех научных центрах стран-участниц регулярно проводимых Международных научных конференций «Наноструктурные материалы». Первая конференция «Наноструктурные материалы-2008. Беларусь – Россия – Украина» прошла в Минске 22–25 апреля 2008 г., вторая – 19–22 октября 2010 г. в Киеве, Украина, третья – 19–22 ноября 2012 г. в Санкт-Петербурге, Россия. IV Международная научная конференция «Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина» состоялась в Минске 7–10 октября 2014 г.

Актуальность тематики конференции подтверждается тем, что по данным маркетинговой компании Research and Markets (США) мировой рынок нанотехнологий в 2013 г. достиг 1,6 трлн дол. США, а в 2015 г., согласно аналитическому агентству LUX Research (США), объем продаж продукции с применением нанотехнологий вырастет до 2,9 трлн дол. США.

Организаторы конференции – Национальная академия наук Беларуси, Российская академия наук, Национальная академия наук Украины, Министерство образования Беларуси, Министерство образования и науки России, Постоянный Комитет Союзного государства, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Российский фонд фундаментальных исследований, Государственный фонд фундаментальных исследований Украины, Государственный комитет по науке и технологиям Беларуси, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Белорусский государственный университет, Белорусский национальный технический университет, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Российский научный центр «Курчатовский институт».

Председатели международного оргкомитета – П. А. Витязь (Президиум НАН Беларуси), Ж. И. Алфёров (Президиум РАН, Москва, Санкт-Петербург), А. Г. Наумов (Президиум НАН Украины). В международный оргкомитет вошли ведущие ученые трех стран (всего 51 участник, из них 21 из Беларуси, 19 из России, 11 из Украины). Кроме того, в международном программном комитете работали 33 участника (15 из Беларуси, 13 из России, 5 из Украины).

На конференции представлены доклады 194 исследовательских и производственных организаций, в том числе 36 организаций Беларуси, 86 России, 48 Украины, 7 Польши, 5 Германии, 2 США, по 1 Казахстана, Китая, Кореи, Монголии, Саудовской Аравии, Словакии, Румынии, Чехии, Швеции, Японии. Многие доклады – результаты совместных работ стран-участниц конференции.

В конференции приняли участие ведущие ученые Беларуси (Агабеков В. Е., Борисенко В. Е., Витязь П. А., Гапоненко С. В., Ильющенко А. Ф., Жданок С. А., Жорник В. И., Пенязьков О. Г., Плескачевский Ю. М., Чижик С. А. и др.), России (Алфёров Ж. И., Алдошин С. М., Алымов М. И., Валиев Р. З., Добаткин С. В., Ляхов Н. З., Панин В. Е., Петрунин В. Ф., Псахье С. Г. и др.), Украины (Наумовец А. Г., Скороход В. В., Мильман Ю. В., Рагуля А. В., Солонин Ю. М., Фирстов С. А. и др.). Не все докладчики лично приняли участие в конференции, однако доклады как устные, так и стендовые были представлены соавторами.

Наибольшее количество докладов представлено следующими организациями: от Беларуси – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Белорусский государственный университет, Белорусский национальный технический университет, Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; от России – ВНИИ авиационных материалов (Москва), Воронежский государственный университет, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток), Институт химии Дальневосточного отделения РАН (Владивосток), Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН (Санкт-Петербург), Институт химии твердого тела и механохимии сибирского отделения РАН (Новосибирск), Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН (Москва), Институт физики твердого тела РАН (Черниголова), Институт проблем машиноведения РАН (Санкт-Петербург), Институт проблем химической физики РАН (Черниголова), Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (Москва), Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (Москва), Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова, Санкт-Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург); от Украины – Институт химии поверхности им. А. А. Чуйко (Киев), Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича (Киев), Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАНУ, Донецкий национальный университет.

Во время конференции проведен круглый стол на актуальную тему «Проблемы подготовки кадров в области наноматериалов и нанотехнологий».

Цель настоящего обзора – анализ представленных на конференции докладов по теоретическим и экспериментальным исследованиям в области наноматериалов и нанотехнологий и определение тенденций развития наноматериалов и нанотехнологий в Беларуси, России и Украине.

Большую роль в понимании основных направлений и задач, стоящих перед наноматериаловедением, следует отвести пленарным докладам (23 доклада), позволяющим оценить современное состояние проблемы. Пленарные доклады посвящены достижениям в области исследований использования и освоения в промышленности наноматериалов и нанотехнологий в Беларуси, России и Украине.

Анализ представленных в докладах результатов исследований показал их соответствие мировому уровню [1–12]. В то же время только в перспективе при наличии соответствующей экспериментальной базы и потребностей промышленности будут достигнуты требуемые свойства наноматериалов, теоретически описанные в различных моделях.

Большой интерес вызвал доклад Ж. И. Алфёрова [13, с. 10] (Санкт-Петербургский академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН), посвященный истории

развития, настоящему состоянию и перспективам полупроводниковой электроники. Ж. И. Алфёров отметил существенный вклад советских, российских и зарубежных ученых в этой области и показал что бурное развитие информационных технологий во второй половине XX в. связано, прежде всего, с микроэлектроникой на кремниевых интегральных схемах и оптоэлектроникой на полупроводниковых гетероструктурах, которые позволили решить более общую проблему – управление потоками электронов и фотонов в кристаллах. Кроме того, полупроводниковые гетероструктуры обеспечили современное состояние волоконно-оптической связи, мобильной телефонии, светодиодного освещения, солнечных батарей, квантовых лазеров, а также обеспечили получение низкоразмерных структур электронного газа.

По мнению Ж. И. Алфёрова, новые направления, где будут востребованы наноматериалы и нанотехнологии: спинтроника, молекулярная электроника, квантовая логика. Наиболее перспективным следующим этапом будет интеграция фотоники на полупроводниковых гетероструктурах с кремниевыми чипами, что потребует обширных и тщательных исследований.

П. А. Витязь (Президиум НАН Беларуси) [13, с. 10] в своем пленарном докладе представил результаты анализа развития теоретических и экспериментальных исследований в области нанотехнологий и наноматериалов в Республике Беларусь за 2010–2013 гг., основные полученные результаты и примеры практического использования и внедрения инновационных разработок. В Республике Беларусь с 2003 г. исследования и разработки в области наноматериалов и нанотехнологий проводятся в рамках специальных государственных программ, программ Союзного государства «Нанотехнология-СГ» и в виде отдельных проектов в других программах и программах БРФФИ. В настоящее время формируется отраслевая научно-техническая программа «Наноматериалы, наноструктуры и нанотехнологии» («Наноиндустрия»). В 2010 г. при НАН Беларуси организован Научный совет по проблеме «Наноструктурные материалы, нанотехнологии и нанотехника», в который в качестве иностранных ассоциированных членов приглашены известные специалисты в области наноматериалов из России и Украины. Постановлением СМ РБ (от 18 февраля 2013 г. № 113) утверждена Концепция формирования и развития наноиндустрии в Республике Беларусь на предстоящие годы, в соответствии с которой выделены следующие основные направления: наноматериалы, сенсорика, наноэлектроника, солнечные элементы, приборостроение, фильтры, мембраны, фармпрепараты.

В ближайшее время в Беларуси фундаментальные исследования будут проводиться в области: поверхностных явлений, коллоидных частиц и наночастиц, молекулярных кластеров; теории прочности и формообразования; структуры и свойств кристаллических и неупорядоченных систем; новых магнитных, сегнетоэлектрических, полупроводниковых, сверхпроводящих, радиационно стойких, фотонных, квантово-размерных, нелинейно-оптических и сверхтвердых материалов; высокоэнергетических процессов формообразования, упрочнения и испытания материалов; формирования покрытий; металлургических процессов черных, цветных металлов и сплавов на их основе; новых неорганических и композиционных материалов для дорожного, промышленного и жилищного строительства; неразрушающего контроля материалов и конструкций; прикладных исследований; высокоэнергетических способов синтеза наноразмерных структур и покрытий; новых керамических и металлокерамических материалов и порошков; материалов с управляемой поровой структурой; композиционных полимерных и металлополимерных материалов и их модифицирования; сегнетоэлектрических и полупроводниковых материалов; новых функциональных покрытий; многофункциональных стеклокристаллических материалов; технологии производства литейных сплавов на основе черных и цветных металлов с использованием вторичных ресурсов; композиционных и гибридных биоактивных, биоинертных и биосовместимых материалов.

В настоящее время исследования в области наноматериалов и нанотехнологий в Республике Беларусь проводятся по следующим направлениям: разработка новых теоретических принципов и моделей описания нанообъектов, методов исследования структуры, физико-механических, электрофизических и магнитных свойств и диагностики керамических, углеродных, полимерных, металлических, магнитных, полупроводниковых, диэлектрических, высокотвердых, тугоплавких наноматериалов, нанокомпозитов на основе аморфных матриц, поверхностно- и объемно-

модифицированных материалов, сред и систем с низкоразмерным структурированием; создание новых адсорбентов, катализаторов, ионообменников, гелей, кремов, эмульсий, лекарственных средств, имплантатов, фильтров, мембран, сенсоров, оптико-электронных, электромеханических наноустройств и систем с использованием гетероструктур, квантовых ям, сверхрешеток, квантовых точек и проволок, нанотрубок и фуллеренов, органических и неорганических молекул; освоение разработанных наноматериалов и нанотехнологий в машиностроении, автомобильной, электронной промышленности, лазерной технике, связи, фармакологии, медицине.

В докладе А. Г. Наумовца (Президиум НАН Украины) [13, с. 12] представлен обзор результатов исследований и разработок по наноматериалам и нанотехнологиям, выполненных институтами НАН Украины за последние пять лет. Работы проводились в рамках Государственной и академической целевых программ по следующим направлениям: физика наноматериалов; технология металлических и диэлектрических наноматериалов; получение и свойства нанокерамики, нанокompозитов, полупроводниковых наноструктур, нанобиоматериалов; нанохимия; диагностика наноматериалов.

Украинскими учеными достигнуты высокие свойства углеродных наноматериалов (нанотрубок, графена) с примесями, разработаны: дешевая технология получения графена из графита; способы усиления и генерации электромагнитных волн терагерцового диапазона, имеющих большие перспективы приложений; способы повышения свойств поверхностей за счет использования органических монослоев; теоретические модели и условия режима генерации излучения в наноразмерных диодных структурах с транспортом горячих электронов в сильном электрическом поле; новые способы получения наноструктурных металлов, магнитомягких сплавов и керамики, эффективных катодных материалов для литиевых батарей, магнитных аморфных и нанокристаллических сплавов, обладающих повышенными прочностными и функциональными характеристиками (износоустойчивость, магнитная «мягкость», нелинейные оптические и диэлектрические характеристики, термостойкость и коррозионная стойкость), области применения которых – авиакосмическая промышленность, электротехника, радиоэлектроника, оптика и светотехника; различные упрочняющие покрытия для прецизионных обрабатывающих инструментов и имплантатов, эффективных диэлектрических и нелинейных СВЧ-материалов на основе наноструктурированных оксидных систем; нанотехнологии для соединения новых материалов методами электросварки; оригинальные методики стабилизации наночастиц ферромагнетиков биосовместимыми сурфактантами и полимерами; способ синтеза магнитной жидкости на основе порошка магнетита для векторной доставки препаратов; нанокатализаторы для селективного обезвреживания выхлопных газов; режимы синтеза биоактивных нанокерамик для имплантатов и восстановления костной ткани; новые высокотехнологичные лекарственные средства на основе эпоксиполиуретанового нанокompозита с неорганикой для профилактики и лечения распространенных заболеваний (сердечно-сосудистых, онкологических, иммунных, туберкулеза костной ткани); система направленного транспорта противоопухолевого препарата «Цисплатин», основанная на комбинации действия нанокompозита магнитная жидкость + цисплатин и постоянного магнитного поля.

В 12 научно-исследовательских институтах НАН Украины синтезированы и исследованы наноматериалы, используемые при создании новых лекарств, в частности, против диабета II типа и злокачественных опухолей; в качестве компонентов нового класса антитромботических препаратов, регуляторов сокращения гладких мышц, биокерамических имплантов, носителей фармпрепаратов целевого назначения, противомикробных препаратов; в новых диагностических и сенсорных тест-системах, в пищевой промышленности, сельском хозяйстве, экологии.

В области диагностики наноматериалов открыто явление усиления на несколько порядков величины проявления дефектов в динамической рентгеновской дифракции, созданы уникальный метод и аппаратура нового поколения для неразрушающей послойной (с наншагом по глубине) дифрактометрии, рефлектометрии и топографии наноматериалов (рентгеновский дифракто-топографо-рефлектометр для диагностики объектов в скользящих лучах с учетом диффузного рассеяния).

Достижения российских ученых в области наноматериалов и нанотехнологий представлены как в пленарных, так и секционных докладах.

В пленарном докладе А. И. Русанова (Менделеевский центр, Санкт-Петербургский государственный университет) [13, с. 13] приведены результаты исследования граничных свойств графена с позиций коллоидной химии и науки о поверхностных явлениях. Роль поверхностных эффектов в графене играют явления, характеризующиеся линейным натяжением и линейной энергией, определяемые химическими связями. Линейное натяжение играет важную роль и в поведении «дыр» графена, т. е. скоплений вакансий, которые могут свободно мигрировать не только в пределах одного листа, но и «перепрыгивать» с одного листа на другой в структурах типа графита, а также является движущей силой спонтанного образования нанотрубок, тип которых зависит от выбранного направления: вдоль зигзагообразного и креслообразного направлений в гексагональной структуре графена дают ахиральные нанотрубки, вдоль других направлений – хиральные нанотрубки. В докладе также сформулирована термодинамика перехода плоский лист – нанотрубка.

Применение наноматериалов и нанотехнологий для авиационной техники в России освещено в пленарном докладе Е. Н. Каблова и др. (Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ»)) [13, с. 14]. ФГУП «ВИАМ» является головной организацией национальной нанотехнологической сети по направлению «Композитные наноматериалы». Одним из стратегических направлений деятельности данного института является разработка наноструктурированных, аморфных материалов и покрытий. В институте разработаны жаропрочные никелевые и интерметаллидные наноструктурные сплавы и наноструктурные защитные и упрочняющие покрытия нового поколения для газотурбинных двигателей, которые по своим свойствам и эксплуатационным характеристикам значительно превосходят все известные отечественные и зарубежные сплавы аналогичного назначения. Для повышения высокотемпературной электро- и теплопроводности, температуры термического разрушения, конструкционных свойств и обеспечения безопасности углепластиковых конструкций при воздействии токов молнии использовано их модифицирование углеродными наночастицами в виде фуллеренов, нанотрубок и астраленов. Проблемой серийного использования нанотехнологий является контроль качества закупаемого сырья, используемого для производства наноматериалов, и контроль самих полученных материалов, так как испытательные лаборатории, контролирующие серийную продукцию наноиндустрии, не оснащены необходимым испытательным оборудованием. Поэтому решается задача разработки критериев, методов, средств и нормативной документации для серийного контроля качества наночастиц и композитов, технологических процессов изготовления наноструктурированных материалов. На базе института совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом оптико-физических измерений (ФГУП «ВНИИОФИ») создан Отраслевой Центр метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологий и продукции наноиндустрии в области композитных наноматериалов. Центр оснащен современным оборудованием, стандартными образцами, методиками измерений и проводит комплекс работ для предприятий, разрабатывающих и выпускающих композитные наноматериалы.

Доклад В. Я. Шевченко (Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург) посвящен проблеме позиционирования химии как фундаментальной науки, изучающей проблемы образования химических веществ и их структуры с учетом основных проблем мироздания, и определению роли химии в XXI в. в описании и классификации химических процессов на наноуровне с помощью математики. По мнению автора, основной закон кратных отношений в химии – это простое следствие более общего закона симметрии в математике, так как между химическими и структурными формулами веществ существует теснейшая взаимосвязь.

Результаты исследований наноструктурных материалов в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, занимающего одно из ведущих мест в области порошковой металлургии в СНГ, представлены В. В. Скороходом и А. В. Рагулей [13, с. 18]. В институте разработаны оригинальные методы синтеза нанопорошков оксидов металлов с размерами кристаллитов менее 30 нм и показано, что технология выращивания слоев ферромагнитных нанокомпозитов (ФМНК)  $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$  существенно влияет на их свойства (размер, форму наночастиц  $\text{Co}$ , значение порога перколяции, величину магнитосопротивления, термоэлектрические свойства). Впервые установлен «магнитный обменный сдвиг» для ФМНК  $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$  с содержанием

Со от 12 до 43 ат.%, обусловленный магнитным обменным взаимодействием ферромагнитного металлического ядра наночастицы Co со слоем  $\text{CoO} + \text{Co}_2\text{O}_3$  на поверхности наночастиц. С помощью методов молекулярной динамики и псевдопотенциала установлено, что в гетероструктурах  $\text{TiN}(001)/\text{SiC}$  и  $\text{TiN}(\text{III})/\text{SiC}$ , которые моделируют нанослоистые покрытия  $\text{TiN}/\text{SiC}$ , до 300 К поверхность раздела  $\text{TiN}(001)/\text{SiC}$  представляет собой эпитаксиальный слой  $\text{B1-SiC}$ , а при 1400 К – деформированную структуру, подобную  $3\text{C-SiC}$ . Структура поверхности раздела в гетероструктуре  $\text{TiN}(\text{III})/\text{SiC}$  при статической релаксации превращается из  $\text{B1-SiC}$ - в  $3\text{C-SiC}$ -подобную структуру. Осажденные магнетронные нанослоистые покрытия  $\text{TiN}/\text{SiC}$  имеют твердость по Кнупу 52 ГПа, т. е. вдвое больше твердости однофазных  $\text{TiN}$ - и  $\text{SiC}$ -покрытий (примерно 26 ГПа).

Проведенное моделирование условий локального электроконтактного нагрева при спекании наноразмерных проводящих порошков металлов, покрытых оксидным слоем, позволило установить, что при прессовании порошков важна высокая пластичность контактов, которую при горячем прессовании с электроразрядным нагревом (SPS) можно достичь без разогрева до высоких температур образца в целом за счет локального электроконтактного нагрева частиц.

При разработке метода получения массивных образцов материалов в нанокристаллическом состоянии острым охлаждением жидкой фазы установлено, что для получения эквимольных высокоэнтропийных сплавов, содержащих более трех компонентов с температурой плавления выше 2000 °С и имеющих высокую склонность к поглощению примесей внедрения, плавку необходимо проводить в контролируемой среде.

Большой интерес вызвали пленарные доклады В. Е. Панина (Институт физики прочности и материаловедения РАН, Томск) [13, с. 24] и Р. З. Валиева (Наноцентр и Институт физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия) [13, с. 25], посвященные проблемам прочности, пластичности, деформации и разрушения наноструктурных материалов.

В. Е. Панин [13, с. 24] выдвинул гипотезу о том, что в наноструктурных материалах не действует дислокационная теория деформации. Низкая термодинамическая стабильность наноструктуры и большая протяженность границ раздела, которые не имеют трансляционной инвариантности, обуславливают в полосах локализованной деформации развитие сильной кривизны, возникновение неравновесных вакансий кривизны, расслоение и структурно-фазовый распад исходной структуры. Этим и объясняется низкая пластичность наноструктурных материалов. Механизм разрушения наноматериалов заключается в образовании трещины при поперечных и продольных сдвигах, что вызывает эффекты расслоения, возникновения трещин нормального отрыва, локальную кривизну, увеличение локального молярного объема, в результате наноструктура трансформируется в пористую «металлическую пену». В связи с этим существующие методы оценки вязкости разрушения, основанные на линейной механике Ньютона, неприменимы к наноструктурным материалам. Для наноструктурных материалов требуются новые методы измерения вязкости разрушения на основе нелинейной механики разрушения.

Р. З. Валиев придерживается традиционной теории дислокаций при деформации наноматериалов [13, с. 25] и считает, что повышение свойств объемных наноматериалов объясняется созданием в ультрамелкозернистых металлах при интенсивной пластической деформации (ИПД) различных границ зерен (малоугловых и высокоугловых, специальных и общего типа, равновесных и неравновесных), а также зернограницных сегрегаций и выделений.

Результаты исследований процессов обработки давлением наноструктурированных металлических, полимерных и композиционных материалов при ИПД представлены также в докладе В. Н. Варюхина и др. [13, с. 26] (Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины).

Исследования Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии НАН Беларуси (ГНПО ПМ) в области перспективных нанотехнологий, представленные в докладе А. Ф. Ильющенко [13, с. 28], включают получение: многослойных композиционных нанослоистых покрытий на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, оксидов и других соединений, сформированных методами осаждения в вакууме (PVD), предназначенных для обрабатываемого инструмента; наноструктур повышенной прочности и износостойкости об-

работкой высококонцентрированными потоками энергии газотермических композиционных покрытий, модифицированных элементами переходных металлов; наноструктурированных порошков оксидов определенного фазового состава ( $Al_2O_3$ ,  $NiFe_2O_4$ ,  $Co-NiFe_2O_4$ ) для модификации базальтовой строительной арматуры; наноматериалов медико-биологического назначения спрей-пиролизом, основанным на термическом разложении и последующей кристаллизации аэрозоля раствора, содержащего катионы синтезируемого материала в стехиометрическом соотношении; алмазов из конверсионных взрывчатых материалов.

В докладах С. М. Алдошина и Э. Р. Бадамшиной [13, с. 29] и В. Ф. Разумова [13, с. 37] представлены результаты исследований, проведенных в Институте проблем химической физики РАН (Черноголовка, Россия). Первый доклад посвящен методикам: получения нанопорошков оксидов, нитридов, карбидов металлов (10–100 нм) одно-, двух- и многостенных углеродных нанотрубок (УНТ), фуллеренов, различных функционализированных производных углеродных наноматериалов; синтеза ионных соединений для применения их в радиоспектральных и люминесцентных методах диагностики наноматериалов и композитов; томографии и фототерапии для создания органических электролюминесцентных материалов и солнечных батарей, фотодетекторов, интегрированных сенсоров. Второй доклад посвящен коллоидным технологиям, позволяющим создавать органические транзисторы и солнечные батареи (ОСБ), светодиоды (ОСИД) и дисплеи по себестоимости на 1-2 порядка ниже кремниевых, а также многофункциональные приборы, совмещающие в себе одновременно два (ОСИД и ОСБ, ОСБ и фотодетектор, ОСИД и фотодетектор и т. п.) или даже три (ОСБ, фотодетектор и ОСИД) устройства, т. е. принципиально новые малогабаритные оптосенсорные устройства, позволяющие осуществлять неинвазивную диагностику состояния человека и окружающей среды.

Проблемам получения наноразмерных материалов на основе углерода и их применения в электромеханике, фотонике и спинтронике посвящен пленарный доклад Н. А. Поклонского (Белорусский государственный университет) [13, с. 30], на основе полимерных нанокомпозитов – доклад С. С. Песецкого, С. П. Богдановича, Н. К. Мышкина (Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси) [13, с. 35].

По данным доклада В. Е. Агабекова [13, с. 38] (Институт химии новых материалов НАН Беларуси), разработанные нанокомпозиты со структурой ядро/спутник, содержащие в качестве ядра наночастицы  $Fe$ ,  $Fe_3O_4$  и гидроксипатит  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ , а в качестве спутника (покрытия) – наночастицы  $SeO_2$ ,  $Ag$  или  $Au$ , полисахаридов, хитозана и альгината кальция, могут широко применяться для носителей биологически активных веществ (БАВ) и лекарственных соединений, а упорядоченные структуры металлических (или полупроводниковых) наночастиц в полимерных материалах позволяют получать оптические метаматериалы (доклад В. Н. Белого (Институт физики НАН Беларуси) [13, с. 41]).

С. А. Чижик (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси) в своем докладе [13, с. 36] показал, что разработанные в институте методики исследования наноматериалов с помощью сканирующей зондовой микроскопии успешно применяются в диагностике тонкопленочных покрытий, трибослоев, элементов субмикрорэлектроники, биологических клеток. Во многих задачах наноматериаловедения данный метод не имеет альтернативы, хотя его метрологическое обеспечение имеет ограничения и требует доработки.

Представители ОАО РОСНАНО (Россия) П. В. Дудин, О. И. Урютин, З. М.-Г. Ганиев в докладе [13, с. 43] привели данные о системе отбора проектов в России в области наноматериалов, нанотехнологий, сертификации и стандартизации нанотехнологической продукции.

В пленарных докладах научных школ Беларуси, России, Украины приведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований по созданию и применению наноматериалов и нанотехнологий, но более широко все вопросы создания, исследования, применения наноматериалов, их аттестации и сертификации освещены в секционных и стендовых докладах.

Наибольшее количество докладов представлено по тематике «Физикохимия наноструктурных металлов» (28 устных и 55 стендовых докладов) и «Наноструктурные металлы, сплавы, керамика и композиционные материалы» (в подразделе «Нанокерамика и композиционные материалы» 27 устных и 48 стендовых докладов, в подразделе «Наноструктурные металлы и сплавы» 27 устных и 47 стендовых докладов).

В секции «Углеродные наноматериалы, фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» представлено 14 устных и 29 стендовых докладов, в секции «Магнитные наноматериалы» – 11 устных и 15 стендовых докладов, в секции «Нанoeлектроника» – 10 устных и 15 стендовых докладов, в секции «Наноструктурированные коллоидные системы» – 11 устных и 14 стендовых докладов, в секции «Методы аттестации и сертификации наноматериалов» – 9 устных и 8 стендовых докладов.

**Теоретическими проблемами** в области наноматериалов и нанотехнологий занимаются ученые всех трех стран-участниц конференции. В частности, ряд докладов посвящен моделированию процессов образования наноструктурированных материалов в виде нанопорошков [13, с. 54, 61], нанопленок [13, с. 59], в виде графенов [13, с. 82, 229, 283, 310, 311], фуллерита [13, с. 290], УДА [13, с. 279] и др. Фундаментальные вопросы, связанные с определением понятий графена и химического вещества в целом, рассмотрены в докладах российских ученых А. И. Русанова [13, с. 13] и В. Я. Шевченко [13, с. 16], нанокластеров – в докладе белорусских ученых А. М. Ильянка и И. А. Тимошенко [13, с. 42], теоретические аспекты использования механоактивации и СВС-процесса для получения тугоплавких нанопорошков – в докладах В. В. Ключарева [13, с. 65] (Россия), Б. Б. Хины [13, с. 69] и Г. Г. Горанского [13, с. 261] (Беларусь).

Квантово-химическое моделирование процесса синтеза наноалмазов, в котором использованы современные представления о механизме детонационного синтеза, проводилось в совместной работе ученых России и Беларуси [13, с. 116].

Теоретические исследования модели искусственного атома (наноразмерная квазиатомная структура с пространственно разделенными электронами и дырками) позволили П. П. Горбику [13, с. 48] (Украина) определить условия построения новых квантовых систем для синтеза углеродных нанотрубок на минеральном носителе.

З. Я. Кусаковская и др. [13, с. 280] (Россия) на основании экспериментальных исследований влияния квантовых и когерентных эффектов на процесс полевой эмиссии с углеродными нанотрубными эмитторами предложили модель низковольтной полевой эмиссии, которая позволяет объяснить явление переноса заряда в цепи нанотрубного эмиттера.

Учеными Беларуси и России [13, с. 288, 303, 304] проведены квантово-химическое моделирование и квантово-химические расчеты: электронной структуры и строения эндоэдрических индийсодержащих радионуклидных противоопухолевых препаратов для разработки кластерных агентов, необходимых для диагностики лечения рака; комплекса водорастворимых ферромагнитных производных фуллерида ферроцена для адресной доставки лекарств с помощью магнитных полей; локальной структуры, электронных и спиновых свойств пористого наноструктурированного угля для выявления дефектов структуры пластов углей.

Теоретические работы ученых Беларуси, России и Украины посвящены также исследованию характеристик наноматериалов. В докладе В. С. Вихренко и Я. Г. Грода (Беларусь) [13, с. 112] для оценки влияния межзеренных границ на транспортные свойства разработана модель одномерного решетчатого топливного элемента для численного моделирования с помощью динамического метода Монте-Карло, в докладе Е. В. Класа и др. (Россия) [13, с. 125] приведены теоретические расчеты оптических характеристик наноструктурированных композиций с использованием геометрической оптики и с учетом шероховатости для управления их свойствами с не меньшей точностью, чем с использованием программ, основанных на волновой оптике, в докладе В. Г. Бутько и др. (Украина) [13, с. 295] приведены теоретические расчеты электронных и магнитных свойств углеродных нанотрубок, инкапсулированных цепочкой атомов железа, для объяснения изменений в системе в зависимости от строения нанотрубок.

Наноматериалы по своей структуре и свойствам существенно отличаются от традиционных материалов, используются в виде пленок, покрытий и как объемные материалы применяются в различных областях. Это требует разработки **специальных методов исследования** их структуры, фазового состава, механических и функциональных свойств.

Для выявления кинетики процессов адсорбции, десорбции, замещения функциональных групп и наличия ориентированного роста нанокристаллов с образованием преобладающей структуры анатаза использованы методы ИК- или ИК- и КР-спектроскопии [13, с. 80, 89], для



оптимизации процесса получения поверхностных слоев диоксида кремния с имплантированными ионами олова и цинка для оптоэлектронных приборов – методы резерфордского обратного рассеяния, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [13, с. 104, 105], структурных свойств нанокристаллических пленок и наноразмерных поликристаллов интерметаллида  $\text{CuInSe}_2$  – рентгенодифракционный и рентгеноспектральный методы [13, с. 113]. Для исследования функциональных свойств (оптических, электрических и др.) применяются методы: ап-конверсионной люминесценции (оптические свойства в преобразователях излучения [13, с. 99]); возбуждения-зондирования в фемпто- и пикосекундном диапазонах (спектрально-временная динамика нестационарного поглощения гибридных плазмонных нанокомпозитов [13, с. 114]); малоуглового рассеяния нейтронов (оптические свойства силикатных стекол с частицами халькогенидов свинца [13, с. 145]); термического анализа, ИК-спектроскопии, рентгеновской дифракции (электропроводность композитов на основе оксидов меди с применением электропроводящих углеродных нанотрубок [13, с. 122, 123, 163]); дилатометрии, рентгенофазового анализа и ПЭМ (магнитные свойства нанопористых стекол с добавкой оксида железа [13, с. 197]).

Основные разработки в области наноматериалов в настоящее время посвящены **методам их получения**. В зависимости от необходимых механических, физико-химических и функциональных свойств разработаны наноматериалы, получаемые химическими способами (золь-гель-метод, восстановление оксидов, пиролиз, разложение прекурсоров, плазмохимический, механохимический методы и др.), механическими (интенсивная пластическая деформация) и физическими (лазерное облучение, лазерно-плазменное осаждение, обработка ультразвуком, детонационная обработка) способами.

С помощью процессов восстановления изготавливают как сферические, так и несферические наночастицы. Наночастицы серебра получают при восстановлении серебра боргидридом натрия в присутствии цитрата натрия [13, с. 49]; восстановлением ионов серебра мягкими восстановителями в составе водного раствора поливинилового спирта [13, с. 92] аскорбиновой кислотой в концентрированных растворах поверхностно-активных веществ [13, с. 235]; восстановлением парами магния пентооксида и ниобата, синтезированных спеканием оксидов ниобия и магния, получают нанопорошки ниобия [13, с. 208, 381]; жидкофазным восстановлением прекурсоров получают наноструктурированные порошки систем Fe–Co, Fe–Co–Ni, Cu–Ni, Cd–Ni, Co–Ni и наноразмерных систем ядро (переходный металл) – оболочка (Au) [13, с. 61].

Методами расщепления объемных поликристаллических образцов до коллоидных дисперсий получены тонкопленочные углеродные наноматериалы [13, с. 59], путем разложения нестабильных прекурсоров с контролируемой скоростью реакции – нанопорошки с контролируемым размером частиц чистого и допированного добавками с разным типом связи, заданными функциональными свойствами, фазовым и химическим составом титаната бария [13, с. 131], разложением тетрометилсилана в аргоновой плазме электродуговым разрядом – нанопорошки карбида кремния [13, с. 136].

Методом испарения формируются слои парофазных наноструктур теллурида свинца на подложках слюды или стекла [13, с. 93], методом межфазной поликонденсации получены мембраны для наночистоты [13, с. 247], в которые при формировании селективных слоев вводится дополнительно диметилсульфоксид, а в качестве аминного компонента используется водный раствор м-фенилендиамина в контакте с раствором изофталойлхлорида в органическом растворителе.

Вакуумной конденсацией получают наноматериалы состава Al–Cu–Fe с икосаэдрической и кубической структурами [13, с. 270]; методом химического осаждения с помощью послойной адсорбции ионов кадмия и серы – мезопористые электроды на основе оксидов цинка, титана и индия [13, с. 78]; гидротермальным окислением алюминия – нанопорошки гидроксида алюминия [13, с. 134, 135]; гидролизом солей железа водным раствором аммиака – магнитные наночастицы, модифицированные оксидом кремния [13, с. 83]; жидкофазным химическим осаждением из растворов солей серебра – нанопорошки серебра [13, с. 206] медицинского назначения.

Новая технология контролируемой нанокристаллизации аморфных металлов в режиме термоциклирования предложена в [13, с. 50]. В процессе термоциклирования образуются нанофазы, которые проходят стадии кластеризации, обособления, роста и агломерации частиц. Возможно

также изменение состава, растворение одних фаз и возникновение более устойчивых фаз другого состава.

Нанокристаллические металлические материалы предложено получать из аморфных материалов с применением ультразвука кристаллизацией растворов азотнокислых солей с образованием соединения со структурой шпинели ( $AB_2O_4$ ) различного состава [13, с. 168]. Данные материалы используются в качестве диэлектриков, электропроводящих материалов, носителей катализаторов, фильтров и др.

Экстракционно-пиролитическим методом получают люминофоры на основе оксидов и фосфатов РЗЭ [13, с. 79, 204], фторполимеры [13, с. 191], пиролизом с применением ультразвука – нанопорошки оксида цинка, легированного марганцем [13, с. 95], и аэрозольные порошки керамики [13, с. 130].

Для получения нанопорошков разработаны также методы взаимодействия различных растворов солей металлов [13, с. 154], гидротермического твердения [13, с. 155, 156], синтеза, в том числе плазмохимического [13, с. 187, 213, 298].

Наиболее разработанным и изученным методом получения наноматериалов является золь-гель-технология, с помощью которой формируются наноструктурированные материалы и покрытия, а также внедряются специальные функциональные добавки. Золь-гель-методом получали: прозрачные пористые стекла на основе диоксида циркония [13, с. 53]; пленки диоксида титана [13, с. 60]; тонкие полисилоксановые слои на поверхности керамических мембран [13, с. 73]; пленочные нанокompозитные  $SnO_2$ /Pt-электроды путем нанесения на вращающуюся подложку [13, с. 85]; нанокompозиты Au– $In_2O_3$ , Au– $SnO_2$  с ультрадисперсным состоянием золота для резистивных сенсоров высокой чувствительности [13, с. 87]; эпоксидно-силоксановые покрытия [13, с. 88] и эпоксидно-титановые нанокompозиты повышенной термостабильности и теплостойкости с высокой оптической прозрачностью [13, с. 94]; водорастворимые индодикарбоцианиновые красители [13, с. 91]; структурно организованные материалы с высокими физико-механическими показателями модифицированием жесткой силикатной матрицы органическими реагентами [13, с. 106]; прекурсоры и нанопорошки композитов  $Al_2O_3$ –(Ce–TZP) [13, с. 137]; композиционные наноматериалы на основе титана, кремния, алюминия [13, с. 151]; нанокompозиты со структурой ядро/спутник, содержащие в качестве ядра магнетит или его композит, и покрытия из наночастиц диоксида церия, золота, серебра [13, с. 160]; покрытия на основе диоксида титана и циркония повышенной чистоты для применения в оптике, медицине, электронике [13, с. 177]; наноструктурированные композиционные радиопоглощающие материалы на основе системы железо–кобальт [13, с. 201]; тонкие эпоксидно-силоксановые и титанатные покрытия с низкой шероховатостью поверхности [13, с. 207]; пленочные электроды оксид олова – оксид графена [13, с. 76]; нанокompозиционные материалы различного состава с добавкой детонационного наноалмаза [13, с. 278] либо сами наноалмазы [13, с. 127]; соединения бария с европием [13, с. 82]; проводили модифицирование поверхности частиц оксида алюминия соединениями кремния, алюминия, кобальта [13, с. 100].

Физические методы, в том числе лазерное облучение, использованы для получения наноструктурных титановых сплавов [13, с. 217]; оксида железа, легированного кобальтом [13, с. 230]; легированных жаропрочных сталей сложного состава Nb+29% MoSi<sub>2</sub>+25% жидкого стекла [13, с. 249], модифицирования сталей [13, с. 260].

К механическим методам получения наноструктурированного состояния в материале относятся ИПД и механосинтез. Методом ИПД получают наноструктурное состояние в металлических материалах в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург) [13, с. 202], Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН (Томск) [13, с. 214, 248], Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского, Физико-техническом институте НАН Беларуси, Московском институте сталей и сплавов (Россия) [13, с. 224, 225, 257], Донецком физико-техническом институте им. А. А. Галкина [13, с. 239, 245, 246], Национальном исследовательском университете «Белгородский государственный университет», Российском государственном технологическом университете им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Институте проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН) (Черноголовка, Россия) [13, с. 254, 255], поли-

мерные наноматериалы – в Донецком физико-техническом институте им. А. А. Галкина и Институте химической физики им. Н. Н. Семенова (Украина, Донецк) [13, с. 166].

Методом механосинтеза с СВЧ формируют нанопорошки сложного состава [13, с. 65, 69], например порошки диоксида кремния [13, с. 138],  $TiB_2/Fe-Mo$  [13, с. 167], системы  $Fe-Zr$  [13, с. 272]. Кроме того, СВЧ с экструзией позволяет получать длинномерные изделия из нанопорошков оксидной эвтектики  $Al_2O_3-ZrO_2$  и тугоплавких зерен  $TiC$  и  $TiB_2$  [13, с. 128, 141].

Существенное значение при получении наноструктурных материалов приобретает в настоящее время метод электроимпульсного плазменного спекания (Spark Plasma Sintering – SPS), поскольку позволяет сохранять наноструктурное состояние при нагреве. Данным методом получают: нанокпозиционную керамику на основе нитрида кремния в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского [13, с. 188]; тяжелые вольфрамовые сплавы в Институте металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова (ИМЕТ) (Москва, Россия), Российском федеральном ядерном центре «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ») (Саров, Россия) [13, с. 258], Институте гидродинамики сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия) [13, с. 219]; наномодифицированные отходы твердого сплава в Белорусском национальном техническом университете, Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» (ОИМ НАН Беларуси) [13, с. 192]; порошки системы  $Al_2O_3/ZrO_2/Ti(C,N)$  в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского, ООО «ВИРИАЛ» (Санкт-Петербург, Россия) [13, с. 164].

Особое место в наноматериаловедении занимают **углеродные** наноматериалы благодаря своим уникальным механическим и функциональным свойствам. Теоретическим квантово-химическим расчетам структуры и свойств углеродного кластера  $C_{95}N$  гексагональной формы с зигзагообразными краями, в котором по отношению к кластеру  $C_{96}$  один атом углерода центрального гексагона заменен на атом азота, посвящен доклад [13, с. 274].

Для улучшения растворимости графена при синтезе его функционализируют наночастицами меди и электроактивным полимером [13, с. 276]. Это дает возможность изменить оптические, микроскопические и электрофизические свойства.

Жидкофазная и газофазная функционализация углеродных нанотрубок различной морфологии изучалась в [13, с. 281]. Авторы проанализировали влияние природы окисляющего реагента, температурных условий, продолжительности процесса, механохимической активации на степень дефектности поверхностных слоев, изменение геометрических параметров и объемной морфологии и показали преимущество газофазной обработки в парах окисляющих реагентов по сравнению с традиционными жидкофазными методами.

Физико-химические основы формирования органических порфириновых нанотрубок (ПНТ) на основе тетраионов и цвиттерионов заряженных сульфопенилпорфиринов разработаны в [13, с. 102]. Для ПНТ, фиксированных на плазмонных наноструктурах, впервые получены спектры комбинационного рассеяния – новый тип металлоорганических гибридных наноконструктов, перспективных для различных применений.

Исследование тонкой структуры углеродных материалов (углеродные нанотрубки, фрагменты графена, стеклоглерод) позволило установить явно выраженную асимметрию пиков, связанную с внутренней структурой материалов, например со спиральной закрученностью оболочек в случае сфероидов и нанотрубок или с повышением геометрической размерности фрагментов графена и стеклоглерода в результате изгиба [13, с. 286].

Проводимость в постоянном токе, термоэдс и импеданс в графите и графене исследованы в [13, с. 299] и показано, что зависимости термоэдс графена и графита от давления имеют аналогичный характер, благодаря, по мнению авторов, перколяционному механизму протекания тока.

В настоящее время появилось большое количество работ, посвященных исследованию сорбционных свойств углеродных материалов. В качестве исследуемого материала в [13, с. 302] выбран углеродный порошок, полученный пиролизом углеводородов. Насыщение водородом углеродного материала проводилось при варьировании температуры, давления, времени. Установлено, что это обеспечивает увеличение концентрации сорбированного газа в несколько раз.

В [13, с. 308] таунит (искусственный наноуглеродный материал) получают газофазным химическим осаждением в процессе каталитического пиролиза углеводородов. Исследование структуры таунита по ИК-фурье-спектрам диффузного рассеяния позволило установить идентичность структуры спектров таунита и поликристаллического графита. Это свидетельствует о нахождении атомов углерода в структуре таунита в основном в  $sp^2$ -гибридизации.

В [13, с. 312] предложен метод определения эффективной рабочей поверхности углеродного материала в конкретном виде электролита. Определение зависимостей эффективной рабочей поверхности от вариантов технологического процесса позволяет усовершенствовать удельные характеристики углеродных электродных материалов суперконденсатора.

Для повышения механических свойств многослойных пленок из алюминиевого сплава в [13, с. 290] использовали фуллерит. Авторы показали, что на монокристаллическом кремнии формируется гранулированная структура, а также возникают механические напряжения из-за несоответствия параметров кристаллических решеток алюминия и фуллерита.

В результате синтеза магниточувствительных композитов с многоуровневой наноструктурой, которые обладают функциями нанороботов для онкологических применений, разработана экономичная технология синтеза композиционных материалов для изготовления химически стойких покрытий – углеродных нанотрубок на минеральном носителе [13, с. 48].

Большое количество работ посвящено исследованию методов получения наноалмазов и их применению. В [13, с. 127] на основе анализа фазовой диаграммы состояния углерода разработаны методы синтеза алмазных наноструктурных материалов и установлено, что при спекании частиц нанопорошка алмаза, поверхность которых покрыта тонким слоем неалмазного углерода (около 1 нм), синтез материала происходит в равновесных условиях при достаточно низких давлениях (менее 4 ГПа) и температурах (менее 1400 К) путем, подобным каталитическому, а не прямой трансформацией решетки графита в алмазную, характерной для прямого превращения графит – алмаз.

Наноалмазы в [13, с. 279] получали в лукообразном углероде при нелинейно-квантовом самосжатии. Высокие эффективные температуры для образования наноалмазов обеспечивались возбуждением высших колебательных состояний при нелинейном взаимодействии колебательных мод, усиливаемых резонансами колебаний графито- и алмазоподобных структур и сильным колебательно-электронным взаимодействием.

В [13, с. 284] разрабатывали технологию получения детонационных наноалмазов, методы их поверхностной модификации ионами металлов меди, кобальта, никеля, железа и изучали возможности роста субмикронных монокристаллов из частиц размером 4 нм при высоких давлениях и температурах по механизму ориентированного присоединения.

Немаловажным является получение не только объемных наноматериалов, но и наноструктурного состояния в **поверхностных слоях** изделия следующими методами:

1) плазменно-электролитическое оксидирование: из электролитов с коллоидными частицами железа и кобальта и коллоидными частицами гидроксидов этих металлов на сплавах алюминия [13, с. 45]; с сочетанием темплатного золь-гель-синтеза оксидных покрытий палладия и кремния на титане [13, с. 46]; для получения наноструктурированных марганецсодержащих покрытий на титане [13, с. 47] и тонких оксидных покрытий на алюминиевых, титановых и титаноалюминиевых сплавах [13, с. 68];

2) электрохимическое оксидирование пленки алюминия на кремниевых пластинах [13, с. 77] для солнечных элементов;

3) микродуговое оксидирование титана для получения пористых биоактивных покрытий эндопротезов крупных суставов [13, с. 142].

4) анодное оксидирование алюминия для сенсоров состояния окружающей среды [13, с. 186] и для получения нанотрубок, нанопроволок, наностержней сенсоров [13, с. 189].

5) гидrolитическая поликонденсация для получения полисиоксидных слоев на поверхности наночастиц  $Fe_3O_4$  для применения в качестве активных компонентов в биокатализе [13, с. 48].

6) электрохимическое осаждение адатомов и субмонослоев различных металлов на поверхности поликристаллического теллура для формирования наноразмерных полупроводниковых

теллуридов [13, с. 86], наночастиц родия на поверхности железа, меди и молибдена из расплавов карбамида и ацетамида [13, с. 233], наночастиц золота из расплавов карбамида и ацетамида на платину [13, с. 234];

7) формирование оптически анизотропных пленок органических азокрасителей на кремневых пластинах воздействием поляризованного света [13, с. 118];

8) формирование структуры нанослойных фольг Al/Ti и Al/Ni электронно-лучевым осаждением из паровой фазы [13, с. 119];

9) химическое осаждение: оксида вольфрама из растворов на кварцевое стекло для применения в различных устройствах, основанных на электрофотохромных эффектах [13, с. 124]; наноструктурированных и наноразмерных покрытий карбидов тугоплавких металлов на подложках из молибдена, стали и на углеродных волокнах [13, с. 140]; композиционных покрытий на основе никеля и углеродных материалов на поверхность изделий, имеющих сложную форму, для получения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости [13, с. 215]; ультрачерных покрытий на основе Ni-P для повышения разрешающей способности оптических приборов [13, с. 216]; нанодисперсных композиционных покрытий Ni-Cu-P на алмазных порошках для повышения эффективности взаимодействия порошков СТМ со связкой [13, с. 159];

10) ионно-плазменное осаждение: слоев оксида титана на стали 40X13 для космической электронной техники [13, с. 190]; наноконпозиционных покрытий  $Fe_xAl_2O_3$  на ситалл и стальные подложки для повышения износостойкости [13, с. 209]; твердосмазочных покрытий на основе алюминиевого сплава Д16 распылением мишеней состава Д16+20%MoS<sub>2</sub>+10% С на углеродистую сталь [13, с. 231]; композиционных трехслойных вакуумных покрытий на основе хрома с УДА на быстрорежущие стали Р6М5 для повышения износостойкости [13, с. 232, 250]; углерода и оксидных соединений на газовых сенсорах для изменения проводимости [13, с. 243];

11) лазерно-плазменное осаждение защитных наноструктурированных алмазоподобных покрытий на титановые и алюминиевые сплавы для медицинских инструментов и имплантатов [13, с. 292];

12) термическая обработка наноструктурных стеклокерамических покрытий для защиты углеродных материалов [13, с. 58].

Наноматериалы и нанотехнологии находят широкое применение в разных областях техники. Они используются в люминисцентных материалах [13, с. 62, 71, 79, 111, 120, 172, 182, 213, 240]; в электронике [13, с. 51, 55, 67, 103, 157, 163, 169, 170, 181, 198, 199, 273], в том числе как квантовые точки [6, с. 143]; в энергетике [6, с. 207, 307]; в солнечных батареях [13, с. 77, 78, 113], в фотоэлектрохимии [13, с. 84, 296]; в красителях со специальными свойствами [13, с. 91, 185]; в минидатчиках для адсорбции газов [13, с. 107]; в оптике [13, с. 114, 211, 263, 147]; в медицине [13, с. 384, 381, 390, 115, 117, 142, 154, 157, 303, 380, 383, 388, 389, 391, 393, 377]; в газовой сенсорике [13, с. 169, 251]; в сварке [13, с. 263, 264, 265, 266, 269]; во взрывчатых веществах [13, с. 289]; в сельском хозяйстве [13, с. 308]; для получения композиционных материалов, угольного топлива и тонких пленок [13, с. 121, 223, 176, 293, 294, 205].

Таким образом, на конференции рассмотрены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований в физикохимии, методах получения наноструктурных сплавов, керамики, композиционных, магнитных, углеродных материалов, их аттестации и применения.

По результатам конференции, согласно решению сопредседателей конференции, будет издан сборник пленарных докладов, а стендовые доклады планируется опубликовать в ведущих научных журналах Беларуси, России и Украины. Планируется также организовать систему стажировок молодых ученых в области наноматериалов и нанотехнологий в ведущих научных организациях стран-участниц конференции.

По мнению ведущих ученых Беларуси, России, Украины, бурное развитие исследований и работ в области наноматериалов и нанотехнологий в ближайшее время продолжится, так как оно определяет новую ступень научно-технического уровня промышленности.

Новые направления, в которых будут востребованы наноматериалы и нанотехнологии: спинтроника, молекулярная электроника, квантовая логика, а наиболее перспективным следующим этапом, вероятно, будет интеграция фотоники на полупроводниковых гетероструктурах с крем-

ниевыми чипами. Значительное место наноматериалы и нанотехнологии найдут также в медицине при диагностике и доставке препаратов, в фармакологии при разработке новых препаратов, в биологии и сельском хозяйстве для стимулирования роста растений.

Проблемой серийного использования нанотехнологий остается контроль качества закупаемого сырья, используемого для производства наноматериалов, и самих получаемых материалов, так как испытательные лаборатории, контролирующие серийную продукцию nanoиндустрии, не оснащены необходимым испытательным оборудованием. Поэтому будут разрабатываться критерии, методы, средства и нормативная документация для серийного контроля качества наночастиц, композитов и технологических процессов изготовления наноструктурированных материалов.

Пятую конференцию «Наноструктурные материалы. Беларусь–Россия–Украина» предполагается провести в 2016 г. в Киеве (Украина) и при составлении ее программы планируется включить дополнительно секцию, посвященную новым идеям и подходам для инноваций в nanoиндустрии.

## Литература

1. Андреевский П. А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы. М., 2012.
2. Фальхман Б. Д. Химия новых материалов и нанотехнологии. Долгопрудный, 2011.
3. Витязь П. А., Свидунович Н. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов. Мн., 2010.
4. Ebrahimi Farzad. Nanocomposites. New Trends and Developments. 2012.
5. Suzuki S. Syntheses and Applications of Carbon Nanotubes and Their Composites. 2013.
6. Suzuki S. Physical and Chemical Properties of Carbon Nanotubes. 2013.
7. Aliofkhaeaei M. Advances in Graphene Science. 2013.
8. Gong J. R. New Progress on Graphene Research. Peking, 2013.
9. Наноструктуры в биомедицине / Под ред. Гонсалвеса К. Е. и др. М., 2012.
10. Sezer A. D. Application of Nanotechnology in Drug Delivery. 2014.
11. Aliofkhaeaei M. Modern Electrochemical Methods in Nano, Surface and Corrosion Science. 2014.
12. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение / Под ред. Уэйли Жу, Жонг Лин Уанга. М., 2013.
13. Наноструктурные материалы-2014: Беларусь–Россия–Украина (НАНО2014) : Материалы IV Междунар. науч. конф. (Минск, 7–10 октября 2014) / Под ред. П. А. Витязя и др. Мн., 2014.

*P. A. VITYAZ, L. N. DYACHKOVA, A. A. ANDRUSHEVICH*

### **ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS IN THE FIELD OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY (REVIEW OF THE PROCEEDINGS OF IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE «NANOSTRUCTURAL MATERIALS-2014: BELARUS – RUSSIA – UKRAINE»)**

## Summary

The analysis of the reports presented at the IV International scientific conference «Nanostructured materials-2014: Belarus – Russia – Ukraine» has been carried out by theoretical and experimental studies in the field of the methods of obtaining and properties of nanostructured alloys, ceramics, composite, magnetic and carbon materials and coatings from nanomaterials, methods of certification and application. The new directions in which nanomaterials and nanotechnologies will soon be demanded and the problems of serial use have been shown.