

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИОРИТЕТНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ РАЗВИТИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ОБЛАСТЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Д.В. Беликов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, belikovdi@extech.ru

В статье приведены результаты анализа современного состояния научных исследований в области материаловедения, представлены точки зрения экспертов Федерального реестра на перспективные направления развития научно-технической сферы по созданию новых материалов и технологий их получения. Предложены возможные области применения результатов.

Ключевые слова: новые материалы, нанотехнологии, конструкционные материалы, интенсивная пластическая деформация, направленная кристаллизация, криохимический синтез, жаропрочные сплавы, полимерные композиционные материалы, углеродные материалы, волокна, аэрогели, синтетический каучук, функциональные материалы, сенсоры, катализаторы, проводники, гибридные материалы, оптика, кристаллы, магнитные материалы, покрытия и пленки, алмазоподобные покрытия, мембраны, биомиметики, интеллектуальные материалы, диагностика.

PROPOSALS ON PRIORITY DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES OF DUAL PURPOSE AND ANALYSIS OF POSSIBLE AREAS OF THEIR APPLICATION

D.V. Belikov, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, belikovdi@extech.ru

The article presents the results of the analysis of the current state of scientific research in the field of materials science, presents the points of view of the experts of the Federal Roster for promising areas of development of the scientific and technological sphere for the creation of new materials and technologies for their production. Possible fields of application of the results are proposed.

Keywords: new materials, nanotechnology, construction materials, severe plastic deformation, directional crystallization, cryochemical synthesis, heat resisting alloys, polymeric composite materials, carbon materials, aerogels, synthetic caoutchouc, functional materials, sensors, catalysts, conductors, hybrid materials, optics, crystals, magnetics, coatings and films, diamond like coatings (diamond like carbon), membranes, biomimetics, smart materials, diagnostics.

В Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» накоплен большой опыт проведения аналитических исследований в области приоритетных направлений развития научно-технологического комплекса с привлечением широкого круга отечественных и зарубежных экспертов [1].

Спектр подобных направлений, связанных с созданием и исследованиями новых материалов очень широк: от массовых конструкционных материалов или функциональной оптики, покрытий, пленок, мембран до структур гибридной сенсорики, с эффектом памяти

формы или систем на основе самоорганизации; от технологий и средств предсказательного моделирования до диагностики и кристаллографии неорганических и органических веществ, расшифровки и изучения физико-химических свойств.

Вполне естественно, материаловедение является важным инструментом качественного улучшения характеристик перспективных изделий и средств ВВСТ, выступает как направление возможной модернизации образцов с целью удовлетворения современным тактико-техническим требованиям. А нередко современные материалы служат предпосылками к разработке новых производственных технологий или, наоборот, с целью более широкого внедрения технологии (подобно аддитивным или лазерным) влекут за собой необходимость создания материалов с уникальными свойствами.

Конструкционные материалы

Исследования и разработки по созданию конструкционных материалов на основе металлов, таких как наноструктурированные стали, сплавы, керамики и др. относятся к числу приоритетных направлений науки и техники во всех ведущих странах мира – в США, в странах Европы, в Японии, Китае и других [2]. Особенно большое количество материалов создано в последние годы.

Развитие техники требует создания новых технологий упрочнения железоуглеродистых и модификации Al-сплавов с целью обеспечения комплекса высоких физико-механических свойств, оптимизации соотношения между прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. В области *конструкционных материалов с повышенной прочностью* активно развиваются новые металлургические методы: недендритная кристаллизация (особенно Al и Mg сплавов), легирование малыми добавками редкоземельных и/или переходных металлов в сочетании с новыми подходами термической обработки, как возврат и повторное старение – RRA (Retrogression and Re-Aging). Так данный подход позволил фирме «Alcoa Inc.» организовать выпуск плит и профилей из сплавов 7000 серии для авиации – высокопрочных сплавов систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu [3].

Создание аморфной и смешанной аморфно-кристаллической структуры в металлических сплавах является сравнительно новым направлением современного материаловедения. Сплавы с подобными типами структуры обладают рядом ценных эксплуатационных свойств, например, таких как высокая твердость, прочность, износостойкость и стойкость к коррозии [2]. В исследованиях, проводимых в основном в Японии, методом быстрого затвердевания были получены образцы сплава $Al_{88}Ni_9Ce_2Fe_1$.

С целью обеспечения отечественного машиностроения, космического и авиастроения перспективными «базовыми» материалами для аддитивного производства или 3D-принтинга сложных деталей, компактирования и спекания актуальны технологии создания порошков. нанокристаллические порошки диоксида циркония в высокотемпературном состоянии и оксидная керамика с высокими механическими и термическими характеристиками. Основа рынка – порошки оксидов металлов (в Европе производится больше порошков оксидов – 90%, в Азии 25% – порошки металлов). Анализ патентов показывает, что основная доля научных исследований относится к использованию порошка алюминия и порошков драгметаллов [2].

Для рассмотрения возможности организации промышленного производства большой интерес представляют наноструктурные порошковые сплавы и новые методы порошковой металлургии. Например, шаровой размол порошков при криогенных температурах – криопомол, «cryomilling» или технологии скоростного термического разложения простых и сложных неустойчивых химических соединений в газовых средах для получения активных микронных порошков железа, алюминия, кобальта, никеля, их сплавов и интерметаллидов. Для получения оксидных порошков с размером кристаллитов 40–300 нм большое распространение получили методы криохимического синтеза (вплоть до температуры кипения жидкого азота) с использованием водных растворов [4].

Одним из современных направлений повышения свойств металлических материалов является целенаправленное формирование микро- и нанокристаллической структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД кручением, метод равноканального углового прессования) [3]. Технологиями формирования объемных наноструктур удается получать материалы с уникальными механическими свойствами: в сплаве 7075 удалось достигнуть прочности от 0,6 до 1 ГПа при относительном удлинении 5%, что близко к стали; ножевая «самурайская» сталь ZDP-189. За рубежом разработки по получению наноструктурированных материалов консолидацией ИПД микронных и нанопорошков ведутся в системе Калифорнийского университета – «The University of California» – «UC», в т.ч. – «University of California, Davis» – «UC Davis» (г. Дэвис, США), «Hitachi Metals, Ltd», Япония).

Большие перспективы применения объемно-наноструктурированных материалов выявлены для группы металлических сплавов с термоупругими мар-тенситными превращениями и эффектом памяти формы, среди которых особенно выделяются сплавы никелида титана TiNi (муфты, предназначенные для обеспечения повышенной герметичности при стыковке деталей и трубопроводов, работающих в условиях высоких давлений; устройства для клипирования кровеносных сосудов, трубчатых структур и мягкоэластичных тканей).

В целом низкотемпературные сверхпластичные свойства наноструктурированных Al и Ti сплавов открывают широкие перспективы получения легких изделий сложной формы в режиме высокоскоростного сверхпластичного формообразования, что снижает энергозатраты и трудоемкость.

Перспективны разработки новых металлических материалов и систем, армированных углеродными нанотрубками с использованием технологии искрового плазменного спекания. Основанные на развитии принципов металлизации и пропитки гибридные технологии синтеза спекаемых высокостойких алмазных композитов инструментального назначения, позволят создать алмазный инструмент нового поколения. Высокостойкий инструмент при обработке твердых материалов и при проходке особо абразивных, крепких пород и вечномерзлых грунтов необходим как для выполнения инженерных задач: буровзрывных работ, водообеспечения, при наиболее трудоемких задачах фортификационного оборудования местности, так и для производства современных материалов для нефтегазовой сферы на промышленных предприятиях.

Для долговременных сооружений: объектов командных пунктов и управления, спецобъектов, взлетно-посадочных полос аэродромов, да и в целом для строительной отрасли, актуальна разработка высокопрочных и сверхвысокопрочных многокомпонентных бетонных смесей (с прочностью 120–200 МПа), фибробетонов нового поколения и многокомпонентных модифицированных сухих смесей.

Конструкционные материалы с высокой термостабильностью

Повышение жаропрочности сплавов на основе тугоплавких металлов, полученное в последние годы, практически полностью связано с использованием упрочнения в результате введения дисперсных фаз внедрения (карбидов, нитридов и окислов металлов IVA и VA групп) в количестве, определяемом технологичностью и эффективностью получаемых гетерофазных структур. Отличительной особенностью таких сплавов является высокая термодинамическая устойчивость фаз внедрения, температуры плавления которых намного превышают температуры плавления металлического компонента.

Важной задачей является создание ультравысокотемпературных материалов на основе тугоплавких боридов металлов для наиболее термонагруженных деталей гиперзвуковых летательных аппаратов работоспособных при аэродинамическом нагреве высокоскоростными потоками воздуха до температур 2000–2500°C; создание новых тугоплавких жаропрочных сплавов на основе металлов ниобия и молибдена, упрочненных их силицидами (системы Nb-Si и Mo-Si) для газотурбинных двигателей и других деталей авиационной техники.

Особое значение имеют исследования в области аддитивных технологий (последовательного синтеза) получения сложнопрофильных изделий, в том числе элементы и узлы газотурбинных двигателей из высокотемпературных керамических материалов, например, на основе нитрида кремния.

Для различных применений актуальны фундаментально-прикладные исследования по созданию конструкционных изделий специального назначения из армированных полимерных композиционных материалов: однонаправленных углепластиков на основе эпоксидной матрицы, углепластиков на олигоимидных связующих, органопластиков; композитов с металлической матрицей, нанодобавками для авиации и космоса; с керамической матрицей для работы при высоких температурах. Углеродные конструкционные материалы со специальной архитектурой, с высокой термостабильностью до 2500 °С и прочностью 300–400 МПа могут быть получены до 2025 г.

В области *легких конструкционных материалов* выращивание монокристаллов с заданными уникальными свойствами позволяет получать новые высокопрочные, сверхлегкие, ультратвердые и жаропрочные материалы. Для авиационных и медицинских применений актуальны разработки наноструктурированного технически чистого титана (рис. 1); для электротехнических нужд – алюминиевой катанки повышенной прочности и термостойкости при сохранении низкой величины удельного электросопротивления.



Рис. 1. Брусок кристаллического титана, изготовлен иодидным методом
(чистота – 99,995 %, вес ~ 283 г, длина ~14 см, диаметр ~25 мм)

Полиамид 12 (нейлон 12) и композиции на его основе применяются как конструкционный, электроизоляционный и антифрикционный материал в электротехнической, радиотехнической, автомобильной, авиационной, нефтедобывающей, приборостроительной, медицинской и других отраслях промышленности. Для ВВСТ используется, к примеру, в производстве очень гибких трубок и шлангов для пневматических систем, в оружии для магазинов и прикладов современных автоматов. Полиамид 12 обладает [5] высокой ударопрочностью (в том числе при низких температурах), имеет самое низкое влагопоглощение среди амидов, высокую стабильность размеров и лучшие диэлектрические свойства, что позволяет применять его в северных широтах, стоек к действию масел, жиров, углеводов, нефтепродук-

тов, спиртов, кетонов, нетоксичен. Однако цена изделий может быть в 3–5 раз выше, чем на продукты из ПА66. В США и ЕС наиболее распространенные решения выполняются на основе ПА66 ввиду сочетания высоких физических, химических характеристик и приемлемой стоимости сырья.

Важным перспективным конструкционным материалом для технологии 3D-печати является теплостойкий диэлектрический функциональный аморфный полимер – полисульфон и сопутствующая задача малоотходной технологии его синтеза.

В последнее время большое внимание уделяется разработкам прочных, упругих, прозрачных и легких материалов посредством преобразования аэрогелей предназначенных, например, для производства облегченных бронежилетов, брони для техники, демпфирующих покрытий и прочных строительных материалов.

Так группа исследователей из лаборатории департамента технологий и наук полимеров Чжэцзянского университета (Zhejiang University, Китай) разработала самый легкий материал в мире – графеновый аэрогель (рис. 2), который можно использовать в качестве изоляционного материала, подложки катализатора или высокоэффективного композита. Плотность ультра-легкого материала ниже плотности гелия и вдвое меньше водорода. Вместо золь-гелевой технологии и других методов, используемых для создания аэрогелей, в Китае применили новый способ сублимационной сушки коллоидного раствора, состоящего из жидкого наполнителя и частиц графена, который помог создать углеродную губку настраиваемой формы.



Рис. 2. Графеновый аэрогель, плотность – $0,16 \text{ мг/см}^3$

Графеновый аэрогель может поглотить органические материалы, в том числе и нефть, по весу превышающие в 900 раз его собственный вес с высокой скоростью поглощения (один грамм аэрогеля поглощает 68,8 грамма нефти всего за одну секунду), что делает его привлекательным материалом для использования в качестве абсорбирующего разлитые нефтепродукты материала. Данный материал по своим физико-механическим характеристикам, к примеру, может решить извечную проблему с подошвой для обуви в костюме сапера.

Замечен стремительный рост разработок прочных износостойких тканей, текстильных волокон, а также новых методов трехмерного прядения; электропроводящих волокон на основе углеродных нанотрубок (рис. 3) для производства сверхлегких бронежилетов, «умной» одежды, интеллектуальных адаптивных маскирующих материалов и покрытий в види-

мом и ИК-диапазонах за счет управляемого в реальном масштабе времени изменения характеристик поглощения, рассеяния и излучения. Возможно использование в системах летного контроля, сенсорах, двигателях.

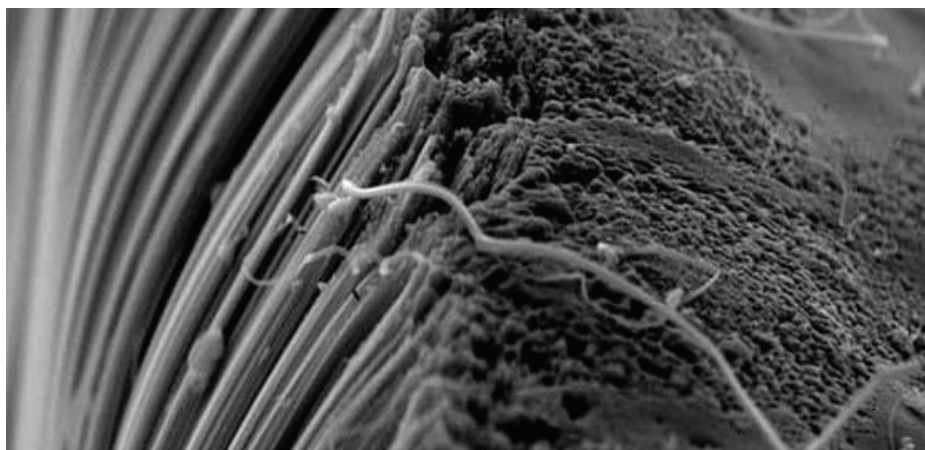


Рис. 3. Углеродные нанотрубки

Для оборонной техники актуально создание и производство улучшенных и перспективных марок фторсилоксановых каучуков нового поколения (покрытия по металлу, стали, алюминию, никелю, титану, оргстеклу; устойчивы при температурах от -60 до $+250$ в агрессивных средах масел, топлива, растворов кислот и щелочей), фоточувствительных полимерных смол с повышенным сроком хранения и энергоэффективных ультрафиолетовых светодиодных установок для отверждения изделий, эластифицированных эпоксидных смол для технических задач точного приборостроения, разработка новых высокоэффективных вяжущих – ненасыщенных поликетонов (покрытия, клеи, герметики).

Для получения современных конструкционных материалов для энергетики важное значение имеют разработки, связанные с теплоизоляционными материалами со сверхнизкой теплопроводностью (на уровне или ниже теплопроводности воздуха), исследования по формированию наноразмерных пор в структуре материала.

С целью защиты человека от вредного воздействия радиации, радиоизлучения, а также сохранения базовых физико-механических характеристик материалов и конструкций и недопущения их деградации не теряют актуальность работы по стойким к вредным электромагнитным, нейтронным и гамма-излучениям веществам.

Функциональные материалы

Технологии применения жидко-кристаллических (ЖК) материалов *в качестве механических сенсоров* позволяют регистрировать давление, а также служить сенсорами механических деформаций и напряжений, способны изменять оптические характеристики под воздействием света. Используются для детектирования примесей вредных или опасных веществ в окружающей среде, в том числе с использованием дистанционных оптических и автономных методов не требующих потребления энергии.

Современные сенсорные материалы позволяют детектировать воздействия механических и электромагнитных полей на устройства, инженерные и транспортные объекты, в том числе в автономном режиме, служат для отображения, преобразования и трансляции информации по оптическим каналам связи. Необходимость замены пленок из хрупкого оксида ин-

дия и олова стимулирует исследования и разработки новых сенсорных ЖК материалов для дисплеев из перспективных материалов на основе графена, серебряных нанопроволок, иных прозрачные токопроводящих оксидов и различных полимерных пленок. Актуальны разработки методов подавления шумов электромагнитной природы и специфических «шумов от кончиков пальцев» в сенсорных ЖК LED и OLED дисплеях стандартных размеров.

Широкое применение в различных отраслях имеют интегрированные сенсорно-диагностические системы для контроля окружающей среды и состояния человека, в том числе на основе графена: BOSH и Институт исследований твердого тела Макса-Планка создали на основе графена магнитный датчик в 100 раз чувствительнее, чем эквивалентное устройство на основе кремния [6].

С использованием сегнетоэлектриков (пьезоэлектриков) разрабатываются высокоточные позиционирующие устройства, например, для сканирующей зондовой микроскопии (исследования, диагностика структуры и качества), для медицинской техники. Ряд наноустройств на базе пьезоэлектриков уже создан (нановесы, одномерные наноструктуры из титаната бария или оксида цинка, использующиеся для генерации электроэнергии).

Создание одномолекулярных сенсорных структур, структур на основе фуллеренов имеет широкое применение [6] от диагностирования до персонифицированной медицины и «точечной» доставки лекарственных средств.

Перспективным направлением в области *функциональных материалов для энергетики и электротехники* является разработка новых полимерных электролитов для систем хранения и накопления энергии [7], электрохимических систем на основе ионных жидкостей. Применяются в системах питания на телекоммуникационных спутниках (в сочетании с солнечными батареями), в устройствах мобильной радиосвязи, ноутбуках и в системах автономного питания для обмундирования военнослужащих нового поколения. Основное место в зарубежных исследованиях занимают вопросы разработки лабораторной технологии, позволяющей контролировать свойства и состав жидкостных каналов и локальной прочности каркаса в процессе приготовления слоев. Ускорение работ в России может быть достигнуто за счет теоретического и экспериментального исследования транспорта сольватированных ионов в неоднородных средах и разработки стохастических моделей твердых полимерных электролитов.

Развиваются работы по созданию новых видов топлива (включая газомоторные виды топлива – ГМТ) и функциональных смазок, а также по способам транспортировки и хранения электроэнергии/энергии на основе технологии ультра-дисперсии газов в жидкостях.

Ожидается, что углеродные наноконпозиты как сверхемкие электроды в двух и трехмерных структурах с большой площадью поверхности смогут хранить огромные объемы энергии являясь суперконденсаторами.

Исследования и разработки низкоразмерных слоистых систем и наноструктур в области спинтроники можно будет применить для использования в средах записи информации, сенсорах магнитных полей и устройствах спиновой электроники, а также в системах «стелс-технологий» для ВВСТ.

Крупнейшие мировые производители электронных устройств активно занимаются развитием иных механизмов функционирования электроники, основанных на самоорганизации проводящих каналов («синапсов») внутри твердотельных или полимерных материалов – технологий адаптивной логики (например, мемристоры).

Интересны работы по модификации физических и химических свойств углеродных и органических наноматериалов под действием сверхкороткого лазерного импульсного воздействия с целью создания технологии мультифотонной трехмерной печати и функционализации для электроники.

Обладают уникальными свойствами высокоэффективные полупроводниковые двумерные нанокристаллы, на основе халькогенидных соединений, находящиеся в режиме размерного квантования: гигантской силой оптического осциллятора (материалы для солнечных

батарей, которые могут также использоваться в качестве люминесцентных покрытий, телевизионных матриц, светодиодов, фотоконвертеров). Дополнительно проявляют каталитическую активность, в частности, фотосенсибилизированные процессы искусственного фотосинтеза, обладают эффектом «квантовой ямы» и сверхрешетки, способны генерировать лазерное излучение. На их основе создаются гибридные полифункциональные материалы.

Оптические материалы используются во многих системах и устройствах. Важное значение имеет создание кристаллических материалов: малоразмерных тугоплавких монокристаллов, нелинейно-оптических, электрооптических, акустических, сцинтилляционных кристаллов, микро- и нанокристаллических слоев и композитов для высокоэффективных компактных лазерных и электромагнитных систем нового поколения.

Требуют развития технологии выращивания многофункциональных монокристаллов с уникальными свойствами, направленные на дальнейшее инновационное развитие внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке. На слуху проблемы с дефектами и чистотой более дешевых монокристаллов из Китая.

Глобальный лидер в производстве сапфира – компания «Монокристалл» занимает долю в 44% на мировом рынке материалов для индустрии светоизлучающих диодов и потребительской электроники, а также металлизационных паст для солнечной энергетики [8]. В самом конце 2016 г. на заводе был выращен рекордный кристалл по своему весу (рис. 4).



Рис. 4. Первые в мире кристаллы сапфира весом 300 и 350 кг

На сегодняшний день компания экспортирует более 98% продукции в более чем 25 стран мира, имеет 200 потребителей на трех континентах.

Появление нового класса искусственно модифицированных материалов с особой структурой, метаматериалов, стало причиной интенсивных исследований явлений, связанных с отрицательным коэффициентом преломления. Рефракция и сильная дисперсия являются особыми свойствами метаматериалов. Для создания суперлинзы используются чередующиеся нанесенные на подложку слои серебра и фторида магния, на которых нарезается нанорешетка. В результате создается трехмерная композиционная структура с отрицательным показателем преломления в ближней инфракрасной области [9]. Во втором случае, метаматериал был создан с помощью нанопроволок, которые электрохимически выращивались на пористой поверхности оксида алюминия [10]. Метаматериалы идеальны для маскировки объектов, так как их невозможно обнаружить средствами радиоразведки.

Решающую роль в создании современных изделий имеют новые *магнитные материалы*, применяемые в энергетике, электротехнике и теплотехнике. Технологии производства эффективных магнитотермических материалов.

На основе жидких магнитов и программируемых магнитов с переменной полярностью ведутся разработки сенсорных дисплеев нового поколения с воспроизведением рельефа.

Активно проводятся исследования электрореологических и магнитореологических жидкостей с применением высокодисперсных магнитных частиц для обеспечения больших передаваемых напряжений сдвига в различных устройствах (для контроля вибрации из-за их быстрого времени отклика на приложенное магнитное/электрическое поле и обратимое изменение их жесткости и демпфирующих свойств). При наложении магнитного поля, магнитореологическая жидкость может изменять предел текучести, в зависимости от ее физико-химического состава от 0 до 50–100 кПа.

Для создания ВВСТ, конструкций и продуктов гражданского назначения необходимы исследования и технологии создания супергидрофобных *многофункциональных защитных покрытий* для конструкционных материалов, работающих в неблагоприятных погодных условиях, обеспечивающих многофункциональную долговременную защиту от коррозии, обледенения, сезонных механических разрушений, в том числе пористых материалов. Покрытия для авиационных материалов позволят снизить энергетические и технологические затраты на функционирование противообледенительных систем авиатехники.

С целью устранения отставания в исследованиях и разработках в области магнито-диэлектрических систем особое значение приобретают проекты по магнитным СВЧ наноматериалам и широкополосным радиопоглощающим покрытиям на их основе [11] для ЛА и БПЛА, а также надводных кораблей с радиолокационной заметностью, лежащей ниже уровня обнаружения в условиях боевых действий. Ближайшая задача – разработка растворных и электрохимических технологий для контролируемого роста наноразмерных слоев специальных сплавов.

Ускорение работ может быть достигнуто за счет опережающего теоретического исследования строения и свойств наноразмерных композитов с применением методов вычислительной квантовой химии и прикладной электродинамики СВЧ.

Для новых типов литографии и коллоидных двумерных регулярных покрытий большой площади разрабатываются высокоразрешающие (в т.ч. трехмерные) резисты совместимые с широким спектром подложек: с гибкими, наноткаными, рулонными.

Широкий спектр применения с существенными преимуществами у функциональных покрытий на основе алмазоподобных наноструктур [7]: автомобильные двигатели, уплотнения клапанов, режущие и формовочные инструменты, в микроэлектронике – гидрофобные покрытия для планшетов и самосмазывающие поверхности для магнитных жестких дисков, в оптике – просветляющие покрытия в широком оптическом диапазоне.

Новые типы оружейных смазок и сопутствующие технологии могут найти применение в системах вооружения, производстве машинного оборудования и инструментов. Например, сухие смазки многократно повышают износостойкость оружия и защиту от воздействия коррозии.

Перспективными [11] являются разработки антикоррозионных покрытий на основе металлов ниобия и молибдена, антиокислительных покрытий на основе боридов металлов, создание многофункционального полимер-минерального композиционного материала и покрытий на его основе с повышенной адгезией к широкому классу конструкционных материалов.

Разработка принципов направленного конструирования *наноструктурированных мембранных материалов* для микро-, ультра- и наночистоты, первапорации и газоразделения позволит создать технологии фильтрации наночастиц, органических молекул и даже относительно крупных солей.

Гибридная технология многослойных планарных металлоксидных мембран необходима для изготовления высокоэффективных принципиально новых композитных фильтров различного целевого назначения. Например, композиционная мембранная фольга для мембранных элементов и устройств. Мембраны из оксида графена могут применяться для фильтрации воды в перспективных войсковых средствах полевого водообеспечения, станциях комплексной очистки, для систем опреснения и автономного снабжения чистой и пригодной для питья водой на кораблях.

Для *биомиметических материалов*, подражающих биологическим тканям, прообразом служат способности природных объектов, как из растительного, так и из животного мира. В качестве примера можно привести открытие-закрытие лепестков цветка в зависимости от освещенности, «эффект лотоса», листья которого не смачиваются водой, или заживление ран у людей и животных. Способности биологических систем развивались на протяжении тысячелетий и безусловно они достойны изучения и последующего копирования в инженерном контексте.

В медицине активно исследуются интеллектуальные капсулы для фармацевтики и новые способы доставки лекарств (например, дендримеры), восстановление утраченных или нарушенных функций.

Гибридные, интеллектуальные и настраиваемые материалы

Развитие нанотехнологий ведет к все более широкому распространению «умных» материалов, реагирующих на изменения окружающей среды и изменяющих свои свойства в зависимости от условий: разработки сплавов с памятью формы (например, никелид титана — нитинол способен выдерживать большие величины деформации и возвращаться к исходной форме после снятия нагрузки), в том числе ферромагнитных, интеллектуальных полимеров и управление их поведением. Технологии, основанные на свойствах материалов с памятью формы необходимы для применения в электронике и медицине, аэрокосмической отрасли, например, для активного гашения колебаний конструкций в определенной области частот.

Интересным направлением развития являются исследования в области самозалечивающихся (самовосстанавливающихся) материалов (конструкции и покрытия от авиатехники до режущих инструментов). Например, композиты на эпоксидной основе с микрокапсулами из дициклопентадиена, керамические самовосстанавливающиеся материалы, бетоны, нити из сплава с «эффектом памяти», самосмазывающиеся материалы (в нанокompозитах наполнитель, углеродные нанотрубки или фуллерены, играют роль «подшипников» и уменьшают трение).

Одежда из «умной» ткани способна реагировать на изменение температуры (пропускать воздух, когда жарко, и уплотняться, когда холодно), способна убивать бактерии, разлагать грязь и пот и легко пропускать влагу наружу, отталкивая внешнюю воду. Такая ткань используется для пошива спортивной и спецодежды, постельного белья в госпиталях и одежды для медиков. Существуют интеллектуальные материалы со встроенными нанодатчиками, отслеживающими нарушения в сердечном ритме.

Огромный спектр применения у электро-, термо- и фотохромных материалов, например ЖК-дисплеи, светочувствительная оптика, просветляющие покрытия в широком оптическом диапазоне, в строительстве — фотокаталитические покрытия.

Диагностика материалов и моделирование структуры и процессов

Важную роль в создании перспективных диагностических систем для детектирования, изучения и расшифровки структур и свойств неорганических и органических материалов от спектроскопии до атомно-размерной томографии является создание оптических и сенсорных сверхчувствительных материалов, развитие лазерных систем: разработка новых остросфокусированных источников ионов [11], например, на базе лазерных источников с магнито-оптическими ловушками (Laser Ion Source using Magneto-Optical Trap). Carl Zeiss созданы

и серийно выпускаются ионные микроскопы ORION с низкоэнергетическими (менее 10 кэВ) источниками ионов гелия, обеспечивающими минимальный диаметр ионного пучка около 0,25 нм.

Важным элементом в создании новых материалов является моделирование структуры, связей структура-свойства, прогнозирование на этой основе качественно новых физических и физико-химических свойств кристаллических и наноструктурированных веществ и материалов.

Статья выполнена в ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по результатам работ в рамках Государственного задания по проекту № 2.12622.2018/12.1.

Список литературы

1. Сайт ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ. Available at: <http://www.extech.ru>.
2. Аналитический обзор. Объемно-наноструктурированные конструкционные материалы с повышенной прочностью на основе металлов: перспективы исследований, производства и применения. М.: ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2015. Available at: http://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_4.pdf.
3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications, 2014 by John Wiley & Sons, Inc., 456 p.
4. Tretyakov Yu.D., Shlyakhtin O.A. Recent progress in the cryochemical synthesis of oxide materials // J. Mater. Chem. 1999. Vol. 9. Pp. 19–24.
5. Сайт компании Анид. Available at: <http://www.anid.ru/poliamid>.
6. Беликов Д.В., Бобринецкий И.И. Развитие рынка новых углеродных наноматериалов / М.: Инноватика и экспертиза: науч. тр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ. Вып. 3(18), 2016.
7. Беликов Д.В., Марышев Е.А., Миронов Н.А. Проблемы создания и внедрения перспективных материалов для системы вооружения – взгляд экспертов Федерального реестра научно-технической сферы / М.: Инноватика и экспертиза: науч. тр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ. Вып. 2 (17), 2016.
8. Сайт компании «Монокристалл». Available at: <http://monocrystal.ru>.
9. Valentine J. et al. (2008). Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. Nature 455 (7211): 376–9. DOI:10.1038/nature07247. PMID 18690249.
10. Yao J. et al. (2008). Optical Negative Refraction in Bulk Metamaterials of Nanowires. Science 321 (5891). DOI:10.1126/science.1157566. PMID 18703734.
11. Аналитические материалы по управлению, финансированию и перспективам развития сферы науки и технологий за рубежом в приоритетном направлении научно-технологического развития «Новые материалы и индустрия наносистем». Научно-технический отчет, г. Москва, 2015 г. Государственная регистрация № 115062510025. Место хранения – ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, инв. № 603. Зарегистрирован в Единой государственной информационной системе учета НИОКР (www.rosrid.ru).

References

1. Site of SRI FRCEC. Available at: The website of the SRI FRCEC <http://www.extech.ru>.
2. *Analiticheskiy obzor (2015) Ob'ёмно-nanostrukturirovannyye konstruktсионnyye materialy s povyshennoy prochnost'yu na osnove metallov: perspektivy issledovaniy, proizvodstva i primeneniya* [Analytical review. Volumetric-nanostructured structural materials with increased strength on the basis of metals: prospects for research, production and application] *FGBNU NII RINKTsE* [SRI FRCEC]. Available at: http://www.extech.ru/files/anr_2015/anr_4.pdf.
3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. (2014) Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. By John Wiley & Sons, Inc., 456 p.
4. Tretyakov Yu.D., Shlyakhtin O.A. (1999) Recent progress in the cryochemical synthesis of oxide materials. J. Mater. Chem. Vol. 9, pp. 19–24.
5. Site of «Anid Polymers». Available at: <http://www.anid.ru/poliamid>.

6. Belikov D.V., Bobrynetsky I.I. (2016) *Razvitie rynka novykh uglerodnykh nanomaterialov* [Development of the market for new carbon nanomaterials] *Innovatika i ekspertiza: nauch. tr. FGBNU NII RINKTsE* [Innovation and expert examination: Scientific Papers of SRI FRCEC]. Moscow. Issue 3(18).

7. Belikov D.V., Maryshev E.A., Mironov N.A. (2016) *Problemy sozdaniya i vnedreniya perspektivnykh materialov dlya sistemy vooruzheniya – vzglyad ekspertov Federal'nogo reestra nauchno-tekhnicheskoy sfery* [Problems of creating and implementing promising materials for the weapons system – the view of Experts of the Federal Roster of Scientific and Technological Sphere] *Innovatika i ekspertiza: nauchnie trudi FGBNU NII RINKTsE* [Innovation and Expert Examination: Scientific Papers of SRI FRCEC]. Moscow. Issue 2(17).

8. Site of Company «Monocrystal». Available at: <http://monocrystal.ru>.

9. Valentine J. et al. (2008) Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature* 455 (7211): 376-9. DOI: 10.1038/nature07247. PMID 18690249.

10. Yao J. et al. (2008). Optical Negative Refraction in Bulk Metamaterials of Nanowires. *Science* 321 (5891). DOI: 10.1126/science.1157566. PMID 18703734.

11. (2015) *Analiticheskie materialy po upravleniyu, finansirovaniyu i perspektivam razvitiya sfery nauki i tekhnologii za rubezhom v prioritetnom napravlenii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya «Novye materialy i industriya nanosistem»* [Analytical materials on management, financing and prospects for the development of science and technology abroad in the priority area of scientific and technological development «New Materials and the Industry of Nanosystems» *Nauchno-tekhnicheskyy otchet, g. Moskva, 2015 g. Gosudarstvennaya registratsiya № 115062510025* [Scientific and technological report, Moscow 2015, State registration No. 1150625 10025] *Mesto khraneniya – FGBNU NII RINKTsE, inv. № 603. Zaregistririvan v Edinoy gosudarstvennoy informatsionnoy sisteme ucheta* [NIOKR Location – SRI FRCEC, inv. No. 603. It is registered in the Unified State Information System for Accounting for Research and Development (www.rosrid.ru)]. Moscow.