ВОЕННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ: МАТЕРИАЛЫ, ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ДВИГАТЕЛИ И ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

MILITARY APPLICATIONS OF NANOTECHNOLOGY: MATERIALS, POWER SUPPLY, ENGINES AND VEHICLES

Ю.Альтман
Ju.Altmann

В продолжении публикации отрывков из книги Юргена Альтмана "Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений"^{*} рассматривается применение нанотехнологий (НТ) в создании новых материалов, источников и аккумуляторов энергии, реактивных двигателей, транспортных средств, ракетного топлива и взрывчатых веществ.

In the excerpts from the book by Jurgen Altmann, "Military nanotechnology. Potential applications and preventive arms control"^{*} such issues are discussed as the use of nanotechnology in the development of new materials, power supply and accumulators, jet engines, transport vehicles, rocket fuel and explosives.

Одним из важнейших результатов развития НТ обещает стать появление разнообразных материалов с новыми свойствами. Для удобства рассмотрения их можно упрощенно подразделить на конструкционные (преимущественно металлы, сплавы и композиты), функциональные и так называемые активные материалы.

МАТЕРИАЛЫ

Композиционные материалы уже давно используются в оборонной промышленности (можно вспомнить, например, что для повышения прочности и уменьшения веса авиационной техники широко применяются пластики, армированные стекловолокном и углеродными волокнами). Развитие НТ привело к возникновению совершенно нового класса таких материалов с повышенными характеристиками – нанокомпозитов или композитов с нанопримесями. Например, оказалось, что слоистые силикаты значительно повышают огнестойкость термопластов, делая их весьма ценным материалом для изготовления изоляционных покрытий силовых кабелей электропитания и другой важной аппаратуры. В некоторых случаях введение нановолокон позволяет почти вдвое повысить коэффициенты упругости и твердости

композиционных материалов, увеличить на 50% прочность и вязкость на растяжение, а также в 10 раз (на порядок!) снизить их проницаемость для различных жидких веществ. Чередуя в гибридных материалах тонкие слои жестких и пластичных полимеров, можно создать очень легкие прозрачные щиты для индивидуальной защиты. Введение нанотрубок в качестве наполнителя придает некоторым композиционным материалам электропроводность и другие важные свойства. Кроме того, введение наночастиц в полимерную матрицу иногда повышает механические характеристики даже так называемых длинноволокнистых композитов, хотя механизм этого явления и степень влияния остаются неясными. Электропроводящие пластики могут найти самое широкое применение в аэрокосмической технике, например в качестве сигнальных проводов, устройств защиты от разрядов статического электричества, для создания разнообразных приводов и гибких электрических схем. Так называемые многофункциональные полимерные материалы могут быть использованы при изготовлении ракетных двигателей, динамичных и "разворачивающихся" в пространстве конструкций, а также при производстве многих

^{*} Альтман Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений / Изд. 2-е, доп. и испр. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2008. 424 с.

стандартных предметов армейского оборудования (например, резервуаров, шин и т.п.).

Композиты с добавками углеродных нанотрубок обладают исключительно высокой прочностью на растяжение, что позволяет создавать на их основе качественно новые, высокопрочные и очень легкие конструкционные материалы. Возможно, такие материалы будут использованы при создании космического "лифта/башни", обеспечивающего дешевую доставку на геостационарную орбиту грузов военного назначения.

Известно, что одним из важнейших факторов, определяющих прочность вещества, является размер составляющих его кристаллитов, поэтому неудивительно, что наноструктурные металлы и сплавы обладают очень высокими механическими характеристиками. Структура обычных литых металлических материалов обычно состоит из зерен размером не меньше нескольких микрон, и лишь специальные методы порошковой металлургии позволяют получать наноструктурные беспористые материалы. Их упругие свойства остаются практически неизменными, но прочность и твердость увеличиваются весьма существенно (например, твердость обычно возрастает в 2-7 раз, прочность нанофазного алюминиевого сплава увеличивается на 60% и т.п.). Для полноты картины следует оговориться, что в некоторых случаях материалы с меньшим размером кристаллических зерен оказываются более хрупкими и жесткими. Повышение прочности и ударной вязкости может быть использовано для формирования наноструктурных покрытий, обладающих малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью при экстремальных температурных условиях.

Кроме этого, внимание материаловедов все чаще привлекают так называемые аморфные материалы (сплавы), которые имеют нерегулярную структуру на наноуровне. Стоит упомянуть, что методы получения таких материалов обычно не связаны с НТ. Интерес к ним обусловлен тем, что они примерно вдвое превосходят традиционные, поликристаллические металлы по способности к упругой деформации. Прочность и сопротивление растяжению этих материалов примерно в два раза выше (а ударная вязкость – в три раза!) соответствующих показателей стали. Более того, их вязкость разрушения возрастает с увеличением скорости деформации, что может быть использовано для получения материалов с повышенным сопро-

тивлением воздействию взрывного заряда или баллистического удара. В некоторых случаях у таких материалов наблюдается повышенная износостойкость и сопротивление коррозии. В этой связи уже сейчас активно изучаются аморфные железосодержащие сплавы, которые могут найти широкое применение в военноморском флоте. Исследовательская лаборатория военно-воздушных сил США AFRL уже изучает возможности использования алюминиевых и титановых аморфных сплавов для авиационной и космической техники.

На основе изучения очень малых по размеру биологических объектов была выдвинута концепция создания новых материалов, образующихся самосборкой из простых биологических "блоков" по иерархической схеме. Метод уже позволяет синтезировать нано- и микроразмерные трехмерные структуры, а в дальнейшем может привести к технологии производства материалов из разветвленных молекул ДНК. Используя исходные блоки различной формы и специфические методики соединения, можно перейти к созданию двух- и трехмерных сложных структур для, например, молекулярной электроники.

Из функциональных материалов можно выделить прежде всего нанокompозитные постоянные магниты, имеющие огромное значение для развития силовой электроники (мощные диоды и транзисторы) и электродвигателей. Еще одно очень перспективное направление исследований в области функциональных материалов – так называемое "самозалечивание" повреждений благодаря наноразмерным добавкам в составе веществ. Изготовленные из таких материалов нановолокна вполне могут быть использованы для создания тканей (с интегрированными в них датчиками и электронными соединениями) или в производстве нанопористых мембран для фильтрации, биологической защиты и т.п.

Активные материалы способны изменять свою форму или даже создавать внутри себя определенные силы при контролируемом изменении внешних условий. Классические примеры – пьезоэлектрики, вещества с эффектом памяти формы и т.п. Материалы такого типа могут широко использоваться для обеспечения подвижности деталей военного снаряжения, "конечностей" роботов и т.п. Применение НТ может позволить значительно улучшить характеристики таких материалов и создать их

новые виды, например способные к "сокращению" молекулы, которые можно применять для организации движения экзоскелетов. В качестве альтернативы можно предложить биологические или гибридные материалы на основе миозина или кинезина. Активные молекулы, соединенные с датчиками, источниками энергии и устройствами обработки информации, создают так называемые "умные" материалы, которые планируется в дальнейшем использовать, например, для изготовления аэродинамических элементов самолета, способных изменять свою жесткость и понижать вибрацию конструкции на определенных режимах полета и т.п.

Естественно, что многие из этих перспективных материалов так и не будут запущены в производство и никогда не будут применяться на практике (в том числе, по соображениям экономической целесообразности), однако в целом они обещают привести к революционным изменениям в материаловедении.

ИСТОЧНИКИ И АККУМУЛЯТОРЫ ЭНЕРГИИ

НТ, связанные с разработкой новых источников энергии и устройств или материалов ее накопления, хранения и преобразования, в обозримом будущем будут развиваться, по-видимому, в двух главных направлениях: повышение энергетических возможностей существующих микроустройств при одновременном уменьшении их веса и развитие разнообразных новых устройств с очень низким энергопотреблением.

Основной задачей первого направления, очевидно, является создание новых типов топливных элементов и батарей, а также наноструктурных электродов и мембран. Миниатюрные топливные элементы уже сейчас широко используются в самых различных отраслях авиакосмической техники (электропитание беспилотных устройств, космических спутников и т.д.), а более крупные батареи и элементы с мощностью в десятки киловатт и больше применяются в наземных транспортных средствах, кораблях и т.п. Ожидается, что НТ позволят создать материалы для высокоэффективных устройств аккумулирования водорода и топливных элементов на этой основе, что, кстати, должно стать важным этапом на пути создания экологически чистых, "электрических" автомобилей.

Ожидается также, что на основе органических нанокмполитов будут созданы гибкие и очень легкие солнечные батареи, которые, безусловно,

найдут самое широкое применение в промышленности и бытовой технике.

Нанотехнологические подходы предлагается использовать также при создании генераторов малой мощности для различных микросистемных технологий. Примером таких разработок могут служить программы DARPA Micro Power Generation и Small-Scale Propulsion Systems, направленные на создание очень компактных энергетических устройств с высокой удельной мощностью. Сочетание обычных видов углеводородного топлива, термоэлектрических преобразователей энергии, двигателей внутреннего сгорания, новейших топливных элементов и хорошо известных энергетикам реформинг-установок уже позволяет создавать устройства и батареи, плотность энергии которых превосходит лучшие традиционные образцы в десятки раз. Прототипы более крупных батарей разрабатываются для боевого снаряжения и небольших роботов. Стоит отметить, что НТ используются для решения нескольких проблем одновременно: создания легких, прочных и термостойких материалов; повышения износостойкости материалов и покрытий; синтеза нанопористых мембран и т.д.

Среди принципиально нового оборудования следует особо упомянуть возможность создания "собственных" электрогенераторов (их можно назвать телесными или даже соматическими), способных вырабатывать электрический ток за счет энергии движения человека, незначительных по величине градиентов температуры тела человека или даже биохимических реакций человеческого организма. В одном из проектов DARPA/ONR предлагается имплантировать миниатюрные биотопливные батареи в организм солдата. Вводя внутрь кровеносных сосудов микроустройства (точнее, следует говорить о "монтаже" на стенках сосудов), в которых на специально сконструированных катодах и анодах может происходить окисление глюкозы и восстановление кислорода, уже сейчас удается вырабатывать в лабораторных условиях более 1 энергии в течение недели. Такие топливные системы и элементы могут применяться для питания микродатчиков, микроприводов и телеметрических систем слежения, введенных в организмы растений, животных и человека.

РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Полученные на основе НТ новые материалы, безусловно, найдут множество применений

в реактивных установках и двигателях, хотя бы потому, что такие материалы (и покрытые ими поверхности) смогут выдерживать гораздо более высокие температуры и, следовательно, обеспечат большую термодинамическую эффективность. Кроме этого, использование новых материалов на основе НТ должно повышать КПД за счет различных вторичных эффектов: уменьшения веса подвижных деталей двигателя, снижения трения на контактирующих поверхностях; повышения износостойкости деталей и т.п. Перечисленные преимущества в сочетании с микросистемными технологиями позволят создать новые типы сверхминиатюрных электродвигателей для воздушных, наземных и водных микротранспортных устройств и микроботов.

При работе в очень небольших объемах или на очень малых масштабах неожиданно высокую практическую ценность могут приобрести электромеханические (особенно электростатические) двигатели, производство которых может быть организовано на основе различных комбинаций микросистемной техники и НТ. С другой стороны, сочетание этих технологий позволяет создать и совершенно новые, весьма эффективные электродвигатели малых, но не микроскопических размеров для решения самых разнообразных технических задач. Например, в автомобильной промышленности возможность установки небольших по размеру приводных двигателей на каждом из колес, а возможно и в тормозной системе, приведет к революции, так как позволит убрать из конструкции многие детали (коробку передач, сцепление, генераторы динамо и т.п.).

НТ предоставляют исследователям и инженерам массу принципиально новых возможностей для создания новых материалов по образцу разнообразных биологических структур и объектов. Выше уже упоминались способные к сокращению биомолекулы и материалы с эффектом памяти формы, которые могут применяться в новых составляющих подвижных конечностей или "крыльях" микроскопических устройств и роботов.

Например, в Институте армейской нанотехнологии изучают возможности использования полипиррола – полимера, способного сокращаться или расширяться в зависимости от величины прилагаемого электрического поля – в качестве материала для создания "мышечной" экзосистемы роботов и т.п. Другой технически

очень интересный вариант применения биоструктур состоит в реализации существующих в природе механизмов движения наноразмерных биологических объектов, например бактерий, которые перемещаются, используя так называемые флагеллярные белки. Молекулярный мотор очевидно может быть также создан на основе молекул F1-АТФазы, содержащейся в мембранных митохондриях, а линейное (поступательное) движение может быть обеспечено химическими реакциями с участием миозина и кинезина. Гибридный (искусственный/биологический) ротатор, действующий на основе механизмов АТФазы, уже создан в США. Разумеется, в будущем, помимо этих и других природных соединений, будут использованы и их различные модификации или синтетические аналоги с улучшенными характеристиками.

Благодаря своей легкости и прочности созданные на основе НТ новые материалы должны найти широкое применение в ракетной и космической технике при создании разнообразных корпусов, структурных элементов, баков, насосов и т.п. В качестве абляционных материалов, например, для изготовления корпусов твердотопливных ракет, будут все шире использоваться "коккующиеся" композиты. Новые материалы позволяют создать миниатюрные двигатели для столь же миниатюрных ракетных установок. Например, в одной из программ DARPA (пока без упоминания НТ) предлагается создать жидкостную микроракету с турбонасосом, обеспечивающим реактивную тягу мощностью около 15 Н, что соответствует примерно 1,5 кг. Ракеты такого класса могут выводить спутники весом около 200 г на низкие околоземные орбиты.

ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

Производство более легких и прочных материалов в сочетании с разработкой более легких и мощных двигателей неизбежно должно способствовать прогрессу в конструировании и создании боевых транспортных средств обычного типа для наземных, воздушных и даже подводных сред. Наибольшего прогресса, естественно, следует ожидать в авиации и космической технике, где снижение веса устройств имеет принципиальное значение.

Новые материалы окажут большое влияние на развитие боевых транспортных средств также тем, что позволяют быстро и значительно повысить прочность так называемого легкого бронирования. С другой стороны, в обозримом буду-

щем защита из получаемых на основе НТ материалов не сможет конкурировать, например, со стальными листами, используемыми в современной бронетанковой технике. Поэтому в танках и крупных бронетранспортерах внедрение таких материалов пока ограничится новыми типами топливных элементов и батарей, совершенствованием электрооборудования двигателей установок и т.п.

В далекой перспективе очень интересные возможности для развития авиационной техники обещают материалы с эффектом памяти, которые позволят значительно уменьшить вес многих важных деталей летательных аппаратов: закрылков, гидравлических приводов и т.п. Снижение веса, естественно, будет способствовать использованию более мощных двигателей и/или дополнительного оборудования и вооружения. С другой стороны, стоит заметить, что эти преимущества могут и не играть особой роли, поскольку уже сейчас возможности маневрирования и ведения боевых действий самолетов ограничиваются, главным образом, способностью самих летчиков переносить физические нагрузки, связанные с пилотированием.

НТ должны иметь более существенную роль в производстве и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов, для которых новые технологии будут означать не только снижение веса, но и значительное повышение степени автономности за счет внедрения миниатюрных НТ-компьютеров. Новые вычислительные устройства позволяют уменьшить вес авиатехники, однако не решат проблем, связанных с весом боевой нагрузки (некоторые авиабомбы имеют вес порядка тонны!) и бортового вооружения. В этих направлениях основной эффект внедрения НТ должен быть связан с разработкой более легких и точных средств поражения достаточной мощности. Объединенная программа DARPA, состоящая из девяти подпрограмм создания и развития наземных и воздушных систем для боевых и гражданских беспилотных летательных аппаратов, не упоминает специальных разработок в области НТ, однако возможность использования результатов таких НИОКР представляется очевидной.

Малые беспилотные транспортные и боевые средства могут рассматриваться в качестве шага на пути создания боевых транспортных роботов макроскопических размеров. Проблемы создания сверхмалых устройств и роботов на основе НТ и микросистемной техники мы обсудим отдельно.

РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА И ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Обычно ракетные топлива и взрывчатые вещества состоят из горючего и окислителя, при реакции между которыми выделяется химическая энергия и возникают газовые системы с высокими давлением и температурой. Именно давление таких газов создает механические силы, используемые в военно-технических целях, например, ракета ускоряется за счет отдачи вытекающих из сопла раскаленных газов, пули или снаряды вылетают из ствола, бомбы разрываются с образованием поражающих осколков и взрывной волны и т.п. Горючее и окислитель могут представлять собой разные вещества, которые перед реакцией необходимо каким-либо образом быстро смешивать, или быть объединенными в сложной молекуле, как например, в известной взрывчатке ТНТ (тринитротолуол, $\text{H}_2\text{C} - \text{C}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_3$) и ее производных. В этих молекулах нитрогруппы NO_2 служат источником кислорода в реакциях с углеродом и водородом, а в результате детонации из атомов азота образуются молекулы N_2 . Образно говоря, в таких сложных соединениях реагенты просто "хранятся" во фрагментах молекул достаточно далеко друг от друга, а затем "сближаются" или смешиваются в момент намечаемой реакции. Плотность выделяющейся при реакции энергии, которую называют также теплотой взрыва при постоянном давлении, для ТНТ составляет около 4,5 МДж/кг.

Использование композиционных материалов с наночастицами позволяет обеспечить очень высокий уровень перемешивания горючего и окислителя, что приводит к высокой скорости реакции. Риск случайного взрыва при перемешивании может быть при этом значительно снижен или почти полностью предотвращен применением золь-гель методики, при которой в растворе сначала синтезируются наночастицы требуемого типа, после чего растворитель выпаривается, а образовавшиеся частицы (золь) формируют трехмерные скелетные структуры с порами (гель). Этим способом уже давно производят термитные составы, например смесь оксида железа с алюминием, широко используемые в разных поджигающих составах и при сварочных работах. Известно также, что аналогичным методом (получение геля из раствора) можно выращивать нанокристаллы весьма перспективных в военном отношении веществ, и этот способ уже используется для производства так называемых "внедренных" взрывчатых

веществ типа RDX и PETN, вводимых в матрицу оксида кремния.

Существует и более сложная методика, позволяющая формировать описанную выше золь-гель матрицу непосредственно из компонент горючего, то есть сразу синтезировать матрицу с заданным распределением наночастиц горючего и окислителя со строго выдержанным стехиометрическим соотношением. Более того, варьируя состав такой системы, можно даже регулировать процессы горения и энергосвечения.

Еще более радикальной представляется идея создания молекул нового типа с очень высокой плотностью энергии. Некоторые из предлагаемых учеными методов выглядят весьма непривычными не только для химиков-традиционалистов, но даже и для энтузиастов молекулярных НТ с использованием ассемблеров. Например, в некоторых проектах предполагается "упаковывать" атомы горючего (азота, углерода или водорода) в очень компактные структуры, что должно позволить значительно повысить плотность содержащейся в них энергии. В качестве примера новых, необычных соединений можно привести гипотетические

азотсодержащие фуллерены, например, $C_{48}N_{12}$, свойства и характеристики которых исследователи моделируют в Ливерморской национальной лаборатории США для использования с окислителями различных типов (например, с перхлоратами или оксидами металлов). Основным вопросом заключается в том, окажутся ли новые типы взрывчатых веществ, создаваемые пока лишь теоретически методами абстрактного "молекулярного дизайна", достаточно стабильными для хранения и транспортировки. Исследователей вдохновляет надежда на увеличение плотности выделяемой энергии на десятки процентов, причем некоторые специалисты даже считают, что новые методы позволят увеличить мощность взрывчатых веществ в два раза.

Аналогичные разработки ведутся с целью улучшения горючего для твердотопливных ракетных двигателей, где планируется значительное повышение удельной энергии топлива, а также обеспечение более эффективного регулирования процесса горения. Новые взрывчатые вещества планируется применять также в качестве запальных устройств. ■

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"

Цена 975 руб.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ-3.1

Под редакцией чл.-корр. РАН Ю.А. Чаплыгина

Книга представляет собой сборник научных работ сотрудников и выпускников Национального исследовательского университета "МИЭТ" и касается развивающихся направлений нанотехнологий в электронике. Следует отметить, что каждая из статей – это законченный труд научно-исследовательского либо аналитического характера, отражающий современное состояние исследований в обсуждаемых авторами областях. Книга будет полезна специалистам в различных областях микро- и наноэлектроники, а также молодым исследователям – аспирантам и студентам-магистрантам.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2016. – 480 с.
ISBN 978-5-94836-423-0

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru