

# НАНО

3(45)

# ИНЖЕНЕРИЯ

2015

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ





# МАШИНО ИНЖЕНЕРИЯ

3(45)

2015

Издается с июля 2011 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Главный редактор**  
И.Б. ФЕДОРОВ,  
д.т.н., проф., академик РАН

**Редакционный совет**  
В.К. БАЛТЯН, к.т.н., проф.  
(г. Москва)  
С.Б. БЕНЕВОЛЕНСКИЙ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Ю.М. ВЕРНИГОРОВ, д.т.н., проф.  
(г. Ростов-на-Дону)  
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.  
(г. Новокузнецк)  
И. ИГНАТОВ, д-р ф.н., проф.  
(г.София, Болгария)  
А.Г. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Б.Г. КОНОПЛЕВ, д.т.н., проф.  
(г. Таганрог)  
В.Н. КРЫЛОВ, к.т.н.  
(г. Рыбинск)  
Б.Г. ЛЬВОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Е.Д. МАКАРЕНКО, зам. гл. ред.  
(г. Москва)  
О.С. НАРАЙКИН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН  
(г. Москва)  
С.Б. НЕСТЕРОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
В.В. ОДИНОКОВ, д.т.н., проф.  
(г. Зеленоград)  
А.В. ПАНИН, д.ф.-м.н., доц.  
(г. Томск)  
Ю.В. ПАНФИЛОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Л.Н. ПАТРИКЕЕВ, к.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Е.А. СЕРИКОВА (г. Москва)  
В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
А.А. СТОЛЯРОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Ю.Б. ЦВЕТКОВ, д.т.н., проф.  
(г. Москва)  
Ю.А. ЧАПЛЫГИН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН,  
зам.гл.ред. (г. Зеленоград)  
В.Н. ЧЕРНЫШЕВ, д.т.н., проф.  
(г. Тамбов)  
В.А. ШАХНОВ, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН,  
зам.гл.ред. (г. Москва)  
В.Д. ШАШУРИН, д.т.н., проф.  
(г. Москва)

**Редакция**  
Е.М. НУЖДИНА

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОИНЖЕНЕРИИ

**Макеев М.О., Иванов Ю.А., Зайончковский В.С., Быков П.А.**  
Исследование толщин и однородности выращивания пленок  
диоксида кремния методом ИК-спектральной эллипсометрии . . . 3

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Слепцов В.В., Куликов С.Н., Кукушкин Д.Ю., Ву Дык Хан.**  
Тонкопленочные технологии формирования покрытий на по-  
верхности высокопористых рулонных материалов для конден-  
саторных структур . . . . . 7

### ПОДГОТОВКА КАДРОВ В НАНОИНЖЕНЕРИИ

**Боброва Ю.С., Бычков С.П., Рябов В.Т.** Олимпиада "Шаг в буду-  
щее, Москва" как инструмент подготовки и средство профориента-  
ции школьников, поступающих на кафедру "Электронные техно-  
логии в машиностроении" (МТ-11) МГТУ им. Н.Э. Баумана . . . 15  
**Добрянская А.Н., Аниховская Л.И., Комаров Г.В., Нуждин Г.А.**  
Классификация и области применения наноматериалов . . . . 27

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТРОЛОГИЯ В НАНОИНЖЕНЕРИИ

**Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Повышение качества измерений  
магнитных свойств нанокристаллических сплавов . . . . . 34

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

**Бычков С.П., Папко В.М.** Расчет параметров режима поддержа-  
ния требуемого состояния образца в вакуумной криокамере. . 39

### ИНФОРМАЦИЯ

**Рышкова Е.А.** Урановое топливо, модифицированное нано-  
добавками . . . . . 45

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-43595 от 21.01.11 г.  
Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей ученых степеней.*

*Журнал распространяется только по подписке, которую можно оформить  
в любом почтовом отделении. Подписные индексы: "Роспечать" – 79280;  
"Пресса России" – 39534; "Почта России" – 10817 или непосредственно  
в издательстве. Тел.: (499) 269-52-98, 268-47-19, 269-54-96. Факс: (499) 269-48-97.  
E-mail: realiz@mashin.ru, nanoeng@mashin.ru, nanoeng2011@gmail.com.*

Перепечатка, все виды копирования  
или воспроизведения материалов,  
публикуемых в журнале, допускаются  
только с разрешения редакции и со  
ссылкой на источник информации.  
За содержание рекламных материалов  
ответственность несет рекламодатель.

# NANO ENGINEERING

3(45)

2015

Since July 2011

**Editor-in-Chief**  
I.B. FEDOROV

**Editorial council**

- V.K. BALTAN  
S.B. BENEVOLENSKY  
Yu.M. VERNIGOROV  
V.E. GROMOV  
I. IGNATOV  
A.G. KOLESNIKOV  
B.G. KONOPLEV  
B.G. L'VOV  
E.D. MAKARENKO  
(editorial assistant)  
O.S. NARAYKIN  
S.B. NESTEROV  
V.V. ODINOKOV  
A.V. PANIN  
Yu.V. PANFILOV  
L.N. PATRIKEEV  
E.A. SERIKOVA  
V.V. SLEPTSOV  
A.A. STOLYAROV  
Yu.B. TSVETKOV  
V.A. SHAKHNOV  
(editorial assistant)  
V.D. SHASHURIN  
Yu.A. CHAPLYGIN  
(editorial assistant)  
V.N. CHERNYSHOV

**Editor**  
E.M. NUZHINA

Reprint is possible only with the reference to the journal.

Advertiser is responsible for the content of promotional materials.

## CONTENTS

### TECHNOLOGICAL PROCESSES IN NANOENGINEERING

**Makeev M.O., Ivanov Y.A., Zayonchkovsky V.S., Bykov P.A.** Investigation of silicon dioxide film thickness and growth uniformity by IR-spectroscopic ellipsometry . . . . . 3

### CONSTRUCTION NANOSTRUCTURED MATERIALS

**Sleptsov V.V., Kulikov S.N., Kukushkin D.Yu., Vu Duc Han.** Thin-film technologies of coating formation on the surface of highly-porous roll materials for condenser structures. . . . . 7

### PERSONNEL TRAINING IN NANOENGINEERING

**Bobrova Yu.S., Bychkov S.P., Ryabov V. T.** The Olympiada "Step to the Future, Moscow" as the instrument of preparation and means of career guidance of the school students arriving on "Electronic Technologies in Mechanical Engineering" chair (MT-11) of MG TU of N.E. Bauman . . . . . 15  
**Dobryanskaya A.N., Anikhovskaya L.I., Komarov G.V., Nuzhdin G.A.** Classification and scopes of nanomaterials. . . . . 27

### ANALYTICAL EQUIPMENT AND METROLOGY IN NANOENGINEERING

**Vvedensky V.Yu., Nuzhdin G.A.** Improvement of quality of measurements of magnetic properties of nanocrystal alloys . . . . . 34

### MODELING NANOMATERIALS AND NANOSYSTEMS

**Bychkov S.P., Papko V.M.** Calculation of parameters of the mode of maintenance of the demanded condition of a sample in the vacuum cryocamera. . . . . 39

### INFORMATION

**Ryshkova E.A.** Uranium fuel, modified with nanoadditives . . . . . 45

*Journal is registered by Federal Service for Supervision in the Shere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). The certificate of registration ПИ № ФС77-43595 от 21.01.11 г. Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses.*

*Journal is spreaded on a subscription, wich can be issued in any post office/ Subscription index on the catalogues: "Rospechat" – 79280; "Pressa Rossii" – 39534; "Pochta Rossii" – 10817 or in publishing office. Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19, 269-54-96. Fax: (499) 269-48-97. E-mail: realiz@mashin.ru, nanoeng@mashin.ru, nanoeng2011@gmail.com.*

А.Н. Добрянская<sup>1</sup>, Л.И. Аниховская<sup>1</sup>, Г.В. Комаров<sup>2</sup>, Г.А. Нуждин<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>ООО НПФ "ТЕХПОЛИКОМ", г. Москва;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО "МАТИ — Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского", г. Москва;

<sup>3</sup>ООО "КОНСЕРСИУМ", г. Москва)

E-mail: npftpk@rambler.ru

## Классификация и области применения наноматериалов

*Обсужден ряд определений нанотехнологий, принятых и используемых в разных странах. Предложена новая версия базового определения нанотехнологий.*

**Ключевые слова:** наноструктурные материалы, наночастицы, нанотехнологии, наносистема.

*A number of the nanotechnologies definitions accepted and used in the different countries is discussed. The new version of basic definition of nanotechnologies is offered.*

**Keywords:** nanostructural materials, nanoparticles, nanotechnology, nanosystem.

### Введение

На сегодняшний день в научном мире одна из наиболее актуальных, перспективных и одновременно противоречивых областей — это область нанотехнологий. К научным и прикладным разработкам в сфере нанотехнологий подключены все ведущие университета мира. За последние годы создано свыше 1600 нанотехнологических центров; каждый год, начиная с 1992 г., проводятся представительные Международные конференции (NANO), а ежегодное число симпозиумов и семинаров по данной тематике уже составило несколько десятков. На рубеже XX и XXI веков о нанотехнологиях говорили лишь в узких кругах специалистов. Сегодня слово "нанотехнологии" звучит во всех медийных каналах — в Интернете, печатных изданиях, радио и ТВ.

Приставка "нано" определяет диапазон применения нанотехнологий — нанометровые ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ) масштабы. Большинство новых физических явлений в наномасштабах обусловлены волновой природой частиц, поведение которых подчиняется законам квантовой механики. Технологии в диапазоне от метра до микрометра можно считать классическими. Однако классические законы перестают адекватно работать при размерах объектов менее 0,5 мкм (менее 500 нм). Здесь начинается территория, подвластная квантовым законам, доминирует область энергий, соответствующих энергиям химических реакций. Именно здесь осуществляется нанотехнология [1].

Согласно разъяснениям Нобелевского лауреата, академика РАН Ж.И. Алферова, если при уменьшении объема какого-либо вещества по

одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними к *нанотехнологиям* [2].

РОСНАНО под термином "*нанотехнологии*" понимает совокупность технологических методов и приемов, используемых при изучении, проектировании и производстве материалов; устройств и систем, включающих целенаправленный контроль и управление строением, химическим составом и взаимодействием составляющих их отдельных наномасштабных элементов, которые приводят к улучшению, либо появлению дополнительных эксплуатационных и/или потребительских характеристик и свойств получаемых продуктов.

*Нанотехнологии* — совокупность знаний о способах и средствах проведения процессов, основанных на явлениях самоорганизации систем и на использовании внутренних возможностей вещества, позволяющих уменьшить затраты энергии на получение целевого продукта при обеспечении экологической чистоты [3].

Существуют различные виды наноматериалов, каждый из которых характеризуется присущей ему спецификой структуры и, как следствие, свойств. Особенности наноматериалов и создаваемых на их основе наносистем проявляются прежде всего в размерных эффектах, среди которых особое место занимают квантовые эффекты.

Нанотехнологии рассматриваются сегодня и как область исследований, и как направление технологического развития. С одной стороны, это отражает современные тенденции взаимосвязи науки и технологии, а с другой — порождает серьезную терминологическую путаницу. Противоречия начинаются уже в попытках обозначить область исследований в целом и дать определение понятия "нанотехнологии". Так, некоторые авторы [4] выделяют "нанонауку" (nanoscience), занимающуюся познанием свойств наноразмерных объектов и анализом их влияния на свойства материалов, и "нанотехнологию" (nanotechnology), имеющую своей целью развитие этих свойств для производства структур, устройств и систем с характеристиками, заданными на молекулярном уровне. Иногда такое разделение имеет под собой сугубо методическую основу, когда речь идет об анализе научных публикаций (и тогда говорится о "нанонауке" [5]) либо патентов (в этом случае используется понятие "нанотехнологии" [1]). На практике же провести различие между нанонаукой и нанотехнологией оказывается практически невозможным. Поэтому во избежание путаницы отдельные исследователи [6] предлагают ограничиться только одним термином — "нанотехнологии", объединив в нем обе состав-

ляющие. Принимая такой подход, важно предложить согласованное определение нанотехнологий, которое, в частности, призвано обозначить общие границы рассматриваемой области.

Несмотря на наличие различных определений нанотехнологий, единого согласованного варианта, причем такого, который образовывал бы основания для построения соответствующих классификаций, пока не существует.

На международном уровне из всего многообразие подходов, встречающихся в научных публикациях, аналитических обзорах и политических документах разных стран, выделяются пять определений, пользующихся наибольшим влиянием (табл. 1).

Все эти определения были идентифицированы Рабочей группой по нанотехнологиям (РГН) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) в качестве базы для создания унифицированной методологической рамки, необходимой для организации гармонизированной в международном масштабе системы сбора и анализа статистической информации о сфере нанотехнологий [7]. Предлагаемые теми или иными международными либо национальными организациями определения носят характер рабочих, отражая специфику тех конкретных про-

1. Общие определения нанотехнологий

Организация	Определение
VII Рамочная программа ЕС (2007—2013)	Получение новых знаний о феноменах, свойства которых зависят от интерфейса и размера; управление свойствами материалов на наноуровне для получения новых возможностей их практического применения; интеграция технологий на наноуровне; способность к сборке; наномоторы; машины и системы; методы и инструменты для описания и манипулирования на наноуровне; химические технологии нанометровой точности для производства базовых материалов и компонентов; эффект в отношении безопасности человека, здравоохранения и охраны окружающей среды; метрология, мониторинг и считывание, номенклатура и стандарты; исследование новых концепций и подходов для практического применения в различных отраслях, включая интеграцию и конвергенцию с новыми технологиями
Рабочий план Международной организации по стандартизации (ISO) от 23.04.2007	1) Понимание механизмов управления материей и процессами на наномасштабе (как правило, но не исключительно, менее 100 нм по одному или нескольким измерениям), где феномены, связанные со столь малыми размерами, обычно открывают новые возможности практического применения. 2) Использование свойств материалов, проявляющихся на наномасштабе и отличных от свойств отдельных атомов, молекул и объемных веществ, для создания улучшенных материалов, устройств и систем, основанных на этих новых свойствах
Европейское патентное ведомство (ЕПО)	Термин «нанотехнология» покрывает объекты, контролируемый геометрический размер хотя бы одного из функциональных компонентов которых в одном или нескольких измерениях не превышает 100 нм, сохраняя присущие им на этом уровне физические, химические, биологические эффекты. Он покрывает также оборудование и методы контролируемого анализа, манипуляции, обработки, производства или измерения с точностью менее 100 нм
США: Национальная нанотехнологическая инициатива (2001—н.в.)	Нанотехнология — это понимание и управление материей на уровне примерно от 1 до 100 нм, когда уникальные явления создают возможности для необычного применения. Нанотехнология охватывает естественные, технические науки и технологию нанометровой шкалы, включая получение изображений, измерение, моделирование и манипулирование материей на этом уровне
Япония: Второй общий план по науке и технологиям (2001—2005)	Нанотехнология — междисциплинарная область науки и техники, включающая информационные технологии, науки об окружающей среде, о жизни, материалах и др. Она служит для управления и использования атомов и молекул размером порядка нанометра (1/1.000.000.000), что дает возможность обнаруживать новые функции благодаря уникальным свойствам материалов, проявляющимся на наноуровне. В результате появляется возможность создания технологических инноваций в различных областях

грамм и проектов, применительно к которым они и сформулированы, и различаются в зависимости от сферы их применения, решаемых задач и уровня полномочий этих организаций. К примеру, в определении нанотехнологий в VII Рамочной программе ЕС подчеркивается их научно-технологическая составляющая; подходы, принятые Европейским и Японским патентными ведомствами, нацелены на работу в сфере охраны интеллектуальной собственности, а формулировка из Национальной нанотехнологической инициативы США охватывает естественные, технические науки и технологии. Тем не менее, состав приведенного набора определений продиктован, прежде всего, их политической операциональностью (ориентацией на принятие политических решений) и принадлежностью к странам (регионам) с максимальными объемами государственного финансирования научно-технологической сферы (ЕС, США, Япония). Список дополняют так называемое "рамочное" определение ISO, составляющее основу документов РГН, и определение Европейского патентного ведомства (ЕПО) — пока еще единственного источника международно-сопоставимой информации о нанотехнологиях.

Указанные определения объединяет ряд общих черт.

Во-первых, каждое из приведенных определений обращает внимание на масштаб рассматриваемого явления. Как правило, указывается диапазон от 1 до 100 нм, внутри которого могут быть зафиксированы уникальные молекулярные процессы.

Во-вторых, подчеркивается принципиальная возможность управления процессами, происходящими, как правило, в границах обозначенного диапазона. Это позволяет отличить нанотехнологии от природных явлений подобного рода ("случайных" нанотехнологий), а также обеспечить возможность придания создаваемым материалам и устройствам уникальных характеристик и функциональных возможностей, достижение которых в рамках предшествующей технологической волны было невозможно. В свою очередь это означает, что в средне- и долгосрочной перспективе нанотехнологии могут не только содействовать развитию существующих рынков, но и способствовать возникновению новых рынков (продуктов или услуг), способов организации производства, видов экономических и социальных отношений.

В-третьих, характерной особенностью определений является их экономико-статистическая операциональность. Нанотехнологии представлены как явление, поддающееся количественной оценке, — это техники, инструменты, материалы, устройства, системы. Это делает их важным элементом цепочек создания стоимости, однако вопросы оценки вклада нанотехнологий в стоимость конечного продукта и пределов диверсификации существующих секторов производства при их применении требуют дополнительного рассмотрения.

В то же время обращают на себя внимание некоторые различия в указанных определениях. Прежде всего они касаются степени конвергентности и целевого назначения нанотехнологий. Так, в европейском варианте отмечается как интеграция различных технологий в границах нанотехнологии, так и их конвергенция с другими технологиями; выделяются отдельные сферы их применения. Японская версия подчеркивает инновационную природу нанотехнологии. К тому же европейское и японское определения со всей очевидностью отражают распространенное убеждение [2], что использование схожих "строительных элементов" (например, атомов и молекул) и инструментов анализа (микроскопы, компьютеры высокой мощности и др.) в различных научных дисциплинах может привести в будущем к синтезу информационных, био- и нанотехнологий.

Среди приведенных определений встречаются не только общие (базовые), но и так называемые "списочные", в том числе принятое в VII Рамочной программе ЕС. Обычно они формируются путем перечисления научно-технологических областей (направлений), которые относятся к соответствующей сфере. Как показывает случай с биотехнологиями, использование общего и списочного определений способствует эффективному решению различных задач в области статистики, анализа, научно-технической и инновационной политики. Так, базовые определения хорошо подходят для научных дискуссий, достижения консенсуса по общим вопросам, принятия рамочных политических решений. Списочные определения позволяют наладить коммуникацию с технологическими и производственными областями, где новые технологии могут иметь прикладное значение (например, для исследования рынков и компаний), а также обеспечить создание более строгой системы отбора и экспертизы проектов. В конечном итоге это позво-

2. Российские определения нанотехнологий

Документ	Определение
Концепция развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года	Нанотехнологии — это совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле этот термин охватывает также методы диагностики, характеристики и исследований таких объектов
Программа развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года	Нанотехнологии — технологии, направленные на создание и эффективное практическое использование нанообъектов и наносистем с заданными свойствами и характеристиками

ляет повысить точность и достоверность получаемой информации.

В официальной российской практике вплоть до последнего времени действовали два различных базовых определения нанотехнологий, которые представлены, соответственно, в Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года и Программе развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года (табл. 2).

Первая из этих двух версий фокусируется на изучении и создании объектов определенного (наноразмерного) масштаба, вторая — предлагает рассматривать процессы создания и использования нанотехнологий. В обоих случаях отсутствуют указания на особенности, связанные с уникальностью явлений и происходящие в пределах наномасштаба. Кроме того, определение, представленное в Программе развития nanoиндустрии, не несет новой информации о характерном явлении и формулируется исходя из свойств и признаков одного порядка. Это делает его максимально абстрактным и лишает какого бы то ни было уровня операциональности.

С целью преодоления отмеченных выше проблем и выработки такого определения нанотехнологий, которое позволило бы отразить их специфический характер и могло бы быть использовано в сфере статистического наблюдения, а также научно-технологической и инновационной политики, нами была предпринята попытка синтеза эффективных элементов различных существующих подходов. Результатом соответствующих методических усилий стала новая версия базового определения нанотехнологий, которая прошла обсуждение в целом ряде представитель-

ных аудиторий, включая специализированные экспертные совещания и фокус-группы, рабочую группу Научно-координационного совета ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы" по направлению "Индустрия наносистем и материалов", редколлегию журнала "Российские нанотехнологии", первый и второй Международные форумы по нанотехнологиям и т.п. Финальный вариант предлагаемого определения выглядит следующим образом.

Под *нанотехнологиями* предлагается понимать совокупность приемов и методов, применяемых при изучении, проектировании и производстве наноструктур, устройств и систем, включающих целенаправленный контроль и модификацию формы, размера, взаимодействия и интеграции составляющих их наномасштабных элементов (1...100 нм), наличие которых приводит к улучшению либо к появлению дополнительных эксплуатационных и/или потребительских характеристик и свойств получаемых продуктов.

Данное определение учитывает комплексный научно-технологический характер рассматриваемого явления, указывает на специфическую размерность и управляемость основных процессов, подчеркивает их определяющее влияние на свойства создаваемых продуктов и отношение к рыночной новизне. Оно может быть использовано для целей проведения научно-технической экспертизы, формулирования критериев отбора и оценки отдельных проектов, связанных с нанотехнологиями, организации статистического наблюдения в этой сфере.

Предложенное определение было рассмотрено правлением Государственной корпорации "Роснано" в сентябре 2009 г. и принято в качестве рабочего.

**Типы наноматериалов и их общая характеристика**

Наноматериалы подразделяются по степени структурной сложности на наночастицы и наноструктурные материалы (рис. 1).

*Основные типы структур наноматериалов.* Свойства наноматериалов в значительной степени определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов), из которых они состоят. В связи с этим целесообразно классифицировать структуры наноматериалов по этим признакам

(рис. 2). По форме кристаллитов наноматериалы можно разделить на слоистые (пластинчатые), волокнистые (столбчатые) и равноосные [2].

Толщина слоя, диаметр волокна и размер зерна имеют значения 100 нм и менее. Исходя из особенностей химического состава кристаллитов и их границ, обычно выделяют четыре группы наноматериалов [8]. К первой относят такие материалы, у которых химический состав кристаллитов и границ раздела одинаковы. Их называют также однофазными. Примерами таких материалов являются чистые металлы с нанокристаллической равноосной структурой и слоистые поликристаллические полимеры. Ко второй группе относят материалы, у которых состав кристаллитов различается, но границы являются идентичными по своему химическому составу. Третья группа включает наноматериалы, у которых как кристаллиты, так и границы имеют различный химический состав. Четвертую группу представляют наноматериалы, в которых наноразмерные выделения (частицы, волокна, слои) распределены в матрице, имеющей другой химический состав. К этой группе относятся в частности дисперсно-упрочненные материалы.

Наноматериалы имеют ряд структурных особенностей, которые обусловлены наличием параметров, которые могут относиться к структуре как в целом, так и к ее отдельным элементам. В свою очередь, структурные особенности наноматериалов находят свое отражение в необычном проявлении их свойств. Поскольку наноматериалы лежат в основе создания наносистем, то свойства наносистем в значительной степени зависят от свойств наноматериалов. Особенности наноматериалов и создаваемых на их основе наносистем проявляются, прежде всего, в размерных эффектах, среди которых особое место занимают квантовые эффекты.

**Наночастицы** представляют собой наноразмерные комплексы определенным образом взаимосвязанных атомов или молекул.

К наночастицам относятся:

- нанокластеры, среди которых различают упорядоченные нанокластеры, характеризующиеся наличием определенного порядка в расположении атомов или молекул и сильными химическими связями, и неупорядоченные нанокластеры, характеризующиеся, соответственно, отсутствием порядка в расположении

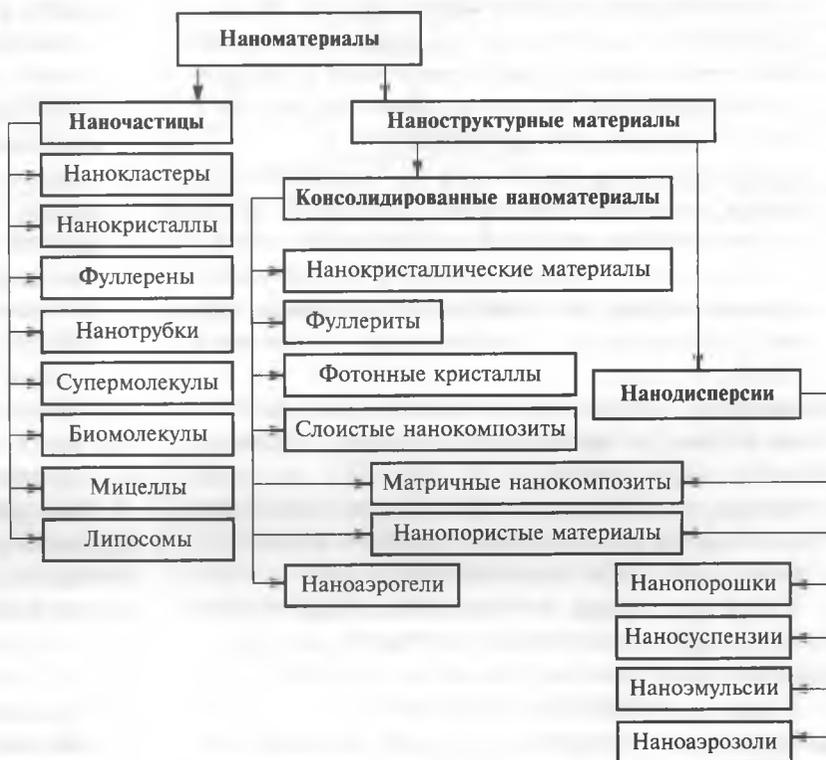


Рис. 1. Классификация наноматериалов по структурным признакам [8]

Форма кристаллитов	Характер распределения			
	Кристаллитное			Матричное
	Состав кристаллитов и границ одинаковый	Состав кристаллитов различен при одинаковом составе границ	Состав и кристаллитов и границ различный	
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

Рис. 2. Основные типы структуры наноматериалов [9]

нии атомов или молекул и слабыми химическими связями;

- нанокристаллы (кристаллические наночастицы), характеризующиеся упорядоченным расположением атомов или молекул и сильными химическими связями — подобно массивным кристаллам (макрокристаллам).
- фуллерены, состоящие из атомов углерода (или других элементов), образующих структуру в виде сфероподобного каркаса;
- нанотрубки, состоящие из атомов углерода (или других элементов), образующих структуру в виде цилиндрического каркаса, закрытого с торцов каркасными куполами;
- супермолекулы, состоящие из "молекулы-хозяина" с пространственной структурой, в полости которого содержится "молекула-гость";
- биомолекулы, представляющие собой сложные молекулы биологической природы, характеризующиеся полимерным строением (ДНК, белки);
- мицеллы, состоящие из молекул поверхностно-активных веществ, образующих сфероподобную структуру;
- липосомы, состоящие из молекул особых органических соединений — фосфолипидов, образующих сфероподобную структуру.

**Наноструктурные материалы** подразделяются по характеру взаимосвязи наночастиц на консолидированные наноматериалы и нанодисперсии.

Консолидированные наноматериалы — это компактные твердофазные материалы, состоящие из наночастиц, которые имеют фиксированное пространственное положение в объеме материала и жестко связаны непосредственно друг с другом.

К консолидированным наноматериалам относятся:

- нанокристаллические материалы, состоящие из нанокристаллов, которые обычно называют нанозернами, или нанокристаллитами;
- фуллериты, состоящие из фуллеренов;
- фотонные кристаллы, состоящие из пространственно упорядоченных элементов, которые сравнимы по размеру в одном, двух или трех направлениях с полудлиной световой волны;
- слоистые нанокompозиты (сверхрешетки), состоящие из слоев различных материалов наноразмерной толщины;
- матричные нанокompозиты, состоящие из твердофазной основы — матрицы, в объеме которой распределены наночастицы (или нанопроволоки);

- нанопористые материалы, характеризующиеся наличием нанопор;
- наноаэрогели, содержащие прослойки наноразмерной толщины, разделяющие поры [8]. Нанодисперсии представляют собой дисперсные системы с наноразмерной дисперсной фазой.

К нанодисперсиям относятся указанные выше матричные нанокompозиты и нанопористые материалы, а также:

- нанопорошки, состоящие из соприкасающихся друг с другом наночастиц;
- наносuspензии, состоящие из наночастиц, свободно распределенных в объеме жидкости;
- наноэмульсии, состоящие из нанокapель жидкости, свободно распределенных в объеме другой жидкости;
- наноаэрозоли, состоящие из наночастиц или нанокapель, свободно распределенных в объеме газообразной среды [8].

Особой разновидностью наноструктурных материалов являются биомолекулярные комплексы, которые, так же как и биомолекулы, имеют биологическую природу.

Довольно часто образцы различных наноструктурных материалов являются объемными (массивными), т.е. характеризуются микро- или макроразмерами, в то время как составляющие их структурные элементы являются наноразмерными.

В разных наноматериалах могут иметь место те или иные особенности проявления эффектов, связанных с малыми размерами составляющих их структур.

Так, в нанокристаллических и нанопористых материалах резко увеличивается удельная поверхность, т.е. доля атомов, находящихся в тонком (~1 нм) приповерхностном слое. Это приводит к повышению реакционной способности нанокристаллов, поскольку атомы, находящиеся на поверхности, имеют ненасыщенные связи в отличие от атомов в объеме, которые связаны с окружающими их атомами. Изменение соотношения атомов на поверхности и в объеме также может привести к атомной реконструкции, в частности, к изменению порядка расположения атомов, межатомных расстояний, периодов кристаллической решетки. Размерная зависимость поверхностной энергии нанокристаллов предопределяет соответствующую зависимость температуры плавления, которая для нанокристаллов становится меньше, чем для макрокристаллов. В целом в нанокристаллах наблюдается заметное из-

менение тепловых свойств, что связано с изменением характера тепловых колебаний атомов.

В ферромагнитных наночастицах при уменьшении размера ниже некоторого критического значения становится энергетически невыгодным разбиение на домены. В результате наночастицы превращаются из полидоменных в однодоменные, приобретая при этом особые магнитные свойства, выражающиеся в суперпарамагнетизме.

Весьма необычными свойствами в силу специфики своей структуры характеризуются фуллерены и нанотрубки, а также молекулярные и биомолекулярные комплексы, функционирование которых подчиняется соответственно законам молекулярной химии и биологии.

Особенности структуры и свойств индивидуальных наночастиц накладывают определенный отпечаток на структуру и свойства образуемых на их основе консолидированных наноматериалов и нанодисперсий. Типичным тому примером являются нанокристаллические материалы, которые характеризуются пониженной долей зерен и, соответственно, повышенной долей межзеренных границ в объеме материала. Одновременно в них происходит изменение структурных характеристик как зерен, так и межзеренных границ. В результате в нанокристаллических материалах существенно изменяются механические свойства. При определенных условиях эти материалы могут обладать сверхтвердостью или сверхпластичностью [8].

В практическом отношении особый интерес представляют электронные свойства наноструктур, обусловленные квантовыми эффектами.

Наноматериалы служат основой для создания наносистем различного функционального назначения, которые подразделяются по принципу действия на электронные, оптические и механические (рис. 3).

Совокупности наносистем определенных типов образуют соответствующие отрасли наносистемной техники — наноэлектронику, нанооптику и наномеханику. Развитие различных типов наносистем приводит к созданию более сложных по конструкции, интегрированных наносистем, таких как нанооптоэлектронные, наноэлектромеханические, нанооптомеханические и нанооптоэлектромеханические системы.



Рис. 3. Классификация видов наносистемной техники по функциональному назначению [10]

Создание наносистем является дальнейшим шагом на пути развития соответствующих микросистем. Обычно на практике наносистемы встраиваются в различные микросистемы, формируя тем самым перспективное направление современной системной техники — микронаносистемную технику.

Библиографический список

1. Швердяев О.Н. Нанотехнологии и наноматериалы: учебное пособие. М.: Изд-во МГОУ. 2009. 111 с.
2. Кодолов В.И., Хохряков Н.В., Тринеева В.В., Благодатских И.И. Активность наноструктур и проявление ее в нанореакторах полимерных матриц и в активных средах // Хим. физика и мезоскопия. 2008. Т. 10. № 4. С. 448—461.
3. Оуэнс Ф. Нанотехнологии: 3-е изд. М.: Техносфера, 2007. 376 с.
4. Кодолов В.И., Хохряков Н.В. Химическая физика формирования и превращений наноструктур и наносистем: монография. В 2 т. Ижевск: ФГОУ ВПО ИжГСХА. 2009. 360 с.
5. Кодолов В.И., Хохряков Н.В., Кузнецов А.П., Семакина Н.В. Проблемы и перспективы развития химии в нанореакторах полимерных матриц // Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 7 (39). С. 77—78.
6. Захаров Г.Н., Альтшулер Н.К. // Сб. тез. докл. Второй Всероссийской конференции по наноматериалам "НАНО 2007". 2007. 36 с.
7. Магеррамов А.М., Рамазанов М.А., Садыхов Р.З., Ализаде Р.А. Магнитные полимерные нанокомпозиты на основе ПФДФ + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> // Нанотехника. 2005. № 4. С. 111.
8. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексашин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1 [Электронный ресурс]. <http://viam.ru/public/>
9. Алферов Ж.И., Копьев П.С., Сурис Р.А. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.
10. Self-organization. URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/en-wiki/174806>.