

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
ННІ МІТ

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

**Пупань Л.І.**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

**з дисципліни «Технології і техніка нанорівня»**

Харків

# МОДУЛЬ 1. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ

## Лекция 1,2. Нанотехнологии как ключевое направление развития технологий XXI века

1. Роль технологий на современном этапе
2. Концепция трех уровней аддитивных технологий
3. Сущность формирования физической поверхности на наноуровне
4. Основные понятия и определения нанотехнологий
5. Хронология развития нанонауки, нанотехники, нанопроизводства
6. Междисциплинарный характер нанотехнологий

**1. Понятие технология сегодня трактуется как совокупность управленческих, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и инжиниринговых процессов, являющаяся фундаментом продуктивной деятельности людей.**

Технологии являются главными объективными предпосылками экономического развития и на этой основе удовлетворения потребностей с помощью новых продуктов, новых материалов, новых процессов или их возможных комбинаций.

Именно промышленные технологии как основные принципы получения новых материалов, изделий с заданными функциональными свойствами, построения производственных процессов и их эффективного надежного функционирования оказывают решающее влияние на жизнь человеческого общества, во многом определяют области и способы деятельности людей, открывают новые возможности гармонизации жизни и творчества человека с окружающей природой в глобальных масштабах.

**2. Важнейшей чертой современного индустриального производства является интенсивное развитие и промышленная реализация *интегрированных аддитивных технологий*, в основе которых лежат различные способы изготовления изделий (или их прототипов) послойным наращиванием («снизу-вверх») объектов до достижения требуемых характеристик на нано, микро- и макроуровнях, а не разделением и перераспределением объемов (по принципу «сверху-вниз»), что характерно для большинства традиционных технологий формообразования заготовки или детали (например, штамповки, литья, обработки резанием, методов физико-химической размерной обработки).**

Аддитивные технологии представляют собой образец эффективного интегрирования последних достижений многих областей знаний – материаловедения, информационных, лазерных, ионно-плазменных и других наукоемких технологий, а также теории управления, оптимизации технологических процессов и конструкций, современных технологий литья, прецизионной и ультрапрецизионной обработки и т.д.

Аддитивные технологии обеспечивают принципиально новый уровень свойств изделий, т.к. предполагают переход в область, определяемую совершенно иными характеристиками **времени, степени сложности, качества и ресурсоемкости.**

Способы аддитивного формообразования реализуются посредством последовательного «выращивания» изделий путем неразъемного соединения элементарных слоев материала различного масштабного уровня.

Это отражено в концепции **трех уровней объектов аддитивных интегрированных технологий**, рис.1.1.

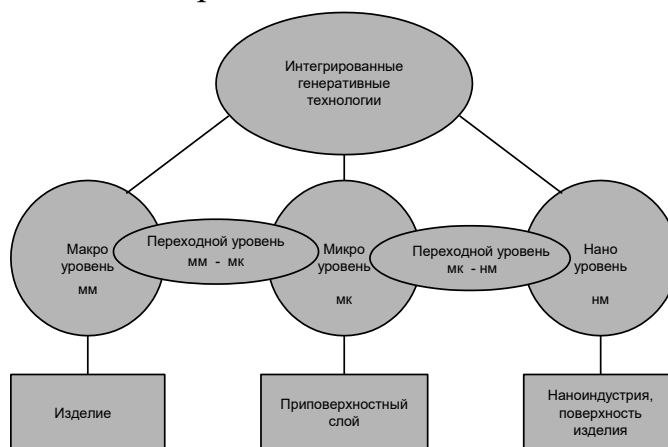


Рисунок 1.1 – Уровни объектов интегрированных аддитивных технологий

На **макроуровне (мм)** производится послойное выращивание твердых тел (*изделий*) путем перехода от виртуального пространства и виртуальных моделей к твердотельным объектам независимо от степени сложности их конструкции, форм и размеров – технологии *Rapid Prototyping*.

На **микроуровне (мкм)** производится наращивание микрослоев из различных материалов толщиной от долей до десятков микрометров. Это технологии осаждения покрытий – вакуумно-плазменные, химические, химико-термические и т.д., обеспечивающие формирование *приповерхностного слоя изделия*.

На **наноуровне (нм)** осуществляется атомно-молекулярная самоорганизация и самосборка, послойное наращивание объема, когда толщина слоев составляет от долей нанометра до 100 нм, т.е. формируется *поверхность изделия*. Такие процессы относят к области нанотехнологий.

Процессы, происходящие на нано-, микро-, макроуровне взаимообусловлены и взаимосвязаны; в совокупности определяют физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых объектов.

Концепция трех уровней интегрированных технологий позволяет рассматривать явления, происходящие в макро-, микро- и нанометрическом диапазоне, на единой методологической основе.

**3. Этапом, позволяющим достичь предельных характеристик современных технологий, является формирование объектов путем структурирования на наноуровне.**

Особенность *генеративных интегрированных технологий наноуровня* заключается в том, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия происходят в нанометровом диапазоне пространственных размеров.

«Сырьем» при этом являются отдельные атомы, молекулы, системы атомов, молекул и их структурных объединений, а не привычные в традиционных технологиях микронные или макроскопические объемы материала, содержащие миллиарды атомов и молекул.

*Происходит переход от манипуляции веществом к манипуляции атомами.*

«Индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, способствует реализации особых структурных состояний, сложных квантовомеханических эффектов, определяющих «аномальные» физические, механические, химические и другие свойства, отличные от свойств традиционных материалов и объектов.

**4. Нанонаука имеет специфическую терминологическую систему, формирование которой продолжается.**

Объединяющим началом понятий и терминов в данной области является то, что приставка «нано-» есть особое обобщенное отражение объектов исследования, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, связанных с характерной протяженностью базового структурного элемента.

Некоторые наиболее важные термины.

**Нано-** десятичная приставка (в переводе с греческого *nanos* – «карлик»), означающая одну миллиардную часть какой-либо величины.

**Наномасштаб** подразумевает порядок размеров между 1 и 100 нанометрами ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

**Нанотехнология** – междисциплинарная область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими, механическими и другими свойствами.

**Наноматериалы** – это материалы, содержащие структурные элементы (кристаллиты, волокна, слои, поры), геометрические размеры которых хотя бы в одном направлении не превышают нанотехнологической границы – 100 нм (от 1 до 100 нм), обладающие качественно иными по сравнению с традиционными материалами физическими, химическими, механическими свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Термин «наноматериалы» является объединяющим и включает в себя большую группу различных материалов – нанокристаллических, нанофазных, нанокompозитных, нанопористых, а также нанокластеры, наночастицы, нанопорошки, нанопокрyтия, фуллерены, нанотрубки и т.д.

**Нанопроизводство** – производство или подготовка наноструктур.

**Наносистема** – материальный объект в виде упорядоченных или самоупорядоченных связанных между собой элементов с нанометровыми размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта качественно новых свойств, связанных с проявлением наномасштабных эффектов.

**Нанообъект** – физический объект исследований (и разработок), размеры которого принято измерять в нанометрах.

**Наномеханика** – наука о кинетике нанообъектов, в которой решаются задачи перемещения и транспортировки атомов и молекул; управления атомами, молекулами и их системами; создания новых молекул, наноструктур, наноустройств; бездефектных материалов и материалов с принципиально новым уровнем свойств.

**Нанотехника** – машины, механизмы, приборы, устройства, материалы, созданные с использованием новых свойств и функциональных возможностей систем при переходе к наномасштабам и обладающие ранее недостижимыми массогабаритными и энергетическими показателями, технико-экономическими параметрами и функциональными возможностями.

**Нанометрология** – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, а также способах достижения требуемой точности в нанометровом диапазоне.

5. Предыстория современных нанотехнологий связана с многовековыми исследовательскими усилиями ученых многих стран мира и имеет свой длинный исторический «шлейф». Наиболее значимыми этапами являются следующие.

◆ «Отцом» нанотехнологии можно считать греческого философа Демокрита, который примерно в **400 г. до н.э.** впервые использовал слово «*атом*» для описания самой малой частицы вещества.

◆ Примером первого использования нанотехнологий можно считать изобретение в **1883 г.** американским изобретателем Д. Истменом, основа-

телем известной компании *Kodak*, рулонной фотопленки, представляющей собой нанесенную на прозрачную эластичную основу эмульсию галогенида серебра, разлагающегося под действием света с образованием *наночастиц чистого серебра*, которые и являются пикселями изображения.

◆ **1905 г.** Первым ученым, использовавшим *измерения в нанометрах*, принято считать известного физика Альберта Эйнштейна, который теоретически доказал, что размер молекулы сахара равен одному нанометру ( $10^{-9}$  м).

◆ **1959 г.** Американский физик, Нобелевский лауреат Р. Фейнман в знаменитой лекции в Калифорнийском технологическом институте, известной под названием «Там, внизу, еще много места» («*There's Plenty of Room at the Bottom*»), высказал *идею управления строением вещества на атомарном уровне*.

◆ **1974 г.** Впервые термин «*нанотехнология*» предложен японским физиком Н. Танигучи в докладе «Об основных принципах нанотехнологии» («*On the Basic Concept of Nanotechnology*») на международной конференции задолго до начала масштабных работ в этой области.

◆ **1981 г.** Немецкие физики Г. Биннинг и Г. Рорер, сотрудники компании *IBM (International Business Machines Corporation)*, создали *сканирующий туннельный микроскоп* (Нобелевская премия 1986 г.) – первый прибор, позволяющий не только получать трехмерное изображение структуры из электропроводного материала с разрешением порядка размеров отдельных атомов, но и осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне, т.е. манипулировать атомами.

◆ **1985 г.** Коллектив ученых в составе Г. Крото (Англия), Р. Керла, Р. Смолли (США) и других открыл новую аллотропную форму существования углерода в природе – фуллерен и исследовал его свойства (Нобелевская премия 1996 г.).

◆ **1986 г.** Создан *сканирующий атомно-силовой микроскоп* (авторы – Г. Биннинг, К. Куатт, К. Гербер, сотрудники *IBM*, Нобелевская премия 1992 г.), позволивший, в отличие от сканирующего туннельного микроскопа, изучать атомарную структуру не только проводящих, но и любых материалов, в том числе органических молекул, биологических объектов и т.д.

Нанотехнологии стали известны широкой публике. *Базовая системная концепция*, осмыслившая предыдущие достижения, прозвучала в книге американского футуролога, сотрудника лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института Э. Дрекслера «Двигатели созидания: наступающая эра нанотехнологии» («*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*»).

◆ **1987 г.** Французский физик Ж.М. Лен ввел в обиход понятия «самоорганизация» и «самосборка», ставшие ключевыми при конструировании нанообъектов.

♦ **1989 г.** Продемонстрировано *первое практическое достижение нанотехнологии*: с помощью сканирующего туннельного микроскопа, произведенного фирмой *IBM*, американские исследователи Д. Эйглер, Э. Швейцер выложили три буквы логотипа компании («*IBM*») из 35 атомов ксенона путем их последовательного перемещения на поверхности монокристалла никеля.

♦ **1991 г.** Японским физиком С. Ииджима открыта новая форма углеродных кластеров – *углеродные нанотрубки*, которые проявляют целый спектр уникальных свойств и являются основой для революционных преобразований в материаловедении и электронике.

♦ **1993 г.** В США организована *первая нанотехнологическая лаборатория*.

♦ **2000 г.** В США приступили к реализации *широкомасштабной программы исследований в области нанотехнологий*.

♦ **2004 г.** В Манчестерском университете (Великобритания) создан *графен* – материал со структурой графита толщиной в один атом, перспективный заменитель кремния в интегральных микросхемах (за создание графена ученым А. Гейму и К. Новоселову в 2010 г. присуждена Нобелевская премия).

♦ **2005 г.** Компания *Altair Nanotechnologies* (США) объявила о создании *наноаккумулятора*.

♦ **2006 г.** Американским ученым из *IBM* удалось впервые в мире создать *полнофункциональную интегральную микросхему на основе углеродной нанотрубки*.

Д. Тур из университета Райса (США) создал *первую движущуюся наносистему – молекулярную машину* размером ~ 4 нм.

♦ **2007 г.** Компания *Intel* (США) начала выпускать *процессоры, содержащие наименьший структурный элемент* размером ~ 45 нм.

♦ **2012 г.** Начало массового производства процессоров с *минимальным элементом* ~ 22 нм (компания *Intel*).

♦ **2015 г.** Производство 14 нм процессоров (компания *Intel*).

♦ **2016 г.** Систематизация данных о свойствах, методах и перспективных применениях наночастиц различных материалов; *создание первой «библиотеки» наночастиц* (США).

♦ **2016 г.** *Разработка системы транспортировки лекарственных препаратов внутри организма человека на основе золотых наночастиц* (США).

Приведенные и другие исследования, открытия, изобретения дали мощный толчок применению нанотехнологических методов в промышленности.

Сегодня в nanoисследованиях задействовано более 50-ти стран мира. За уникальные результаты исследований в этой области присуждено 9 Нобелевских премий. Продукты нанотехнологий представлены на мировом рынке.

**6. Наноиндустрия является междисциплинарной (мультидисциплинарной) областью,** которая требует применения разнообразных подходов и методик, объединения усилий и кооперации ученых, работающих в разных сферах деятельности (в области физики, химии, биологии, механики, информационных технологий, материаловедения, электроники и т.д.), их взаимопонимания, в том числе формирования единой терминологии.

Междисциплинарность нанотехнологий проявляется также в том, что она имеет многочисленные области разветвления в плане применения полученных результатов, причем речь идет не только о науках, но и связанных с ними целых отраслях производства и бизнеса, рис.1.2.

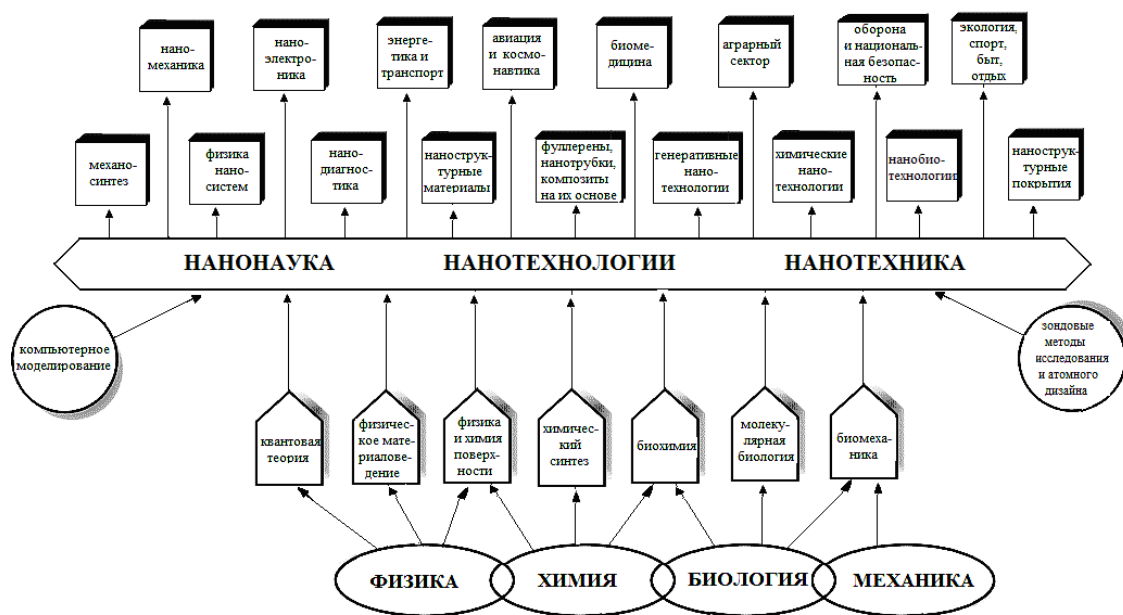


Рисунок 1.2 – Фундаментальные основы и области применения нанонауки, нанотехнологий и нанотехники

### Лекция 3,4. Методы диагностики наноструктур и нанообъектов

1. Особенности диагностики нанообъектов
2. Методики электронной микроскопии
3. Сканирующая зондовая микроскопия и многофункциональность ее методик
4. Спектральные методы исследования
5. Наноиндентирование

1. Развитие нанотехнологий, достижения в разработке и изготовлении нанообъектов в значительной степени определяются уровнем развития методов диагностики их структуры и свойств.

**Основными требованиями к методам и средствам практической диагностики нанообъектов являются:** высокое (атомное) разрешение;



взаимодополнение; комплексная информация об основных физических, физико-химических и геометрических параметрах наноструктур и протекающих в них процессах; возможность регистрации электронных, оптических, магнитных, механических и иных свойств нанообъектов на наноскопическом уровне; неразрушающий характер; диагностика структур *in situ* (т.е. диагностика, встроенная в технологию).

*Для диагностики нанообъектов применяются следующие методы:* электронная микроскопия высокого разрешения, сканирующая зондовая микроскопия; различные методы спектроскопии; наноиндентирование и т.д.

2. Достаточно информативным прямым методом исследования строения наноструктур является *электронная микроскопия (просвечивающая ПЭМ и сканирующая СЭМ)*, основанная на взаимодействии потока ускоренных электронов с веществом и регистрации различных видов формирующегося излучения.

*Основными преимуществами электронной микроскопии* перед другими методами являются: прямое мгновенное формирование изображения (в том числе допускающее наблюдение быстропротекающих процессов), высокое разрешение, широкий диапазон легко изменяемых увеличений, большая глубина резкости при высоком разрешении (особенно в СЭМ), возможность дифракционного исследования (ПЭМ), проведения микрорентгеноспектрального (элементного) анализа (СЭМ), фазового анализа (ПЭМ) и т.д.

Важным направлением развития данной методики является создание *высокоразрешающих электронных микроскопов*, обеспечивающих разрешение до нескольких нанометров (и даже долей нанометра), т.е. позволяющих наблюдать атомарную структуру материалов.

3. Основную роль в исследовании наномира играют методы сканирующей зондовой микроскопии – *СЗМ (SPM, Scanning Probe Microscopy)*, создание которых послужило важнейшим стимулом для развития нанотехнологий.

*Общим у методов зондовой сканирующей микроскопии является наличие зонда* – чаще всего, заостренной иглы (алмазной, металлической, кремниевой, на основе углеродных нанотрубок) с радиусом при вершине ~ 10 нм и *сканирующего механизма-манипулятора*, способного перемещать зонд над поверхностью образца (образец под зондом) в трех измерениях с высокой

точностью – по нормали к поверхности образца до тысячных долей нанометра, в плоскости образца – на уровне сотых долей нанометра, рис.1.3.

В основе работы зондовых микроскопов лежат различные виды взаимодействия зонда с поверхностью.

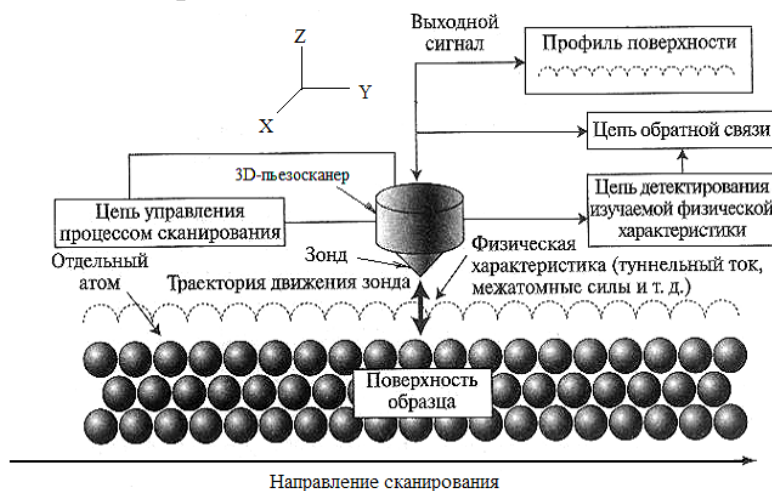


Рисунок 1.3 – Типовая схема зондовых сканирующих микроскопов

Принцип действия *сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)* основан на явлении протекания между металлической иглой-зондом и образцом туннельного тока; в *атомно-силовом микроскопе (АСМ)* используются силы межатомного (межмолекулярного) взаимодействия между поверхностью и диэлектрической иглой; в *магнитно-силовом микроскопе (МСМ)* зонд позволяет чувствовать локальную магнитную структуру; *электростатический силовой микроскоп (ЭСМ)* позволяет обнаруживать элементарные заряды; *сканирующий фрикционный микроскоп (СФМ)* дает возможность получать атомные изображения в режиме сил трения; в *сканирующем оптическом микроскопе ближнего поля (СОМБП)* для анализа используют взаимодействие лазерного луча с поверхностью материала.

Наиболее распространены в настоящее время СТМ, АСМ, СОМБП.

*СЗМ* имеют ряд преимуществ по сравнению с электронными микроскопами по условиям эксплуатации, габаритам и сложности конструкции, получаемому разрешению, гамме исследуемых материалов, технологии препарирования объектов исследования.

**Важнейшим достоинством СЗМ является их многофункциональность** и возможность, помимо исследовательских функций, выполнять и функции активные – конструирование наноструктур с заранее заданными свойствами путем реализации поатомной сборки. Таким образом, зондовые методы позволяют воплотить новую технологическую парадигму «снизу-вверх» и реализовать технологический цикл исследование → создание → контроль структуры на наноуровне.

4. При изучении наноструктур важно не только фиксировать топологию, расположение отдельных атомов, но и определять *химический состав*, т.е. наличие атомов того или иного элемента, их количество. Это возможно с помощью методов спектроскопии.

*К спектральным методам относят методы исследования поверхности твердых тел, основанные на анализе энергетических спектров излучения, поглощения, отражения, рассеяния, возникающих при облучении изучаемого материала электронами, ионами, фотонами.*

Таких методов в настоящее время известно несколько десятков.

Методами спектроскопии исследуют уровни энергии атомов, молекул и образованных из них макроскопических систем, а также квантовые переходы между уровнями, что дает важную информацию о строении и свойствах вещества.

Наиболее информативными методами спектроскопии являются электронная Оже-спектроскопия (ЭОС), инфракрасная и рамановская спектроскопия, фотоэмиссионная и рентгеновская спектроскопия, метод магнитного резонанса.

5. В связи с особой ролью и спецификой механических свойств наноматериалов по сравнению с традиционными материалами к важнейшим методам диагностики можно отнести также *наноиндентирование*, позволяющее определить многие характеристики механических свойств наноматериалов, в т.ч. нанотвердость, модуль Юнга, вязкость разрушения, подвижность дислокаций и т.д.

Сущность этих методов состоит в программируемом приложении малых и ультрамалых усилий ( $\sim 1$  мкН) к индентору и непрерывной регистрации зависимости силы сопротивления  $P$  от смещения (глубины погружения  $h$ ), рис.1.4.

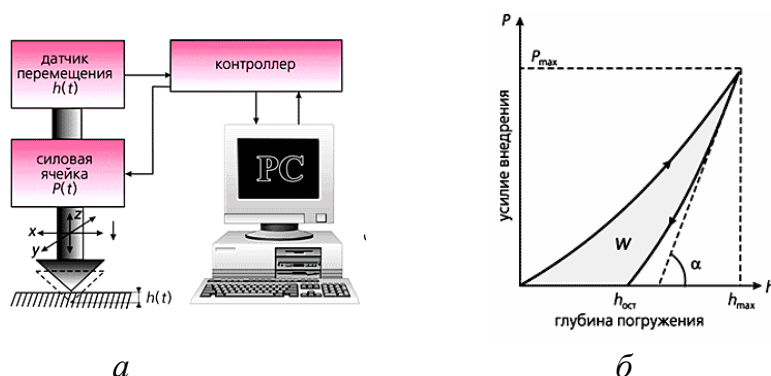


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема нанотестирования поверхности (а) и типичная диаграмма «сила-перемещение» при наноиндентировании – аналог диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  в традиционных макроиспытаниях (б):

$h_{max}$  – максимальная глубина внедрения индентора;  $h_{ост}$  – глубина отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки;  $W$  – поглощенная энергия

Нанотестирование является весьма информативным методом изучения **контактного взаимодействия** различных тел в ходе различных технологических процессов, например, при трении одного тела по поверхности другого, при абразивном износе, эрозионном износе, при тонком помоле веществ в различных мельницах, при механохимическом синтезе продуктов.

*Атомарные процессы, которые происходят при контактном трении в тонких приповерхностных слоях, во многом определяют служебные свойства изделий, их долговечность, износостойкость, коэффициент трения, химическую и каталитическую активность поверхности и т.д.*

## Лекция 5. Методы конструирования материалов и объектов на наноуровне

1. Нисходящие и восходящие подходы
2. Элементарные объекты и методы нанотехнологического конструирования
3. Атомно-молекулярная сборка с помощью ассемблера
4. Механосинтез с помощью СЗМ

**1.** В практике нанотехнологического производства возможна реализация двух подходов – восходящего и нисходящего, рис.1.5.

Нисходящий подход, рис.1.5,*а*, в нанотехнологии основан на том, что для получения наноструктур используют исходные массивные материалы или покрытия. Последовательное уменьшение размеров исходных объектов различными видами обработки позволяет получать конечные изделия с нанометровыми параметрами.

Примером нисходящей технологии является традиционная микроэлектронная технология литографии (лазерной, электронной, рентгеновской), которая основана на воздействии луча на полупроводниковую заготовку и формировании заданной конфигурации микросхемы.

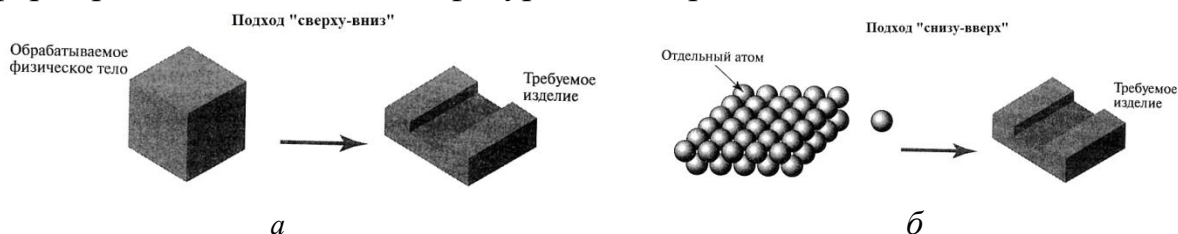


Рисунок 1.5 – Подходы наномонтажа для получения требуемого изделия: *а* – «сверху-вниз» с последовательным уменьшением размеров до требуемых; *б* – «снизу-вверх» путем сборки на атомарном уровне

При восходящем подходе, рис.1.5,*б*, получение требуемых объектов, устройств и материалов с заранее заданными свойствами реализуется путем

последовательного управляемого «наращивания» из отдельных атомов и молекул. Т.е. создание необходимой «конструкции» осуществляется непосредственно из элементов низшего порядка – атомов, молекул и их структурных объединений, располагаемых в требуемом порядке с целью «выстраивания» упорядоченной структуры, что позволяет достичь предельных характеристик технологии на современном уровне знаний.

Этот подход может быть реализован различными методами – атомно-молекулярной сборкой с помощью сканирующей зондовой микроскопии, самоорганизацией и самосборкой кластерных структур, «поверхностными» технологиями и т.д., которые будут рассмотрены далее.

Данная технология может быть представлена как *безотходный молекулярный дизайн изделия*.

Несмотря на низкую производительность в настоящее время, связанную с недостаточным техническим «мастерством», восходящий подход более перспективен, за ним будущее нанотехнологий.

*2. Элементарными объектами нанотехнологии (наномасштабными, наноразмерными элементами), позволяющими искусственно конструировать функциональные материалы с заранее заданной структурой и свойствами, т.е. реализовать наноуровневый этап интегрированных генеративных технологий, являются атомы, молекулы, атомные кластеры и частицы, нанопорошки, нанослойные покрытия, нанотрубки и фуллерены, квантовые ямы, проволоки, точки.*

Использование указанных прецизионных элементарных объектов позволяет с помощью определенных механизмов с высочайшей точностью создавать последовательным наращиванием изделия для применения в различных областях, что составляет суть генеративных методов нанотехнологического производства (конструирования).

**3.** Для перехода от микро- к нанотехнологиям производства материалов и изделий на их основе (т.е. создания макроскопических продуктов на основе генеративной сборки на уровне атомов и молекул) недостаточно только уменьшения размеров элементов, необходимо достижение прецизионности в изготовлении, т.е. создание методик манипуляции элементарными объектами нанотехнологий с целью получения изделий с наперед заданными функциональными свойствами.

Уникальное решение проблемы манипулирования индивидуальными атомами и молекулами для производства наращиванием продуктов с заданной атомарной структурой предложил американский футуролог Э. Дрекслер (1986 г.).

Согласно его идее, для осуществления атомно-молекулярной сборки необходим робот-сборщик (ассемблер), рис.1.6, – молекулярная машина, которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков, т.е. поатомной сборкой.

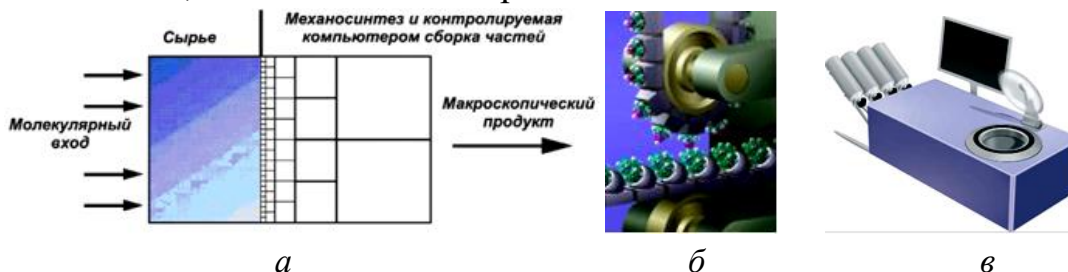


Рисунок 1.6 – Атомно-молекулярная сборка изделий с помощью ассемблера:  
 а – схема процесса генеративной сборки продукции на наноуровне;  
 б – предполагаемая производственная линия наносборки;  
 в – возможный вид нанофабрики

Одной из причин невозможности реализации этой идеи на современном этапе является наличие интерфейса «человек-компьютер-манипулятор», поэтому сама процедура сборки не может быть автоматизирована на наноуровне.

4. В настоящее время процесс конструирования наращиванием структур за счет манипуляции отдельными атомами (механосинтез) возможен при помощи сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) – основного инструмента исследования наноразмерных структур.

Для реализации атомной сборки с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) осуществляют переход работы микроскопа из **режима считывания** изображения (низкие значения туннельного тока и разности потенциалов, достаточно большое расстояние от вершины острия зонда до поверхности) **в режим взаимодействия** (манипуляции), который сопровождается уменьшением расстояния между зондом и атомом, выбранным для перемещения, рис. 1.7.

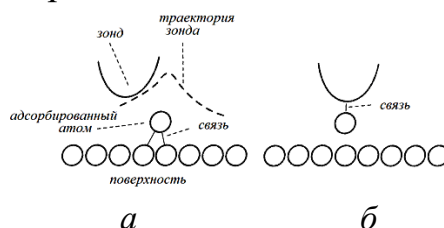


Рисунок 1.7 – Иллюстрация траектории острия зонда СТМ над адсорбированным на поверхности материала атомом:  
 а – режим изображения (острие зонда не контактирует с поверхностью, но располагается достаточно близко для получения изображения);  
 б - режим манипуляции (острие зонда расположено так близко к поверхности, что между ним и адсорбированным атомом возникают силы связи)

Адсорбированные на поверхности материала атомы можно таким способом перегруппировать и поатомно строить на поверхности различные наноструктуры.

*Уникальные возможности СТМ для атомной сборки могут быть использованы в микроэлектронике (наноитографии), для записи информации на носитель и ее считывания, при сборке самовоспроизводимых биологических объектов или уникальных «наноэлектронных схем» искусственного интеллекта, для создания квантовых структур, представляющих интерес для фундаментальных физических исследований.*

Технология механосинтеза, т.е. конструирование структур атомно-молекулярной сборкой путем локального переноса атомов с помощью сканирующей зондовой микроскопии, является технологией предельно достижимой точности и миниатюризации при создании материалов и устройств.

Данная технология пока не пригодна для крупномасштабного производства вследствие низкой производительности и высокой стоимости получаемых изделий. Эти работы находятся в самой начальной стадии развития, и потребуется еще немало усилий для доведения методов механосинтеза до уровня промышленного производства.

## **Лекция 6. Принципы самосборки и самоорганизации**

1. Понятие самосборки и самоорганизации
2. Роль атомных кластеров в процессах самосборки
3. Свойства кластеров

1. Достаточно перспективными и реальными для практического применения являются технологии создания нанообъектов по принципу наращивания «снизу-вверх», основанные на явлении самосборки и принципе самоорганизации.

*Под **самосборкой** (self-assembly) понимают способность атомов и молекул при определенных условиях самопроизвольно соединяться в наперед заданные молекулярные образования.*

***Принцип самоорганизации** предполагает коллективное взаимодействие атомов с созданием сложных упорядоченных структур на более высоком иерархическом уровне организации, чем тот, который наблюдался в исходной системе (создание сложных упорядоченных структур из более простых). Самоорганизация включает взаимодействие и интеграцию, обуславливающие коллективное поведение.*

В отличие от постадийных методов организации системы при поатомной сборке, в данном случае воздействие направлено не на конкретную частицу

(атом), а на все сразу. Требуемую структуру не нужно выстраивать «вручную», помещая нанообъекты в требуемые точки пространства один за другим; создаваемые условия таковы, что нанообъекты делают это сами и одновременно.

«Самопроизвольность» инициируется технологом за счет определенного воздействия на систему – гравитационного, электрического или магнитного, капиллярных сил, эффектов смачиваемости и других приемов, рис.1.8.

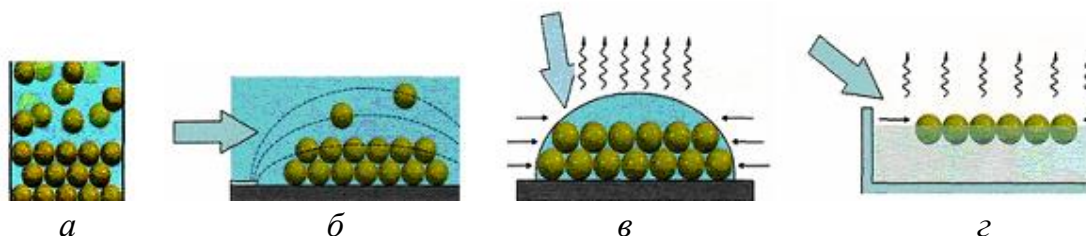


Рисунок 1.8 – Самосборка под действием гравитационного поля (а); электрического поля (б); сил поверхностного натяжения (в, г)

Важнейшим принципом процесса самосборки является то, что строительными элементами могут являться не только отдельные атомы, а компоновочные элементарные блоки – кластеры, состоящие из группы связанных атомов или молекул с размерами до 100 нм. Это весьма важный момент, т.к. построение вещества на уровне атомной сборки, как уже указывалось, весьма неэффективно и требует достаточно длительного времени.

Программное управление модульной самосборкой позволяет получать изделия заданной формы, что, безусловно, является весьма перспективным для практического применения с целью изготовления сложных по форме изделий, в том числе изделий микроэлектроники, биологии и медицины, деталей машин и приборов.

2. Целенаправленное формирование нового класса атомарно сконструированных макроструктур с высокой степенью упорядочения на основе явлений самосборки и самоорганизации предполагает использование в качестве элементарного объекта *наночастиц* или *нанокластеров*, которые являются уникальными образованиями и с научной, и с прикладной точки зрения.

**Нанокластеры** как наноструктуры, состоящие из относительно небольшого количества атомов (от единиц до сотен тысяч), имеющие наноразмер во всех трех направлениях, могут рассматриваться как самостоятельные единицы, обладающие определенными свойствами.

Являясь наиболее типичным представителем наноматериалов, атомные кластеры проявляют истинно наноразмерные эффекты, в том числе квантово-механической природы, и свойства, не присущие тому же материалу в объеме.



Другой, достаточно важный аспект изучения данных атомных образований связан с тем, что они имеют огромный потенциал использования на практике, являясь *универсальной элементарной основой* для целого класса атомарно сконструированных материалов с широким спектром свойств.

Синтезировать наноматериалы из кластеров возможно либо за счет самоорганизации и самосборки, например, кристаллизации на наноуровне, либо принудительным путем, в частности, компактированием с применением высокого давления.

**3.** В зависимости от природы атомов кластеры могут быть металлическими, полупроводниковыми, состоящими из атомов инертных газов.

К некоторым «аномальным» свойствам **металлических кластеров** по сравнению с объемным материалом можно отнести следующие: более низкие значения температуры плавления по сравнению с массивным телом; несовпадение точки плавления с точкой замерзания; возможность отрицательной теплоемкости (при сообщении некоторого количества теплоты их температура падает за счет перестройки структуры); проявление в зависимости от размера диэлектрических, полупроводниковых свойств или свойств проводимости; аномально высокую реакционную способность; отличие химических реакций с одним и тем же реагентом по сравнению с объемным состоянием.

Физико-химические свойства кластеров (цвет, реакционная способность, стабильность, магнитные свойства) в значительной мере зависят от количества атомов  $N$ , составляющих кластер, которое может рассматриваться в качестве **критического параметра**, соответствующего проявлению «наномасштабности».

При формировании металлических нанокластеров чаще всего встречаются образования, состоящие из определенного числа атомов. Это означает, что подобные структуры наиболее устойчивы, стабильны. Данные числа называют «**магическими**» (13, 55, 309, 561, 923, ... 2869 и т.д.), рис. 1.9.

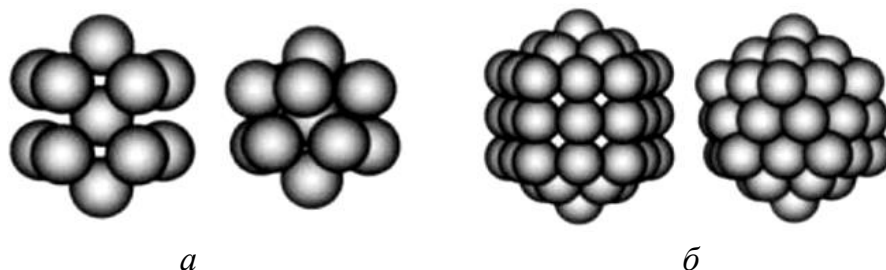


Рисунок 1.9 – Атомные кластеры с числом атомов («магическими» числами) 13 (а) и 55 (б)

## Лекция 7. Технологии формирования поверхностных слоев с атомарной точностью. Квантовые наноструктуры

1. Формирование нанослойных покрытий как пример восходящей технологии конструирования поверхности на наноуровне
2. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии и его применение
3. Особенности формирования, свойств и применения квантовых точек, проволок, ям

**1. Наноструктурные покрытия** классифицируют по размерности структурных элементов следующим образом:

♦ *нанослойные покрытия* – покрытия наноразмерной толщины, т.е. имеющие нанометровый размер в одном направлении, рис.1.10, *а*;

♦ *нанокристаллические покрытия* – покрытия с нанометровым размером кристаллитов, рис.1.10, *б*. Композиционные нанокристаллические покрытия состоят из нанозерен различных фаз.

В отдельную группу могут быть выделены *многослойные наноструктурные покрытия (МНП)* – мультислой микронной толщины, представляющие собой материалы типа «сэндвич», рис.1.10, *в*, характеризующиеся наличием градиента химического состава и свойств по толщине покрытия, сформированные как чередованием нанослоев различных материалов, так и последовательным наращиванием покрытий разного состава с нанокристаллической структурой.

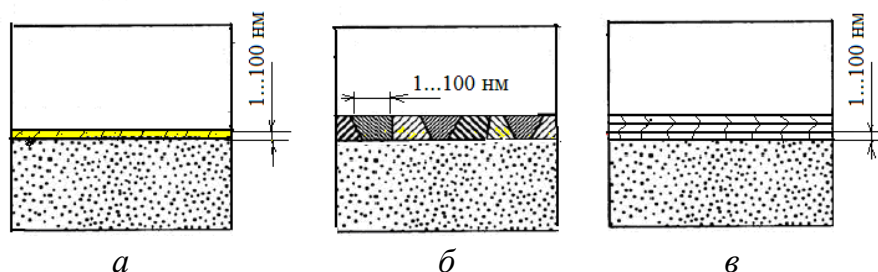


Рисунок 1.10 – Наноструктурные покрытия:  
*а* – нанослойные; *б* – нанокристаллические; *в* – многослойные

Нанослойные покрытия, см. рис.1.10, *а*, т.е. покрытия наноразмерной толщины (1...100 нм), являются примером восходящей технологии конструирования поверхностных слоев на наноуровне.

В качестве технологий создания подобных поверхностных наноструктур широко применяют **модифицированные пленочные PVD-технологии**, т.е. технологии, основанные на физических процессах осаждения из паровой фазы (см. Л.№10), позволяющие выращивать слои с атомарной точностью.

**2.** Один из современных и перспективных методов создания нанослойных покрытий – **молекулярно-лучевая эпитаксия – МЛЭ**

(*Molecular Beam Epitaxy – MBE*), представляющая собой усовершенствование способа осаждения металлических пленок испарением в вакууме, в основе которой лежит управляемая конденсация атомов на поверхности подложки.

Под эпитаксией понимают ориентированный рост одного монокристалла на поверхности другого, т.е. наследование растущим кристаллом структуры подложки. При этом физико-химические свойства наращиваемого эпитаксиального слоя существенно отличаются от свойств подложки.

Метод МЛЭ основан на испарении и конденсации вещества из молекулярных или атомных пучков в сверхвысоком вакууме ( $\sim 10^{-9} \dots 10^{-7}$  Па).

Упрощенная схема установки для проведения молекулярно-лучевой эпитаксии представлена на рис.1.11.

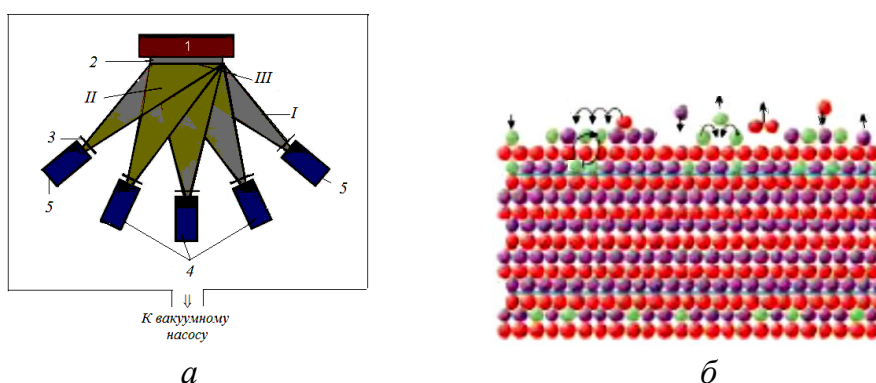


Рисунок 1.11 – Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии (а) и схема роста пленки путем «атомной укладки» (б):

*I* – зона генерации молекулярных пучков; *II* – зона смешивания испаряемых элементов; *III* – зона кристаллизации на подложке;

*1* – блок нагрева; *2* – подложка; *3* – заслонка отдельной ячейки;

*4* – ячейки основных компонентов пленки;

*5* – ячейки легирующих примесей

Сверхвысокий вакуум и малая скорость поступления атомов приводят к эпитаксиальному росту пленок посредством *практически монослойного заполнения растущей поверхности*.

Важной особенностью молекулярно-лучевой эпитаксии является недостижимая другими методами высокая точность контроля химического состава и толщины осаждаемых слоев.

Нанослойные покрытия и структуры на их основе с точно заданными геометрическими размерами, высокими электрическими и оптическими свойствами применяются в микро- и наноэлектронике, опто- и акустоэлектронике, в устройствах интегральной оптики, в вычислительной технике и других областях, основной тенденцией развития которых является использование функциональных объектов малых размеров.

3. Важнейшими наноструктурами, формирование которых предполагает реализацию процессов самосборки на атомно-молекулярном уровне, представляющими интерес как с научной, так и с прикладной точки зрения, являются квантовые структуры – ямы, проволоки, точки, обладающие достаточно выраженными квантовыми свойствами.

Последовательность этих структур при уменьшении размеров для прямоугольной геометрии, а также геометрические области квантования показаны на рис. 1.12.

Основной технологией формирования данных структур является *PVD*-технология формирования тонких пленок (метод молекулярно-лучевой эпитаксии), основанная на реализации явления самосборки и принципа самоорганизации.

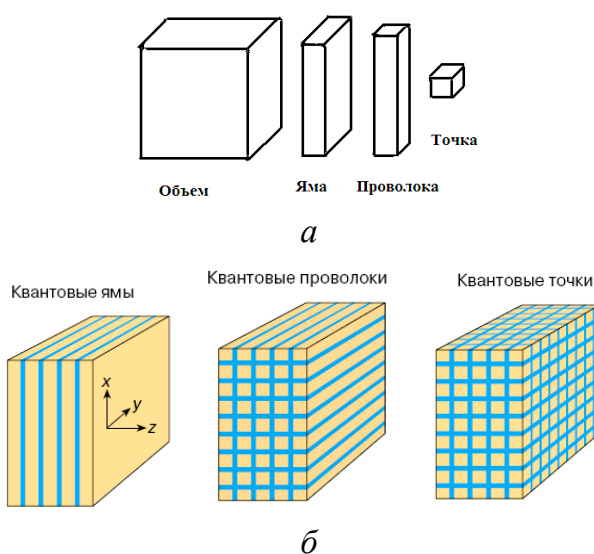


Рисунок 1.12 – Последовательность прямоугольных наноструктур (а) и геометрические области квантования в квантоворазмерных структурах (б)

**Квантовые точки** (*quantum dot*) – нанообъекты, в которых движение носителей заряда ограничено во всех трех направлениях – предельный случай уменьшения размеров, при котором во всех трех измерениях размеры лежат в нижней части нанометрового диапазона. Это нульмерные объекты (0D – объекты), см. рис.1.12.

Структуры с квантовыми точками являются, вероятно, наиболее перспективными материалами будущего для различных сфер применения, в том числе для микроэлектроники, медицины и т.д.

**Квантовые проволоки** (*quantum wire*, иногда их называют «квантовыми нитями») – системы, в которых движение носителей заряда ограничено в двух направлениях, т.е. образец мал в двух измерениях и имеет большие размеры в третьем измерении. Это одномерные нанообъекты (1D – объекты), см. рис.1.12.

**Квантовые ямы** (*quantum well*) – системы, в которых движение частицы ограничено по одной координате, т.е. в данном случае размеры образца в одном измерении лежат в нанометровом диапазоне, а в двух других остаются большими, см. рис.1.12.

По своей сути к квантовым ямам относятся двумерные нанобъекты (*2D* - объекты), т.е. нанослойные пленки.

Приборные применения квантоворазмерных структур: высокочастотные полевые транзисторы, резонансные туннельные диоды, лазеры, источники света среднего ИК-диапазона, детекторы ИК-излучения, логические элементы и устройства сверхплотной записи информации, высокочувствительные датчики различных физических величин, в том числе для применения в машиностроении, и т.д.

## Лекция 8. Моделирование наноструктур

Основанное на мощном математическом аппарате, компьютерное моделирование играет ключевую роль в разработке наносистем.

Существует несколько основных типов математического моделирования в нанотехнологии, табл.1.1.

Таблица 1.1 – Примеры нанотехнологических *CAD*-программ

Тип моделирования	Примеры программ
Визуализационное	<i>RasMol</i>
Вычислительное	<i>Chem3D</i>
Инженерное	<i>NanoXplorer</i>

**Визуализационное моделирование.** Наиболее простая из современных визуализационных программ – программа *RasMol*, которая позволяет наблюдать в трехмерном виде наноструктуры.

В программе можно рассмотреть наноструктуру, увидеть химические элементы, связи и группы, а также экспортировать результаты в графический файл.

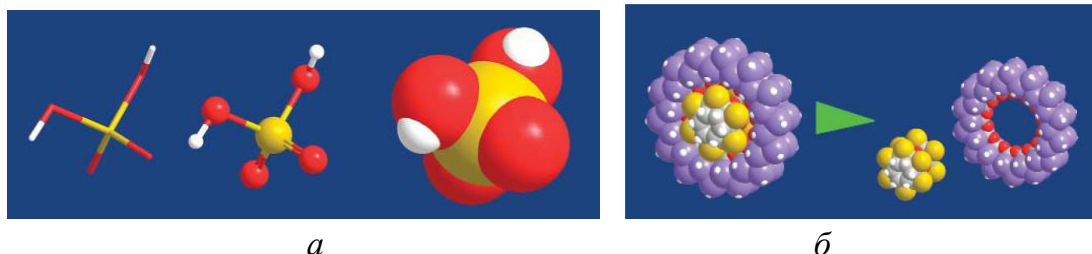
**Вычислительное моделирование.** Для построения моделей наноструктур используют математическое моделирование и различные статистические подходы.

С их помощью можно увидеть не только трехмерную модель объекта, но и его поведение при воздействии температуры, давления, электромагнитных полей и т.д.

Одна из популярных, достаточно простых программ – *Chem3D*.

С помощью графического интерфейса можно, например, набрав любую химическую формулу на клавиатуре, получить на экране автоматически

графическое изображение молекулы; можно «вручную» собрать наноструктуру и оптимизировать ее, представляя реальное расположение атомов; можно с помощью молекулярной механики «нагреть» структуру, повлиять на нее электромагнитными полями и посмотреть динамику этих взаимодействий; можно рассмотреть наноструктуру в «реалистичном» виде, т.е. так, как бы она выглядела в сканирующем зондовом микроскопе и т.д., рис.1.13.



*a* *б*  
Рисунок 1.13 – Различные модели молекулы (*a*);  
сборка и разборка наноструктур (*б*)

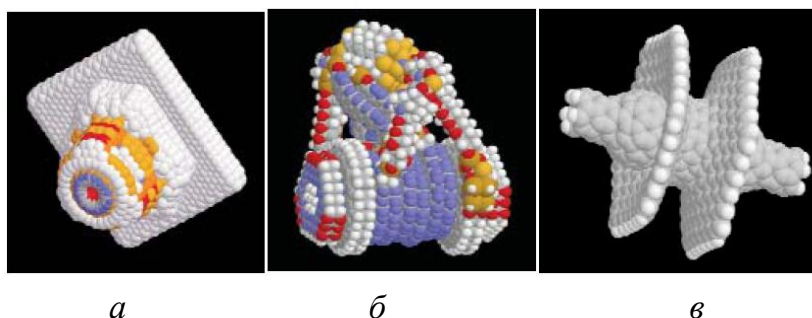
*Инженерное моделирование.* Существуют также различные программы, помогающие создавать наносистемы, которые затем можно испытать, подвергая различным тестам, близким к условиям эксплуатации.

Например, программа *NanoXplorer* позволяет создавать модели наноустройств по примеру программы *AutoCAD*.

Установив программу на своем компьютере, пользователь получает доступ к всемирной базе данных наноструктур.

С ее помощью можно использовать в своей разработке уже созданные модели наноподшипников, валов, компьютеров, двигателей, манипуляторов.

С другой стороны, создав свою собственную структуру, можно через *Internet* загрузить ее в базу данных для использования такими же изобретателями, рис.1.14.



*a* *б* *в*  
Рисунок 1.14 – Модели наносистем:  
*a* – нанонасос; *б* – наноманипулятор; *в* – наноподшипник из углерода

## МОДУЛЬ 2. НАНОМАТЕРИАЛЫ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

### Лекция 9,10. Структура и свойства наноструктурных материалов

1. Структурные особенности наноматериалов
2. Физические, химические и механические свойства наноматериалов
3. Принципы классификации наноматериалов

1. Существенные изменения свойств наноматериалов по сравнению с традиционными аналогами связаны, в первую очередь, с особенностями их структурного состояния.

♦ При переходе от макрообъемов к нанообъектам происходит *изменение соотношения поверхностных и объемных атомов материала*, рис.1.15.

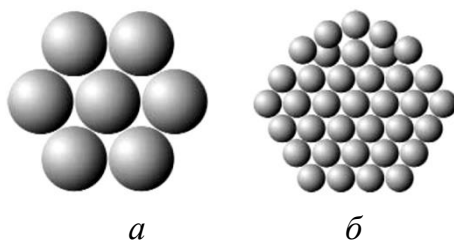


Рисунок 1.15 – Схема расположения атомов в наночастице (а)  
и в объемном материале (б)

Существуют следующие соотношения между диаметром зерна (частицы) и объемной долей поверхностного слоя:

диаметр зерна (частицы), нм.....	100	50	25	20	10	6	4
объемная доля поверхностного слоя, %.....	6	12	24	30	60	100	150.

Данная структурная особенность, весьма актуальная для дисперсных и кластерных структур, вызывает искажения кристаллической решетки, приводит к эффективному стоку дефектов кристаллической решетки, позволяет рассматривать приповерхностный слой как некое новое состояние вещества и, в итоге, предопределяет особые «поверхностные» эффекты механических, электрических, оптических и других свойств.

*Для наноматериалов по сути весь материал «работает» как приповерхностный слой.*

♦ В массивных нанообъектах, состоящих из конгломерата наночастиц, *существенно увеличивается протяженность поверхностей раздела*, рис.1.16, *и их вклад в механизмы прочности и пластичности материала.*

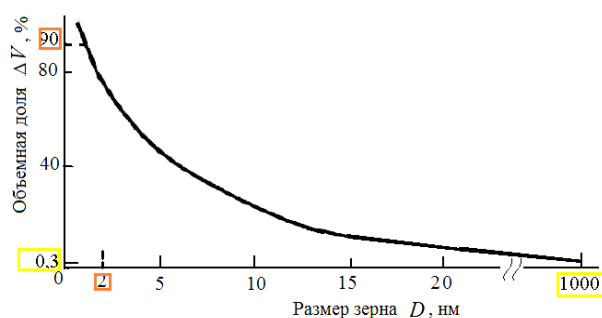


Рисунок 1.16 – Зависимость объемной доли границ раздела от размера зерна

Данная особенность структуры приводит к эффектам скопления дислокаций вблизи препятствий, которыми при уменьшении размеров зерен являются их границы, изменению механизмов прочности и пластичности в наноматериалах, обуславливает повышение микротвердости.

♦ Одна из причин специфики свойств наноматериалов – **совпадение размеров кристаллитов с «характерными» размерами для различных физических явлений и свойств** (протекания электрического тока, теплопроводности, пластической деформации и т.д.).

«Характерные» размеры лежат в диапазоне  $10^{-9} \dots 10^{-7}$  м, соответствующем средним размерам атомов и молекул в обычных материалах.

♦ Многие физические явления в наномасштабе обусловлены волновой природой частиц (например, электронов), **поведение которых подчиняется законам квантовой механики.**

2. По сравнению с обычными материалами в наноматериалах изменяются многие фундаментальные характеристики, проявляется «аномалия» различных свойств – физических, химических, механических и т.д.

Изменение некоторых **физических** размернозависимых свойств наноматериалов как отклик на уменьшение размера зерна до нанодиапазона приведено в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Размерная зависимость некоторых характеристик физических свойств наноматериалов

Свойства	Отклик материала на уменьшение размера
Термические	Понижение температуры фазовых переходов, в т.ч. температуры плавления (на сотни градусов по шкале Кельвина)
Кинетические	Аномально высокие значения коэффициентов диффузии
Тепловые	Повышение теплоемкости, понижение теплопроводности
Электрические	Более высокое удельное электросопротивление металлов, более высокая электропроводность керамики, возможность сверхпроводимости наноматериалов
Магнитные	Возрастание магнитной проницаемости, супермагнетизм



Существуют многочисленные экспериментальные свидетельства наличия у веществ в наноразмерном состоянии отличных от макро- и микроструктурных аналогов *химических свойств*.

Некоторые примеры: возможность реализации необычных и невозможных в макросостоянии химических превращений; аномально высокая реакционная способность; способность к адсорбции и проявление капиллярных свойств; повышенная стойкость к окислению и высокая коррозионная стойкость и т.д.

Наноструктурные материалы имеют более высокие по сравнению с традиционными аналогами значения многих характеристик *механических свойств* – предела текучести, временного сопротивления, твердости, ударной вязкости, усталостной прочности и т.д.

Важнейшими направлениями повышения прочностных свойств материалов, как известно, являются снижение концентрации дефектов структуры или, наоборот, ее увеличение, рис.1.17. В обоих направлениях существовавшие до недавних пор пределы преодолены на основе использования наноматериалов, см. рис. 1.17.



Рисунок 1.17 – Схематическая зависимость прочности от плотности атомарных дефектов в материале

Уникальной особенностью наноматериалов является оптимальное сочетание прочности и пластичности, рис.1.18, за счет реализации особых недислокационных механизмов пластичности.

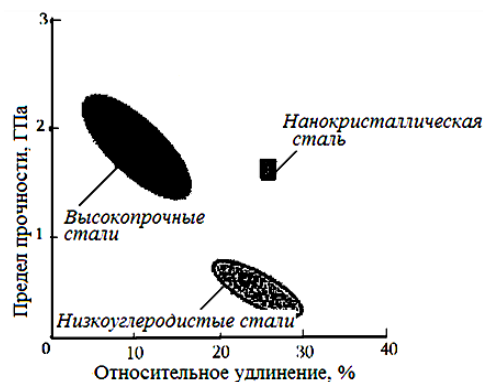


Рисунок 1.18 – Соотношение между прочностью и пластичностью для сталей

Наряду с увеличением механических характеристик наблюдается также рост многих показателей эксплуатационных свойств наноматериалов, в том числе износостойкости, демфирующих свойств и т.д.

3. В настоящее время существует **несколько подходов к классификации наноматериалов**: по геометрическим параметрам их структуры; по составу, распределению и форме структурных составляющих; по физическому принципу; по происхождению и топологии и т.д. При этом следует учитывать, что классификационные признаки и границы между отдельными группами наноматериалов весьма условны.

*Решающую роль в отнесении конкретного объекта к тому или иному классу играют междисциплинарные границы, исторически сложившиеся условности, традиции, терминологические предпочтения.*

Одним из наиболее распространенных принципов классификации наноматериалов является **геометрический принцип (мерность)**. Данный подход важен не только с формальной стороны, но также связан с тем, что геометрические параметры наноматериалов существенно влияют на их свойства.

По геометрическим размерам наноматериалы можно условно разделить следующим образом, рис.1.19: нульмерные – все три размера менее 100 нм (индивидуальные частицы, нанокластеры, в т.ч. фуллерены, порошки нанометровых размеров); одномерные – два размера менее 100 нм (нанотрубки, нановолокна); двумерные – один размер менее 100 нм (нанослойные покрытия); трехмерные – все три размера более 100 нм (объемные наноматериалы с размером зерна нанометрового диапазона, нанопокртыя).

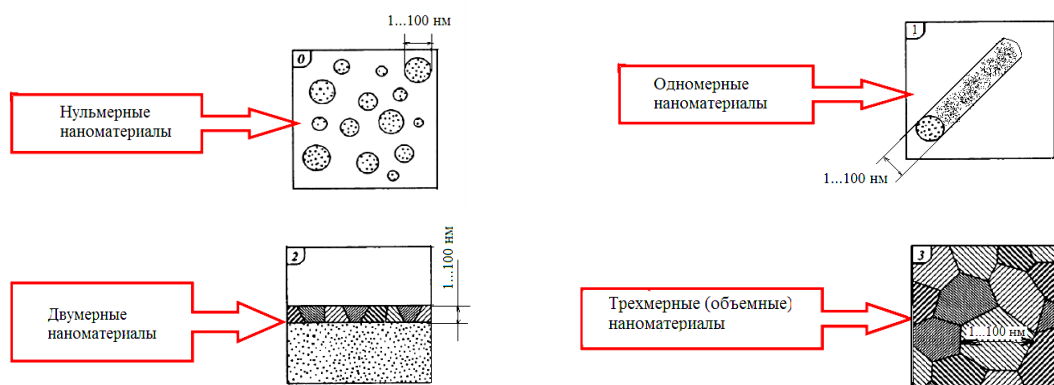


Рисунок 1.19 – Классификация наноматериалов по геометрическому принципу

## Лекция 11. Углеродные наноматериалы как пример материалов с истинно наноразмерными эффектами и свойствами

1. Аллотропные формы углерода
2. Фуллерен: структура, получение, свойства, потенциальные области применения
3. Углеродные нанотрубки

**1. Наноматериалы являются основным сектором рынка продукции нанотехнологий, рис.1.20.**

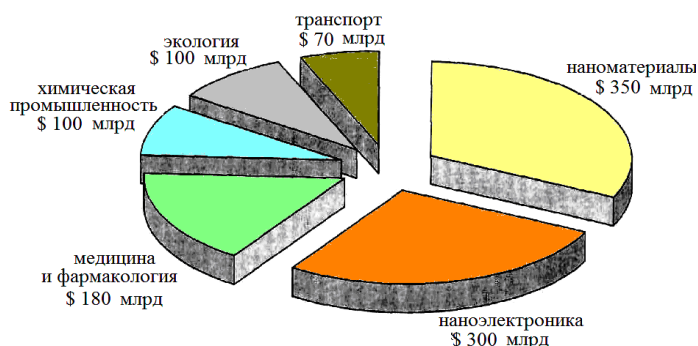


Рисунок 1.20 – Основные секторы рынка продукции нанотехнологий в ближайшие 10 лет

*Особая роль среди различных групп наноматериалов принадлежит углеродным многоатомным кластерным образованиям – фуллеренам, нанотрубкам, рис.1.21.*

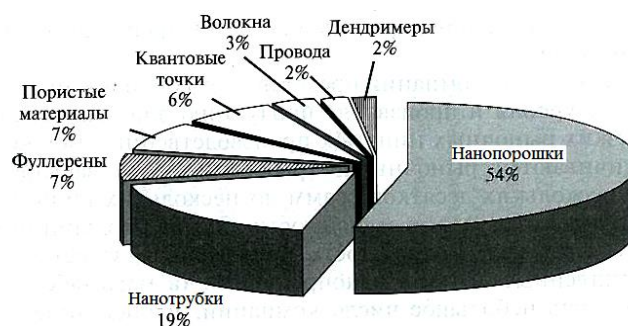


Рисунок 1.21 – Различные виды наноматериалов, представленные на мировом рынке

Интерес к данным структурам обусловлен рядом причин, важнейшими из которых являются следующие: уникальность углерода как химического элемента, составляющего основу живой природы, способного соединяться с большинством элементов и образовывать молекулы и вещества различного состава и свойств; особенно яркое проявление наноэффектов и необычных свойств; широкий потенциал практического использования данных материалов, превосходящий потенциал других наноструктур.

Общеизвестными модификациями углерода (аллотропными формами) являются графит, алмаз и сажа (аморфный углерод), а также карбин и гексагональная разновидность алмаза лондейлит, рис.1.22.

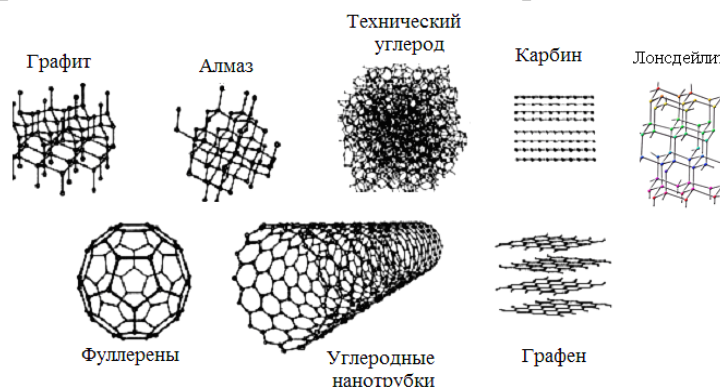


Рисунок 1.22 – Аллотропные модификации углерода

В связи с развитием нанотехнологий семейство аллотропных модификаций углерода дополнилось фуллереном, углеродными нанотрубками и далее – графеном, см.рис.1.22.

*Кристаллическое строение основных аллотропных форм углерода определяет их свойства.*

2. Достаточно важную роль в развитии нанотехнологий сыграла аллотропная форма углерода под названием «фуллерен».

**Фуллерены** представляют собой сферические и сфероидальные полые внутри кластеры – многоатомные молекулы углерода  $C_n$ , замкнутая поверх-

ность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода, рис.1.23.

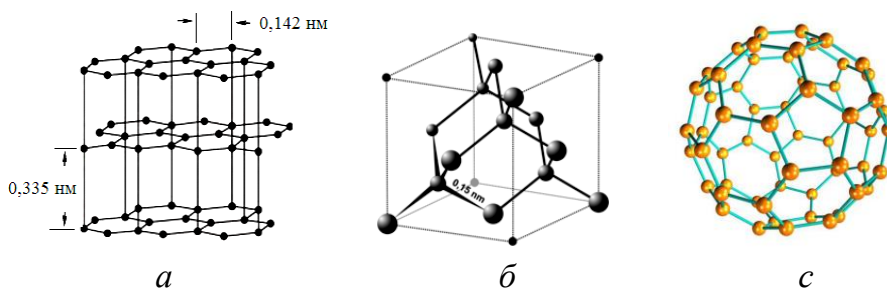


Рисунок 1.23 – Кристаллическая решетка графита (а); алмаза (б); молекула фуллерена (в)

*Данная аллотропная модификация – пример высокоорганизованной структуры; молекула фуллерена наиболее симметрична из известных к настоящему времени в трехмерном мире.*

Молекулы фуллерена могут иметь не только сферическую форму, но и форму эллипсов, в том числе многослойных («луковичные» структуры), рис.1.24. Однако во всех случаях размер молекул фуллерена составляет ~ 1 нм, и в растворе они обладают свойствами броуновской частицы.

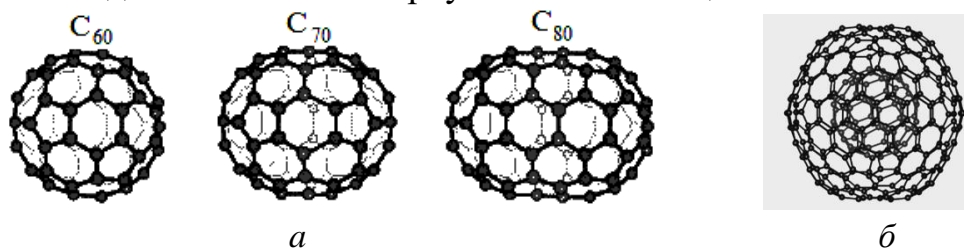


Рисунок 1.24 –Примеры структур на основе углеродных кластеров: а – фуллерены  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{80}$ ; б – многослойный фуллерен  $C_{60}/C_{240}$

В настоящее время понятие «фуллерен» применяется к широкому классу многоатомных молекул углерода с общей формулой  $C_n$  ( $n$  – четное число от 20 до 1840, подчиняющееся определенной закономерности, например,  $n = 20, 28, 42, 52, 58, 60, 70, 72, 78, 80$  и т.д.). Наиболее устойчивыми являются молекулы, состоящие из 60-ти атомов углерода, –  $C_{60}$ .

**Основными методами получения фуллеренов** являются возгонка (термическое испарение) графита с последующей десублимацией (переходом из газовой фазы в твердое состояние) и пиролиз (разложение при высоких температурах) углеводородов.

*Особенности строения определяют «аномальные» физико-химические свойства фуллеренов, табл.1.3: низкую плотность, низкую теплопроводность, высокое удельное электрическое сопротивление (является диэлектриком); высокую устойчивость в инертной среде; проявление окислительной способности т.д.*

Таблица 1.3 – Свойства аллотропных форм углерода

Форма углерода	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, кВт/(м·К)	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Графит	2,3	0,72	0,1	(3...5)·10 <sup>-7</sup> (вдоль слоя) (1...5)·10 <sup>-2</sup> (в направлении, перпендикулярном слоям)
Алмаз	3,5	0,50	1,4	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>6</sup>
Фуллерен	1,7	0,68	0,4	10 <sup>14</sup>

Фуллерены являются «сырьевым» материалом для создания наноструктур («фуллереновых веществ») с разнообразными свойствами – кристаллов, композиционных материалов, покрытий, полимеров, имеющих большие перспективы для применения в микроэлектронике, оптоэлектронике, энергетике, материаловедении, машиностроении, биотехнологии, медицине и других областях. Число вариантов фуллереновых материалов уже сегодня насчитывает более 10000.

3. Другой новой аллотропной модификацией углерода являются **углеродные нанотрубки** (УНТ), представляющие собой протяженные структуры в виде полого цилиндра, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов, рис.1.25.

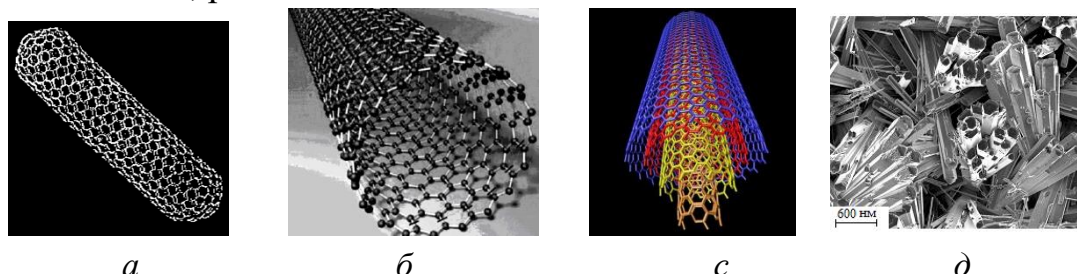


Рисунок 1.25 – Схематическое изображение углеродной нанотрубки (а) и расположение атомов на ее поверхности (б); многослойная нанотрубка (с); «колонии» углеродных нанотрубок (д)

Благодаря особенностям своего строения (высокой прочности связи, рекордно высокой плотности упаковки атомов, отсутствию или малой плотности дефектов структуры) нанотрубки имеют уникальные физико-химические, механические свойства.

Среди многих необычных свойств углеродных нанотрубок и их модификаций важнейшими являются следующие: высокие прочность и удельная прочность (удельная прочность более чем в сто раз превышает аналогичный параметр для стали); зависимость электропроводности от диаметра и хиральности (направления сворачивания трубки относительно

графитового листа); электромеханический эффект; проявление квантовых свойств; изменение свойств при адсорбции чужеродного атома или молекулы; капиллярные свойства; проявление «интеллектуальных» свойств и т.д.

*Гораздо больший интерес исследователей к нанотрубкам, нежели к фуллеренам, объясняется их большей технологичностью и возможность интеграции в макроструктуры.*

Удивительные свойства определяют широкое практическое применение нанотрубок – и как самостоятельного материала (микроэлектроника, электротехническая, химическая промышленность, биологические и медицинские применения), и как элементарного объекта нанотехнологий при создании покрытий, композиционных материалов предельной прочности (машиностроение, строительство, медицина и т.д.).

По объемам производства углеродные нанотрубки занимают второе место среди различных групп наноматериалов, см. рис.1.21.

## Лекция 12. Объемные наноматериалы

1. Общая характеристика
2. Объемные материалы, полученные методом порошковой металлургии
3. Объемные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией

*1. Среди различных групп наноматериалов особый научный и практический интерес вызывают объемные наноматериалы. Это связано, с одной стороны, с проявлением ряда необычных, по сравнению с традиционными крупнокристаллическими аналогами, свойств, реализацией особых механизмов деформации, а, с другой, возможностью создания на основе данных материалов реальных макроскопических конструкций и устройств, пригодных для промышленного применения.*

*К объемным (массивным, компактным, нанокристаллическим) наноматериалам относят материалы с размерами изделий из них в макродиапазоне, состоящие из большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов), т.е. поликристаллические материалы, зерна которых имеют нанометровые размеры (1...100 нм) во всех трех направлениях.*

*Основные методы получения объемных наноматериалов: порошковая металлургия; кристаллизация аморфных сплавов; методы, основанные на использовании интенсивной пластической деформации; «поверхностные» технологии (создание покрытий и модифицированных слоев с наноструктурой); комплексные методы, использующие последовательно или параллельно несколько разных технологий, рис.1.26.*

Многие из указанных методов отработаны и могут быть использованы для промышленного применения.

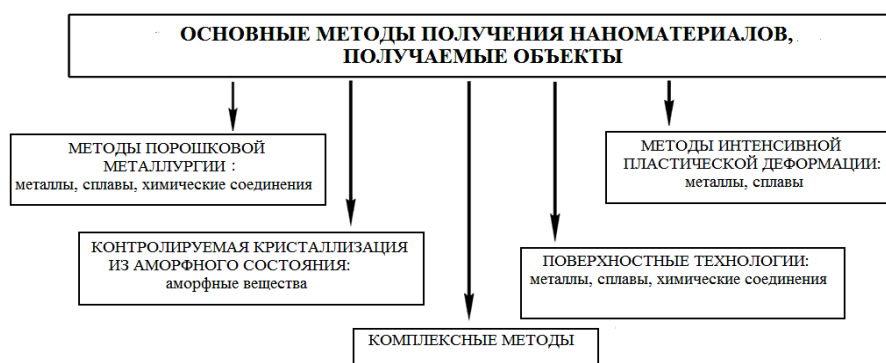


Рисунок 1.26 – Основные методы получения объемных нанокристаллических материалов

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, ни один из них не является универсальным, поскольку применим для вполне определенного круга объектов.

**2. Порошковая металлургия** представляет собой наиболее универсальный метод создания нанокристаллической структуры в разнообразных объемных (компактных) материалах – металлических, керамических, композиционных.

Как известно, основными стадиями традиционной технологии порошковой металлургии являются процессы формирования исходной шихты, формования изделий, например, прессованием, последующее спекание.

Процессы и стадии данной технологии при получении объемных наноматериалов во многом аналогичны традиционной методике, но имеют ряд специфических особенностей, связанных со свойствами и структурным состоянием исходных нанопорошков – высокой удельной поверхностью и повышенной химической активностью, увеличенным взаимодействием и склонностью к агломерации.

Особую роль играет проблема сохранения наноструктурного состояния при компактировании, которая решается путем корректировки режимов, применения методов динамического прессования, введения специальных добавок, тормозящих рост зерна и т.д.

Наиболее перспективны среди методов порошковой металлургии импульсные высокоэнергетические (динамические) методы прессования без спекания, поскольку обеспечивают плотность получаемого компакта, близкую к плотности монолитного материала и, что весьма важно, позволяют сохранить наноразмерную структуру.



К данным методам относятся следующие: ультразвуковое прессование, агломерация пульсирующим электрическим током, взрывное компактирование, рис.1.27.

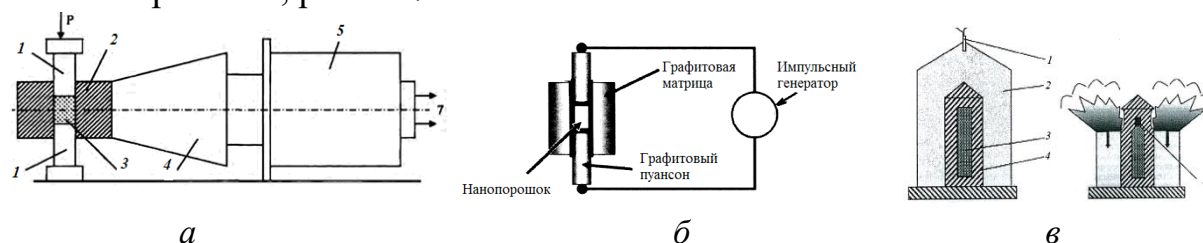


Рисунок 1.27 – Схемы методов динамического прессования:  
 а – установка для ультразвукового прессования: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – УЗ-концентратор; 5 – магнестрикционный преобразователь, соединенный с УЗ-генератором;  
 б – агломерация пульсирующим электрическим током; 6 – графитовая матрица; 7 – импульсный генератор; 8 – графитовый пуансон; 9 – нанопорошок;  
 в – схема взрывного компактирования: 1 – электродетонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – прессуемый порошок; 4 – ампула; 5 – спрессованный порошок (компакт)

Технология взрывного прессования является одной из перспективных и позволяет получать высокоплотные материалы (с плотностью до 99 %) различных групп, в том числе композиционные.

**Основные области применения объемных наноматериалов, полученных методом порошковой металлургии:** детали машиностроения (подшипники, детали двигателей); строительные материалы (лакокрасочные и термозвукоизоляционные материалы, стекла, порошковые композиты, армированные наночастицами); материалы для химической промышленности (катализаторы, адсорбенты); электроконтактные материалы.

3. Несмотря на успешное применение и «отработанность» порошковой металлургии для получения компактных (объемных) наноматериалов, ее существенными недостатками являются проблематичность получения беспористых материалов, а также загрязнение примесями при подготовке порошков, ограничения геометрических размеров получаемых изделий, низкая пластичность.

В этой связи большой интерес вызывает получение наноструктурных материалов методами **интенсивной пластической деформации (ИПД)**, обеспечивающих измельчение микроструктуры в металлах и сплавах до наноразмеров за счет больших деформаций сдвига.

Аномальные механические свойства полученных ИПД объемных наноматериалов по сравнению с материалами с традиционной структурой (высокая прочность, сочетание высокой прочности и пластичности, сверхпластичность и т.д.) обусловлены проявлением *особых механизмов пластической деформации*.

**Основными методами ИПД являются:** кручение под давлением, равноканальное угловое прессование (РКУ), всесторонняя ковка и т.д., рис.1.28.

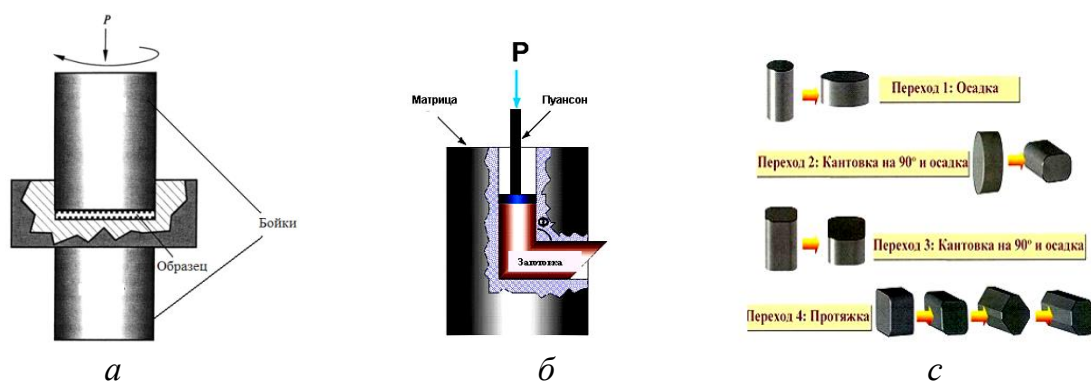


Рисунок 1.28 – Основные методы ИПД:  
*a* – кручение под давлением; *б* – равноканальное угловое прессование;  
*в* - всесторонняя ковка

Основным недостатком метода кручения под давлением, см. рис.1.28,*a*, является ограничение размеров и формы получаемых заготовок (получают образцы в виде дисков диаметром 10...30 мм и толщиной 0,2...1,0 мм), что затрудняет их исследование и ограничивает практическое применение.

Наиболее распространен метод РКУ, см. рис.1.28,*б*, который может быть применен для получения реальных изделий из как чистых металлов, в том числе труднодеформируемых – W, Ti, так и сплавов на их основе.

Достоинством метода всесторонней ковки, см. рис.1.28,*в*, является то, что он не требует дорогостоящего инструмента и позволяет использовать существующее технологическое прессовое оборудование.

Объемные наноструктурные металлы и сплавы, полученные методами ИПД, могут рассматриваться как перспективные конструкционные и функциональные материалы нового поколения. Кроме того, методы ИПД, являясь, по сути, новыми применениями методов обработки металлов давлением (ОМД), имеют возможность встраиваться в существующие технологические цепочки на стадиях металлургического передела слитков – полуфабрикат или полуфабрикат – изделие.

*Наноструктурные материалы, полученные ИПД, могут быть применены в различных областях, например, в авиационно-космической отрасли, оборонной промышленности, в автомобилестроении, в медицине, в электронике, в производстве спортивных товаров, в химической отрасли.*

### Лекция 13. Технологии получения нанокристаллических покрытий на рабочих поверхностях

1. Общая характеристика технологии получения и области применения функциональных нанокристаллических покрытий
2. Особенности методов формирования нанокристаллической структуры покрытия
3. Многослойные покрытия

1. Одной из важнейших групп объемных наноматериалов, имеющих уже сегодня вполне реальное практическое применение, являются **нанокристаллические покрытия**, т.е. покрытия с нанометровым размером кристаллитов, см. Л. №5, рис. 1.29.

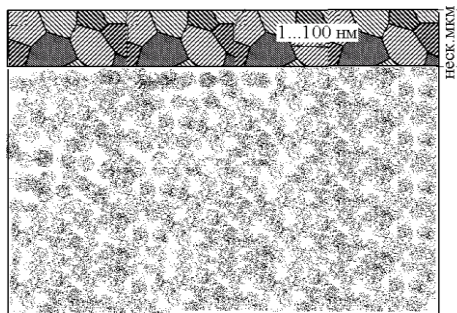


Рисунок 1.29 – Нанокристаллическое покрытие

*Разработка технологий конструирования (инженерии) поверхности применительно к созданию функциональных покрытий в настоящее время является одной из наиболее важных задач науки о материалах, большие перспективы в этом направлении связаны именно с **нанокристаллическими покрытиями**.*

Нанокристаллические покрытия представляют интерес с точки зрения придания материалам (конструкционным, инструментальным) определенных функциональных свойств – высокой твердости, прочности, износостойкости, коррозионной стойкости, трибологических, оптических, декоративных, биологических характеристик.

Покрытия позволяют экономить дорогостоящие металлы, конструировать композиционные материалы.

Это обеспечивает широкие возможности их применения в инструментальной промышленности, в микроэлектронике, в медицине.

Методы, связанные с созданием путем наращивания на поверхности объектов покрытий или модифицирования поверхностных слоев, достаточно изучены и широко применяются на практике. *Усовершенствованные варианты данных технологий могут рассматриваться как методы нанотехнологии.*

**Методы физического осаждения из паровой фазы (PVD - Physical Vapour Deposition)** наиболее распространены благодаря целому ряду преимуществ, важнейшими из которых являются следующие: возможность

получения равномерных слоев широкого диапазона толщин (от 1 нм до 200 мкм); достаточно большой диапазон площадей подложки, на которую наносится покрытие; широкое сочетание вариантов материалов подложка-покрытие; гибкость к требованиям по температуре подложки; экологическая чистота и т.д.

В методах *PVD* происходит перевод материала из конденсированного состояния в состояние пара (испарением или распылением), его транспортировка к подложке (материалу, на который наносится покрытие), где и происходит осаждение материала покрытия из паровой фазы и формирование собственно покрытия, рис.1.30.

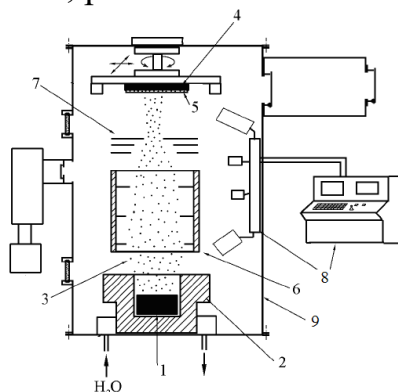


Рисунок 1.30 – Типичная схема установки для нанесения покрытия *PVD*-методом:

- 1 – материал покрытия; 2 – система перевода материала в паровую фазу;
- 3 – поток испарившегося вещества; 4 – подложка; 5 – формирующееся покрытие;
- 6 – система транспортировки материала покрытия в паровой фазе к подложке;
- 7 – система фокусировки (и/или сканирования) потока вещества, осаждающегося на подложку; 8 – система управления и контроля технологическими параметрами;
- 9 – вакуумная камера

**2.** Основными технологиями, позволяющими управлять размерами зерен покрытий, осаждаемых *PVD*-методами, и создавать нанокристаллическую структуру, являются низкоэнергетическая ионная бомбардировка и процесс смешивания (модифицирования).

**Ионная бомбардировка** заключается в управлении механизмом роста формирующихся покрытий при помощи воздействия на поверхность энергии ионов, что приводит к локальному нагреву, экстремально быстрому охлаждению и способствует увеличению центров зародышеобразования и подвижности атомов, уменьшению количества поверхностных дефектов (вакансий, пор).

**Процесс смешивания** заключается в добавлении одного или нескольких элементов в основной материал покрытия, которые не растворяются в базовом веществе и скапливаются на границах зерен основного компонента в виде мелкозернистого или аморфного слоя, препятствуя росту основной фазы.

Примеры составов подобных композиций – TiN/TiB<sub>2</sub>, TiN/ZrN, TiN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, ZrN/BN и т.д. (вторая фаза – твердая); TiN/Cu, ZrN/Cu, AlN/Cu, ZrN/Ni и т.д. (вторая фаза – мягкая).

Высокая объемная доля границ раздела, практическая бездефектность нанокристаллитов в покрытии, контролируемое соотношение объемных долей различных фаз – все эти факторы приводят к уникальным свойствам нанокomпозитных покрытий, их **многофункциональности**, что проявляется в высоких значениях твердости, величины упругого восстановления, прочности, устойчивости к ударным воздействиям, термической стабильности, жаростойкости и коррозионной стойкости.

**3.** Еще один аспект модификации поверхностных слоев с помощью нанотехнологий связан с формированием **многослойной наноразмерной структуры** в покрытии, см. Л. №5, рис.1.10, в. Это приводит к возникновению качественно новых свойств по сравнению с однослойными покрытиями.

К числу таких свойств, прежде всего, нужно отнести более интенсивное возрастание прочности, твердости по сравнению с аддитивной (суммарной) прочностью и твердостью отдельных компонентов.

Кроме возрастания механических свойств, что весьма важно для применения в машиностроении в качестве инструментальных материалов при механической обработке заготовок деталей машин, многослойные структуры

из пленок нанометровой толщины проявляют комплекс необычных свойств (химических, физических) и, в зависимости от сочетания материалов слоев, могут быть интересны для других сфер применения (микроэлектроника, медицина и т.д.), в том числе в качестве самостоятельных изделий.

Получение многослойных наноструктурных сверхтвердых покрытий на основе чередующихся нанослоев тугоплавких соединений (TiN/NbN, TiN/ZrN, (TiAl)N/CrN и т.д.), наиболее перспективных для повышения стойкости режущих инструментов, износостойкости различных изделий машиностроения, основано на применении методов физического осаждения вещества в вакууме.

Число слоев в подобных МНП может варьироваться в больших пределах (от 10 до 200), выбирается в зависимости от решаемых технологических задач. При этом от их количества (т.е. от толщины каждого слоя) существенно зависят механические свойства, в частности, микротвердость, рис. 1.31.

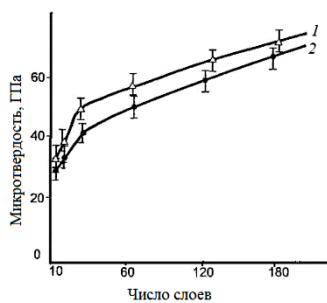


Рисунок 1.31 – Зависимость микротвердости многослойных покрытий толщиной  $2 \pm 0,3$  мкм TiN/NbN (1), TiN/ZrN (2) от количества слоев в покрытии (толщины слоя)

### Лекция 14,15. Области применения наноматериалов и нанотехнологий

1. Конструкционные, инструментальные, композиционные и функциональные наноматериалы
2. Применение нанотехнологий и наноматериалов в микроэлектронике
3. МЭМС и НЭМС
4. Применение нанотехнологий в машиностроении
5. Применение нанотехнологий в энергетике
6. Применение нанотехнологий в строительстве

1. Основными секторами рынка продукции нанотехнологий в ближайшее время станут следующие: наноматериалы, наноэлектроника, фармацевтика и медицина, химическая промышленность, экология, транспорт.

Некоторые примеры принципиально новых подходов, связанных с применением нанотехнологий в различных сферах деятельности, рассматриваются в данной лекции.

***Создание материалов с принципиально новым уровнем функциональных свойств как результата наноразмерности является приоритетным направлением развития нанотехнологий.***

Одной из наиболее важных областей данной сферы является создание принципиально нового класса **конструкционных материалов** – с предельно высокой прочностью, сочетающих высокую прочность и пластичность, обладающих высокой удельной прочностью.

Перспективным направлением в области конструкционного материаловедения является также создание **композиционных материалов (нанокompозитов)** с различного рода упрочнителем в виде наночастиц (дисперсно-упрочненных композитов), нановолокон, нанотрубок (волоконистых композитов), нанослоев (слоистых композитов), распределенных в матрице из полимеров, керамики, металлов и сплавов. При

этом достигаются свойства, которые не могут быть получены с другими наполнителями.

Наноматериалы представляют интерес с точки зрения использования их в качестве **инструментальных**. Предпосылками для этого являются их высокие механические свойства (в частности, твердость), более высокие по сравнению с традиционными материалами износостойкость, термостойкость.

*Примеры применения:* нанопорошки в качестве абразива для сверхтонкой механической обработки поверхностей деталей; металлообрабатывающий инструмент (сверла, фрезы) из наноструктурных керамических материалов, карбидов тугоплавких металлов; алмазно-абразивный инструмент на металлических связках с упрочняющими нанодобавками в виде углеродных нанотрубок; прецизионные инструменты на основе углеродных кластеров – фуллеренов, нанотрубок для испытания материалов и т.д.

Благодаря применению высокотвердых **нанокристаллических износостойких покрытий** на основе нитридов, карбидов, боридов тугоплавких металлов, **многослойных наноструктурных покрытий сложного состава** может быть существенно увеличена стойкость различных видов режущих инструментов и обеспечен значительный прогресс в направлении создания высокоэффективных инструментальных материалов, повышена стойкость деталей, работающих на трение и износ.

С созданием **нанокерамики** связывают многие перспективные направления: производство легких, прочных, термостойких материалов для различных изделий – корпусных деталей автомобилестроения, строительства (трубы, детали облицовки строений), бытовой промышленности (облицовка холодильников, мебель, электроприборы), прецизионных инструментов типа микротонных пластин и хирургических скальпелей, лопаток турбин, ракетных обтекателей, защитных покрытий космических кораблей; конструирование топливных элементов, сенсоров, солнечных батарей; элементов микроэлектроники и микромеханических систем; материалов для носителей информации.

**Нанопористые материалы** составляют отдельный, весьма важный класс наноструктурированных материалов и могут иметь широкое применение в качестве фильтров, например, для очистки газов и жидкостей; сорбентов; сепараторов и контейнеров для хранения газообразных продуктов, топлива, лекарственных препаратов; медицинских имплантатов; молекулярных сит для изотопного разделения элементов и т.д.

*Применение магнитных наноматериалов* в электротехнике и электронике как трансформаторных сердечников, магнитных усилителей и импульсных источников питания, а также в технике магнитной записи и

отображения информации позволяет обеспечить значительную миниатюризацию этих устройств, стабильную работу в широком диапазоне температур и частот.

Примерами проявления «интеллектуальности» материалов, формируемой с помощью нанотехнологий, могут быть следующие свойства: самодиагностика и самовосстановление поврежденных структур в наномасштабе; перестройка наноструктур при внешнем воздействии; молекулярное распознавание; избирательная реакция на различные внешние воздействия на молекулярном уровне и т.д.

Многие из указанных проявлений «интеллектуальности» наноматериалов могут быть реализованы для применения в машиностроении и в других отраслях промышленности.

**2. Микроэлектроника** – яркий пример области, где уменьшение размеров элементов выступает основным средством прогресса технологии, устройства которой необходимы для всех сфер деятельности.

Именно в области электроники сделаны наиболее заметные практические шаги нанотехнологии.

Характерной особенностью развития микроэлектроники является закон Мура, рис. 1.32, согласно которому плотность монтажа элементов электронных устройств, определяющая быстродействие и мощность вычислительных систем, должна удваиваться каждые два года (соответственно размер элементов уменьшается вдвое).

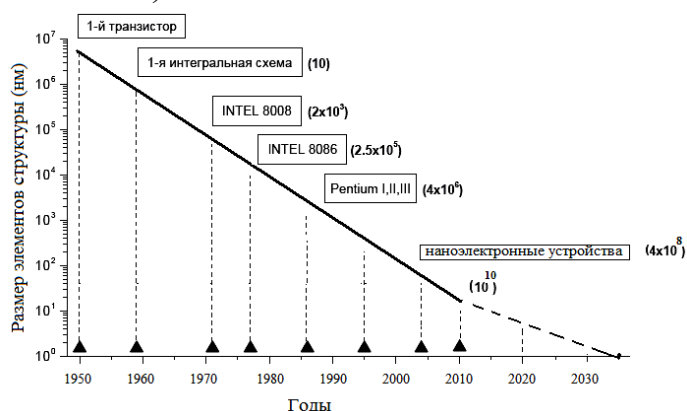


Рисунок 1.32 – Динамика уменьшения размеров элементов интегральных схем (в скобках указано число транзисторов)

В данный момент уже освоена технология ~ 10 нм; далее предполагается уменьшение элементов микросхемы до нескольких атомов, т.е. до 1 нм.

При этом классические методы производства подошли к своему естественному экономическому и технологическому барьеру. Следующим логическим шагом развития электроники стала нанотехнология.



Сегодня уже с полным правом можно говорить о *молекулярной электронике и наноэлектронике* как о принципиально новом этапе развития. Определяющее влияние на функционирование устройств электроники оказывают квантовомеханические эффекты.

Значительные перспективы развития наноэлектроники связывают со сверхтонкими слоями кристаллических веществ и многослойными полупроводниковыми гетероструктурами, полученными, например, методом молекулярно-лучевой эпитаксии, см. Л. № 5.

Уменьшение до предельных значений элементов электроники способствует и миниатюризации электронных устройств на их основе, в том числе созданию сверхминиатюрных компьютеров.

**3.** *Вслед за электронными компонентами миниатюризация затронула и электромеханические устройства, т.е. устройства, преобразующие электрические величины – силу тока, напряжение в соответствующее линейное или угловое перемещение.*

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой трехмерные микрообъекты и микромашины: моторы, насосы, турбины, микророботы, микродатчики. Эти системы уже достаточно широко используются в различных сферах деятельности – телекоммуникации, транспорте, автомобилестроении, медицине и т.д.

Одной из основных тенденций развития МЭМС является дальнейшая миниатюризация, уменьшение энергопотребления и увеличение числа функций системы, что во многом связано с возможностью использования в составе систем элементов, созданных на основе нанотехнологии.

*Наноэлектромеханические системы* представляют собой совокупность электронных и механических элементов, выполненных в наноразмерном исполнении на основе интегрированных технологий.

Создание НЭМС является новым этапом в создании устройств, интегрирующих сенсорную, логически-аналитическую, двигательную и исполнительную функции.

Именно на базе МЭМС и НЭМС планируется создание наноманипуляторов и нанороботов, нанокomпьютеров, целых нанолабораторий на кремниевой подложке для применения в вычислительной, телекоммуникационной, аэрокосмической технике и автомобилестроении, для создания средств обеспечения безопасности, в медицине, в бытовой технике, рис. 1.33.

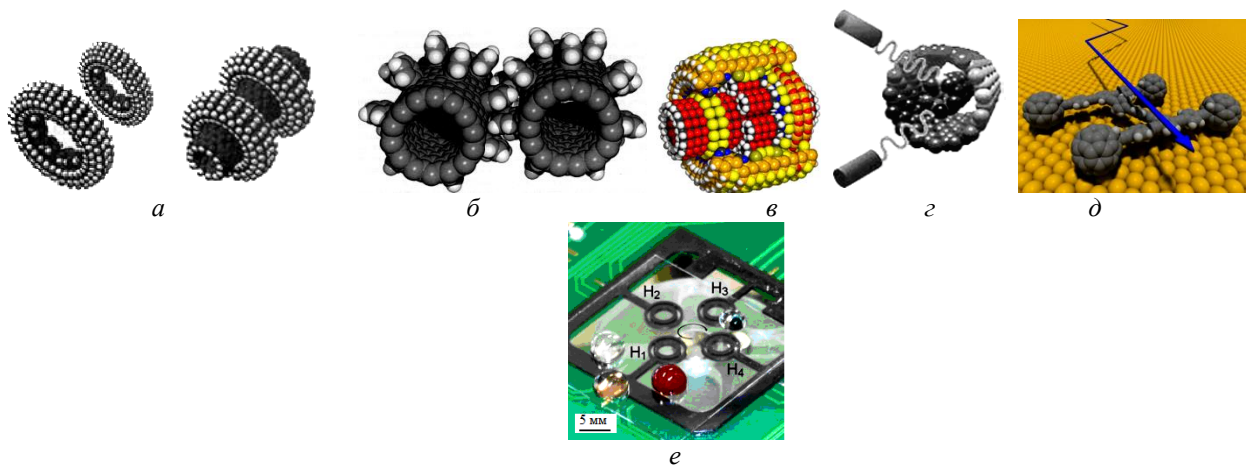


Рисунок 1.33 – Некоторые примеры НЭМС:

*a* – наноподшипники; *б* – наношестеренки на основе углеродных нанотрубок; *в* – молекулярный редуктор; *г* – наномотор, приводимый в движение светом; *д* – «наноавтомобиль» из 300 атомов с колесами из молекул фуллерена, с вязанных химическими связями с «каркасом», ширина автомобиля ~ 4 нм; *е* – интегрированный прибор «*lab-on-chip*» медицинского назначения, позволяющий провести скоростной генетический анализ биологических материалов

4. Основными направлениями, в которых может быть достигнут значительный эффект в **машиностроении** благодаря применению нанотехнологий, являются:

▲ создание новых типов конструкционных материалов (обладающих высокой прочностью, малым удельным весом, сочетающих высокие показатели традиционно несочетаемых свойств), прежде всего, на основе объемных наноструктурированных материалов – стали, титана и его сплавов, керамики, пластмасс и композиционных материалов;

▲ увеличение ресурса режущих и обрабатывающих инструментов на основе применения объемных наноструктурных инструментальных материалов, нанопорошков, внедрения технологических процессов осаждения наноструктурных износостойких покрытий на режущие инструменты, штампы и прессформы;

▲ широкое внедрение нанотехнологических разработок в модернизацию парка высокоточных и прецизионных станков;

▲ создание с использованием нанотехнологий методов измерений и позиционирования, которые обеспечат адаптивное управление режущим инструментом на основе оптических измерений обрабатываемой поверхности детали и обрабатывающей поверхности инструмента непосредственно в ходе технологического процесса;

▲ размерная обработка рабочих поверхностей изделий с регулированием топографии обработанной поверхности на наноуровне;

▲ увеличение ресурса работы и улучшение совокупности технических показателей автотранспорта за счет применения наноматериалов, более точной обработки и восстановления поверхностей;

▲ в электронном и электротехническом машиностроении – расширение возможностей радиолокационных систем на основе наноструктур и волоконно-оптических линий связи с повышенной пропускной способностью с использованием фотоприемников и инжекционных лазеров на структурах с квантовыми точками и т.д.

▲ в энергетическом машиностроении – совершенствование технологии создания топливных и конструкционных элементов, повышение эффективности существующего оборудования и развития альтернативной энергетики.

**5.** Многие из задач, существующих сегодня в области *энергетики*, могут быть решены с помощью нанотехнологий.

Это связано, прежде всего, с синтезом новых материалов для создания устройств, предназначенных для транспортировки и хранения энергии; с разработкой новых альтернативных ресурсосберегающих источников энергии и топливных элементов; с существенным повышением эффективности, увеличением КПД и снижением стоимости устройств преобразования солнечной энергии и более эффективным их использованием в жилищном и промышленном строительстве, в бытовых приборах; с созданием «умных» глобальных энергосетей, которые должны перейти от транспортировки традиционного массивного топлива (угля, нефти, газа) к передаче невесомой энергии (электрического тока по проводам) и т.д.

**6.** Основные разработки нанотехнологий в области *строительства* направлены на создание новых прочных, легких и дешевых строительных материалов, которые позволят создавать высотные здания и сооружения, обладающие сейсмо- и виброустойчивостью, защищающих от неблагоприятной экологической обстановки; новых технологий, которые принесут в архитектуру ранее недоступные формы; позволят создать «умные», ресурсоэкономные, обеспечивающие благоприятные условия для проживания и жизнедеятельности здания и строения.

## **Лекция 16. Перспективы развития нанотехнологий**

1. Синергетический эффект нанотехнологий
2. Экономические аспекты нанотехнологий
3. Основные тенденции развития в ближайшей и отдаленной перспективе
4. Социальные последствия нанотехнологий

## 5. Нанотехнологические разработки в НТУ «ХПИ»

1. Нанотехнологии представляют сегодня широкий набор научных, технологических и производственных направлений, объединенных в единую технологическую культуру, основанную на проведении операций с материей на уровне отдельных атомов и молекул.

Речь идет не просто о новых технологиях, а о технологиях, которые изменят все сегменты промышленности и области человеческой деятельности.

*Нанотехнологию можно рассматривать как технологию общего назначения*, которая выступает в качестве объединяющего начала в физике, химии, биологии, материаловедении, в области интеллектуальных систем, в высокотехнологичной вычислительной технике, информационных технологиях, электронике и т.д.

Такое «перекрытие» и наложение наук должно привести к синергетическому эффекту, т.е. их взаимодействию, усилению и созданию новых возможностей технологического развития и новым применениям.

Ведущие эксперты предсказывают грядущую интеграцию (слияние) технологий, в которой нанотехнологии, биотехнологии, информационные технологии и нейроэлектроника создадут принципиально новую эволюционирующую промышленность будущего, полностью автоматизированную и развивающуюся по своим законам, рис.1.34.



Рисунок 1.34 - Интеграция технологий

Возможно, именно на основе интеграции технологий будут разработаны новые процессы обработки материалов и создания конструкций, приборов, устройств, объединяющие макро-, микро-и нанотехнологии.

2. *Область нанотехнологий является самым финансируемым и наиболее динамично развивающимся видом научно-исследовательской деятельности в мире.*

Общемировые затраты на нанотехнологические проекты превышают 9 млрд долларов в год.

*Нанотехнологии превратились в товар*, новую общую ценность. Происходит коммерциализация нанотехнологий.

Современный мировой рынок нанотехнологий оценивается от 30 до

100 млн долларов в год, при этом он является одним из самых быстрорастущих в мировой экономике.

Уже сегодня мировая промышленность использует нанотехнологии в процессе производства ~ 80 групп потребительских товаров и свыше 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования; в обороте находится более 5 тысяч товаров – продуктов nanoиндустрии, включая машиностроительные, электронные, медицинские, косметические, спортивные изделия.

По прогнозам американской ассоциации *National Science Foundation*, в ближайшие 10...15 лет мировой рынок наноматериалов и нанотехнологий превысит 1 трл долларов, около 50 % ВВП будет получено с помощью нанопродукции.

**3. Основные перспективные проекты в области развития нанотехнологий можно представить следующим образом.**

**◆ *Краткосрочная перспектива (от 10 до 20 лет):***

- промышленное производство наноматериалов композиционного и инструментального назначения, биологически совместимых;
- производство одномерных химических и биологических датчиков, портативных медицинских диагностических устройств;
- производство микро- и наноэлектромеханических устройств (МЭМС-НЭМС).

**◆ *Среднесрочная перспектива (до 30 лет):***

- создание новых типов композиционных материалов с новыми функциональными свойствами на основе сочетаний различных нанообъектов;
- освоение самосборки в нанотехнологических процессах, в том числе с участием углеродных нанокластеров, биологических структур;
- использование наноизмерительной техники в производственных процессах;
- развитие методов и средств адресной доставки лекарств в организме, производство имплантируемых медицинских наноустройств.

**◆ *Далекая перспектива (более 30 лет):***

- развитие трехмерной электроники;
- самосборка биологических структур для восстановления частей человеческого организма, создание искусственных органов на молекулярном уровне, разработка искусственных хромосом;
- создание управляемых биологических и биоподобных систем, наноробототехнических систем;

- использование квантовых компьютеров для расчета характеристик молекул и других нанобъектов;

- массовое производство нанотоваров.

*К наиболее смелым долгосрочным прогнозам практического применения нанотехнологий, сегодня воспринимаемым как фантастические, могут быть отнесены следующие:*

◆ Организация на основе системы «нанокomпьютер – наноманипулятор» сборочных автоматизированных комплексов, способных собирать любые макроскопические объекты по заранее разработанной трехмерной сетке расположения атомов.

◆ Изменение на основе нанотехнологий принципа конструирования изделий, что позволит создавать машины и механизмы, ранее недоступные человеку. Механизмы будут состоять из одной очень сложной детали.

◆ Объединение нескольких ключевых элементов компьютеров (процессора, памяти, жесткого диска) в одно устройство, что обеспечит уменьшение энергопотребления и увеличение скорости обработки информации

◆ Преобразование с помощью механоэлектрических нанопреобразователей любых видов энергии с большим КПД и создание эффективных устройств для получения электроэнергии из солнечного излучения с КПД ~90%.

◆ Существенное увеличение сырьевых запасов человечества благодаря глобальному контролю за рециркуляционными системами, за счет перевода промышленности и сельского хозяйства на безотходные нанотехнологические методы.

◆ Глобальный экологический и климатический контроль.

**4. Кардинальные изменения в промышленности, связанные с внедрением нанотехнологий, повлекут соответствующие трансформации параметров и функций *социальной инфраструктуры*.**

Ключевыми могут стать изменения таких важнейших для человечества сфер, как среда обитания, здравоохранение.

Изменения в микроэлектронике повысят информационную осведомленность человечества, обеспечат надежные и высокочастотные каналы связи, открытый доступ к произведениям искусства, литературы.

Благодаря нанотехнологиям потребительские и промышленные товары станут более долговечными, качественными и компактными.

Новые технологии требуют и новых знаний от работников во всех звеньях производства и создания добавленной стоимости. Это означает, что развитие нанотехнологий связано не только с созданием соответствующей

научной и экономической обстановки, но и с наличием квалифицированных технических кадров на всех этапах производства.

Принципиальные изменения общества, связанные с внедрением нанотехнологий, требуют изменения и модернизации системы образования на всех этапах обучения. Адаптация к новым нанотехнологическим представлениям должна начинаться в школах, включать профессионально-техническую подготовку, распространяться на университеты и другие высшие учебные заведения. Особую роль при этом играет формирование поддерживающей инфраструктуры и лабораторно-инструментальной базы обеспечения нанотехнологических исследований.

Важным последствием внедрения нанотехнологий является не только их потенциально положительное влияние на все сферы жизни человечества, но и опасности, которые всегда сопровождают технические новинки.

5. Исследования в области нанотехнологий и наноматериалов проводятся на многих кафедрах нашего вуза.

*Основными направлениями исследований являются следующие.*

◆ *В области космической и атомной техники:* исследование фуллеренов, нанотрубок, создание многослойных рентгеновских зеркал, структур со сверхпроводящими и полупроводниковыми свойствами; работы в области радиационного материаловедения. Партнеры – ННЦ ФТИ, ФТИНТ НАН Украины, университеты США и Германии (*кафедра физики металлов и полупроводников*).

◆ *В области энергетики:* устройства преобразования солнечной энергии в электрическую на основе тонкопленочных структур (*кафедра промышленной и биомедицинской электроники*).

◆ *В области повышения твердости, коррозионной стойкости и износостойкости деталей:* диффузионное карбидное легирование сталей (*кафедра интегрированных технологий, процессов и аппаратов*).

◆ *В области машиностроения и обработки материалов:* применение новых классов конструкционных и инструментальных материалов с нано- и субмикроструктурной структурой (*кафедра интегрированных технологий машиностроения им. М.Ф. Семко*).

◆ *В области химии:* создание катализаторов для ферментации жиров, для очистки вредных выбросов, ускорения химических реакций (*кафедра интегрированных технологий процессов и аппаратов*).

◆ *В области повышения качества керамических изделий:* создание нитридокремниевой керамики, содержащей в порах наночастицы и нитевид-

ные кристаллы тугоплавких бескислородных соединений (*кафедра технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей*).

◆ В области *биохимии и медицины*: создание сенсорных нанодатчиков для диагностики хронической патологии органов пищеварения (*кафедра технической электрохимии*).