



Уважаемые читатели!

Предлагаем Вашему вниманию серию статей, посвященных важнейшей научно-технической проблеме XXI века, которую многие называют нанореволюцией, – наноматериалам, нанотехнологиям и их применению в литейном производстве.

1. Общие проблемы развития и внедрения нанотехнологий и наноматериалов.
2. Возможности использования нанотехнологий и наноматериалов в материаловедении, металлургии и литейном производстве.
3. Результаты исследований в области наноматериалов и нанотехнологий в Республике Беларусь.

Dear Readers!

We bring to your attention a series of articles devoted to the most important scientific and technical problem of the XXI century, which many call the nanorevolution, – nanomaterials, nanotechnologies and their application in foundry:

1. General problems of development and implementation of nanotechnologies and nanomaterials.
2. Possibilities of using nanotechnology and nanomaterials in materials science, metallurgy and foundry.
3. Results of research in the field of nanomaterials and nanotechnology in the Republic of Belarus.

<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-152-162>

УДК 620.3; 621.74

Поступила 09.11.2020

Received 09.11.2020

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: foundry@bntu.by

Д. В. КУИС, Н. А. СВИДУНОВИЧ, Белорусский государственный технологический университет,

г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: KuisDV@belstu.by

С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65

Настоящая статья является первой статьей цикла, посвященного вопросам создания и применения наноматериалов и технологий в современной промышленности в целом и в металлургии, материаловедении и литейном производстве в частности. Рассматриваются уникальные свойства наноматериалов и связанные с этими свойствами преимущества и недостатки, области применения этих материалов, а также проблемы и направления развития нанотехнологий, перспективы и последствия широкого применения наноматериалов в различных сферах, их влияние на развитие общества, производства, экономику и экологию.

Ключевые слова. *Наноматериалы, нанотехнологии, свойства материалов, экология, энергоэффективность, ресурсосбережение.*

Для цитирования. *Николайчик, Ю. А. Общие проблемы развития и внедрения наноматериалов и нанотехнологий /*

Ю. А. Николайчик, Д. В. Куис, Н. А. Свидунович, С. Л. Ровин // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 152–162.

<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-152-162>.

GENERAL PROBLEMS OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

Yu. A. NIKALAICHYK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

E-mail: foundry@bntu.by

D. V. KUIS, N. A. SVIDUNOVICH, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

E-mail: KuisDV@belstu.by

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

This article is the first in a cycle devoted to the creation and application of nanomaterials and technologies in modern industry, in general, and in metallurgy, materials science and foundry, in particular. The article discusses the unique properties of nanomaterials and the associated advantages, disadvantages and areas of their application, as well as the problems and directions of the development of nanotechnologies, the prospects and consequences of the widespread use of nanomaterials in various fields, their influence on the development of society, industry, economy and ecology.

Keywords. *Nanomaterials, nanotechnology, material properties, ecology, energy efficiency, resource conservation.*

For citation. *Nikalaichyk Yu. A., Kuis D. V., Svidunovich N. A., Rovin S. L. General problems of development and implementation of nanomaterials and nanotechnologies. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 152–162. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-152-162>.*

Сравнительно недавно лишь очень немногие ученые и инженеры работали в области исследования наноструктур и разработки нанотехнологий, и далеко не все специалисты смежных областей имели представление об этой сфере, не говоря уже об обычных людях. Сегодня интерес к наноматериалам достиг настоящего ажиотажа, в котором могут потеряться ориентиры и ключевые результаты исследований.

В научном сообществе до сих пор нет единого мнения о перспективах развития нанотехнологий. Некоторые уверены в безграничных возможностях нанотехнологий и предсказывают революционный прорыв в промышленном производстве и социально-экономической сфере. Другие, и среди них есть весьма серьезные ученые, с явным неодобрением относятся к поднятой вокруг нанотехнологий суете и рассматривают это как неизбежное зло, всегда сопровождающее крупные проекты. Есть и те, кто считает крикливые заявления и оголтелую рекламу признаками очередного околонуучного «пузыря», основной задачей которого является выкачивание бюджетных средств для финансирования своих лабораторий и исследований, проводившихся в общем то и до нанотехнологического бума [1].

Однако большинство экспертов в области стратегического планирования, научно-технической политики и инвестирования уверены, что в ближайшее десятилетие нас ждет новая научно-техническая революция – нанореволюция, которая затронет все области науки, производства, национальной безопасности, медицины, быта, отдыха и развлечений. Последствия ее будут не менее значимыми, чем изменения, вызванные компьютерной революцией последней трети XX века. И этому уже есть весомые подтверждения в самых разных сферах жизни. Сегодня в государственных программах практически всех экономически развитых стран в качестве приоритетных направлений научно-технического развития указаны исследования в области нанотехнологий, что призвано обеспечить скорейшее преодоление последствий кризиса и стабильный рост экономики на ближайшие десятилетия [4, 5].

Важнейшей тенденцией и требованием современного этапа развития техники и технологии является сокращение доли сырья и материалов, а также энергии в себестоимости готового продукта при значительном увеличении затрат на предварительные исследования, проектирование, разработку оборудования и технологии. Расширение объемов и областей применения наноматериалов является одним из факторов, обеспечивающих реализацию этих тенденций.

Согласно мнению многих авторитетных экспертов, так называемый блок NBIC (нано-, био-, информ- и когнитивные технологии) может успешно развиваться только в условиях прогресса в трех связанных и взаимозависимых сферах: 1) фундаментальная наука; 2) образование и просвещение; 3) инновационные разработки и бизнес.

Для успешного развития нанотехнологий и их внедрения во все сферы жизни необходимо углублять представления о структуре и свойствах нанобъектов и наноматериалов, фундаментальных принципах и закономерностях их поведения, разрабатывать специальные технологии их получения и применения, а также системно и комплексно оценивать последствия их глобального внедрения во все сферы жизни человека (рис. 1).

Чтобы не оказаться на обочине мировой цивилизации, необходимо соответствующим образом выстраивать инфраструктуру экономики и управления, совершенствовать систему образования, разумно инвестировать в фундаментальную науку и поддерживать инновационные разработки, быстро доводя их до рынка.

Гармоничное и безопасное развитие нанотехнологий невозможно без налаживания кооперации между их потенциальными пользователями и разработчиками. Только в этом случае инвестиции будут оправданными и успешными, а нежелательные последствия вовремя обнаружены, проанализированы и погашены.

Действительно, наночастицы обладают уникальными свойствами и могут быть чрезвычайно полезны для создания новых материалов, электроники, лекарств, но, с другой стороны, они могут проникать через все биологические мембраны, кожу, накапливаться в тканях, самоорганизовываться в более



Рис. 1. Анализ прогнозируемых последствий научно-технической нанореволюции [4]

сложные структуры, влиять на протекание биохимических реакций в организме и т.д. Еще более радикальные изменения (на генетическом уровне) могут произойти в процессе модифицирования ДНК. Уже сейчас возникают этические проблемы, касающиеся окружающей среды, здоровья людей, безопасности на индивидуальном и государственном уровне.

Необходимо принимать во внимание и косвенное влияние развития нанотехнологий, подобно тому как это происходит при разработке технологий двойного назначения (военных, аэрокосмических, информационных). Строительство интеллектуальных наносистем, трансгенная инженерия, развитие нанобиотехнологий и наномедицины, широкое использование генномодифицированных растений и животных в сельском хозяйстве, нетрадиционная энергетика, оптимальное природопользование и охрана окружающей среды требуют комплексных решений, принимаемых на новом интеллектуальном и морально-этическом уровне. Однако, осознавая все неопределенности и риски, следует согласиться с мнением, часто высказываемым крупнейшими авторитетами в науке и высокотехнологичном бизнесе, что «самая большая опасность, исходящая от нанотехнологий, которая может нанести наибольший ущерб обществу, это не развивать эти технологии!»

Сегодня имеется уже значительное количество обзоров, монографий, учебно-методической литературы, посвященных различным аспектам наноауки и нанотехники, но в то же время ощущается недостаток в систематизации знаний, накопленных в этой сфере [1–26].

В Республике Беларусь также уделяется большое внимание исследованию, применению и развитию нанотехнологий, имеется государственная научно-техническая программа по наноматериалам и нанотехнологиям (научный руководитель программы – академик П. А. Витязь), изданы учебные пособия, монографии, публикуется значительное количество научных статей [27–30].

К наноструктурным принято относить материалы, состоящие из элементов (частиц), один из характерных размеров которых лежит в интервале от 1 до 100 нм. Именно присутствие специфических наноразмерных элементов структуры (морфологических единиц) придает особые свойства наноматериалам, которые отсутствуют у аналогичных по химическому составу, но не имеющих наноструктуры материалов [1–4].

При переходе к наноразмерам происходит скачкообразное изменение магнитных, тепло- и электропроводных свойств. Для особо мелких материалов можно заметить даже изменение температуры плавления в сторону ее уменьшения. Еще одним уникальным свойством наноматериалов является эффект самосборки объектов из отдельных атомов и молекул в подходящих условиях. Эта способность предоставляет революционные возможности для создания готовых наномасштабных изделий без промежуточных операций обработки материала. Обладая развитой поверхностью, наноматериалы очень активны и охотно взаимодействуют с окружающей средой. Однако это создает серьезные проблемы при их хранении и транспортировке, особенно когда речь идет о металлических нанодисперсных материалах.

Для работы с наночастицами и наноструктурами необходимы специальные диагностические и экспериментальные средства (в частности, электронные и сканирующие зондовые микроскопы), устройства создания чистых зон, специальной атмосферы или вакуума, более глубокие физические подходы и модели (в том числе и квантово-механические), суперкомпьютеры для моделирования строения и свойств нанобъектов, высококвалифицированный персонал и др. Отчасти эти обстоятельства и объясняют появление отдельной дисциплины «Наноматериаловедение» и ее основные отличительные особенности.

Наноматериаловедение – наука о наноматериалах, их свойствах, способах получения и использования, соединяющая фундаментальную и прикладную науки, технологию и производство. Кратко ее задачи можно сформулировать следующим образом:

- разработка новых и улучшение характеристик традиционных материалов;
- исследование структуры на разных масштабных-временных уровнях с целью совершенствования материалов и прогнозирования их поведения в различных условиях эксплуатации;
- изучение физико-механических, физико-химических, тепловых, электрических, магнитных, оптических и других свойств материалов в широком диапазоне условий, включая экстремальные;
- разработка теоретических основ, позволяющих прогнозировать свойства материалов на основе физических моделей различного уровня (электронного, атомарного, кластерного, микро- и мезоскопического);
- разработка прикладных компьютерных программ для моделирования, анализа и дизайна материалов с использованием аппарата квантовой механики, методов молекулярной динамики, конечных элементов, динамики структурных дефектов и др.;
- создание новых и совершенствование традиционных технологий производства, обработки и утилизации материалов;
- поиск новых сфер и способов применения наноматериалов, оптимизация их выбора при разработке изделий, разработка новых принципов конструирования и сборки.

В течение многих веков принципиальной основой материаловедения служило фундаментальное положение – свойства материала определяют, главным образом, три фактора: химический состав; структура и технология получения материала (с современной точки зрения это прежде всего дальний и ближний порядок в расположении атомов – аморфная или кристаллическая структура вещества, фазовый состав, свойства межзеренных границ, тип и подвижность атомарных дефектов, наличие и характер распределения внутренних напряжений и др.; часто выделяют три иерархических уровня структуры: атомарный, кристаллографический и микроструктурный); температура, давление и другие факторы окружающей среды, такие, как ее химический состав, радиационные, оптические, электрические и магнитные поля.

В последние два-три десятилетия помимо указанных выше основополагающих факторов пристальное внимание стали уделять характерным размерам элементов структуры, при сильном уменьшении которых традиционным материалам можно придать улучшенные или совершенно новые свойства без изменения остальных требований к исходному сырью (т.е. при сохранении его химического состава и агрегатного состояния).

На 7-й Международной конференции по нанотехнологиям, проходившей в Висбадене в 2004 году, была принята следующая классификация наноматериалов:

По типу структуры:

- нанопористые структуры;

- наночастицы;
- нанотрубки, нановолокна и наноленты;
- нанодисперсии (коллоиды);
- наноструктурированные поверхности и пленки;
- нанокристаллы и нанокластеры.

По назначению:

- функциональные;
- композиционные;
- конструкционные.

По количеству измерений:

- нульмерные/ квазинульмерные (квантовые точки, сфероидные наночастицы);
- одномерные/ квазиодномерные (квантовые проводники, нанотрубки);
- двумерные/ квазидвумерные (тонкие пленки, поверхности разделов);
- трехмерные/ квазитрехмерные (многослойные структуры с наноразмерными дислокациями, сверхрешетки, нанокластеры).

Конечно, любые классификации и границы между отдельными группами материалов весьма условны. Так, фуллерены, нанотрубки, биомолекулы, мицеллы могут быть отдельными наночастицами или структурными элементами пленок и объемных материалов; пленки и нанокомпозиты могут быть приготовлены с помощью всех трех перечисленных классов. Одна из наиболее известных классификационных схем наноматериалов представлена на рис. 2 [27, 28].

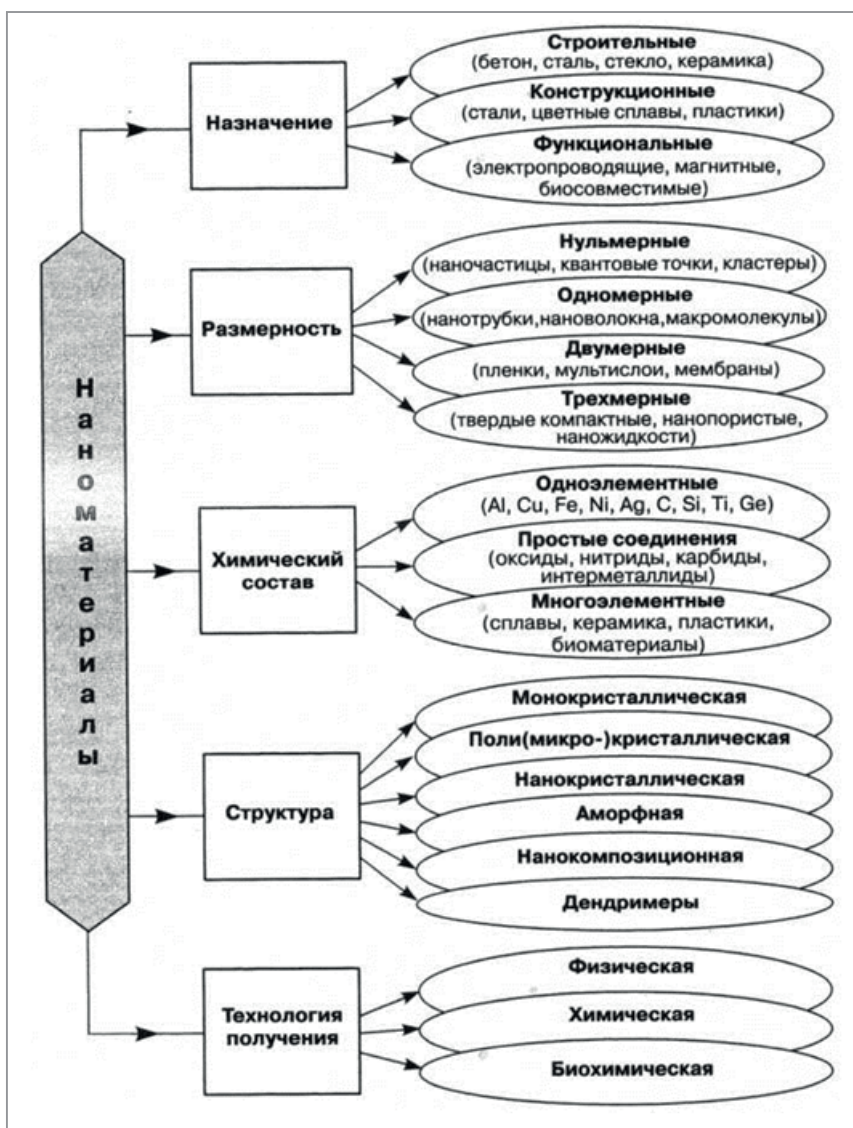


Рис. 2. Классификация наноматериалов

В «донанотехнологическую» эпоху для обозначения наноматериалов использовали термины «субмикронные» и «ультрадисперсные», при этом весьма приблизительно под первыми понимали структуры с характерными размерами в диапазоне от 300–500 нм до 1 мкм, а под вторыми – от десятков до сотен нанометров.

В химии под наночастицами часто подразумевают такие образования, у которых отношение числа атомов (молекул), лежащих на поверхности, к числу частиц в объеме больше или равно 1. При таком определении наночастицами для низкомолекулярных веществ считаются объекты с размерами от десятых долей нанометра до приблизительно 10 нм, а для высокомолекулярных – от единиц до сотен нанометров (при сфероидальной их форме).

В физическом материаловедении частицы размерами около 1 нм и менее часто называют кластерами, а материалы с такими морфологическими единицами – кластерными.

Практические цели, которые ставятся в наноматериаловедении, можно свести к двум задачам:

- 1) улучшение характеристик традиционных материалов;
- 2) создание принципиально новых материалов с уникальными характеристиками.

Все способы получения наноматериалов условно можно разделить на две группы: «сборка из атомов» и «диспергирование макроскопических материалов».

Как представить себе, что такое нанометр, насколько он мал?

Для того чтобы сделать частицу размером в 1 нм различимой глазом, необходимо увеличение в десятки тысяч раз, чего в принципе не может обеспечить оптический микроскоп, даже самый лучший. А для того чтобы не просто обнаружить, но и исследовать структуру частички размером в 1 нм, потребуется уже увеличение в ~1 млн. раз, что возможно только в случае применения современных электронных и сканирующих зондовых микроскопов. Если промасштабировать 1 нм до толщины человеческого волоса (50–60 мкм), еле видимого невооруженным глазом, то волосы в этом масштабе будут иметь диаметр около 3 м, а рост человека станет равным примерно 100 км! Если перевести привычные для нас единицы измерения роста волос на голове у человека (сантиметры в месяц) в нанометрические единицы, то получится весьма заметная скорость – 3–5 нм/с, что соответствует увеличению длины волос на несколько десятков атомных слоев за каждую секунду.

Перечень нанообъектов и наноструктур, с которыми уже сегодня приходится иметь дело, весьма обширен. В табл. 1 перечислены наиболее типичные представители наномира, а их место на шкале характерных размеров показано на рис. 3 [27].

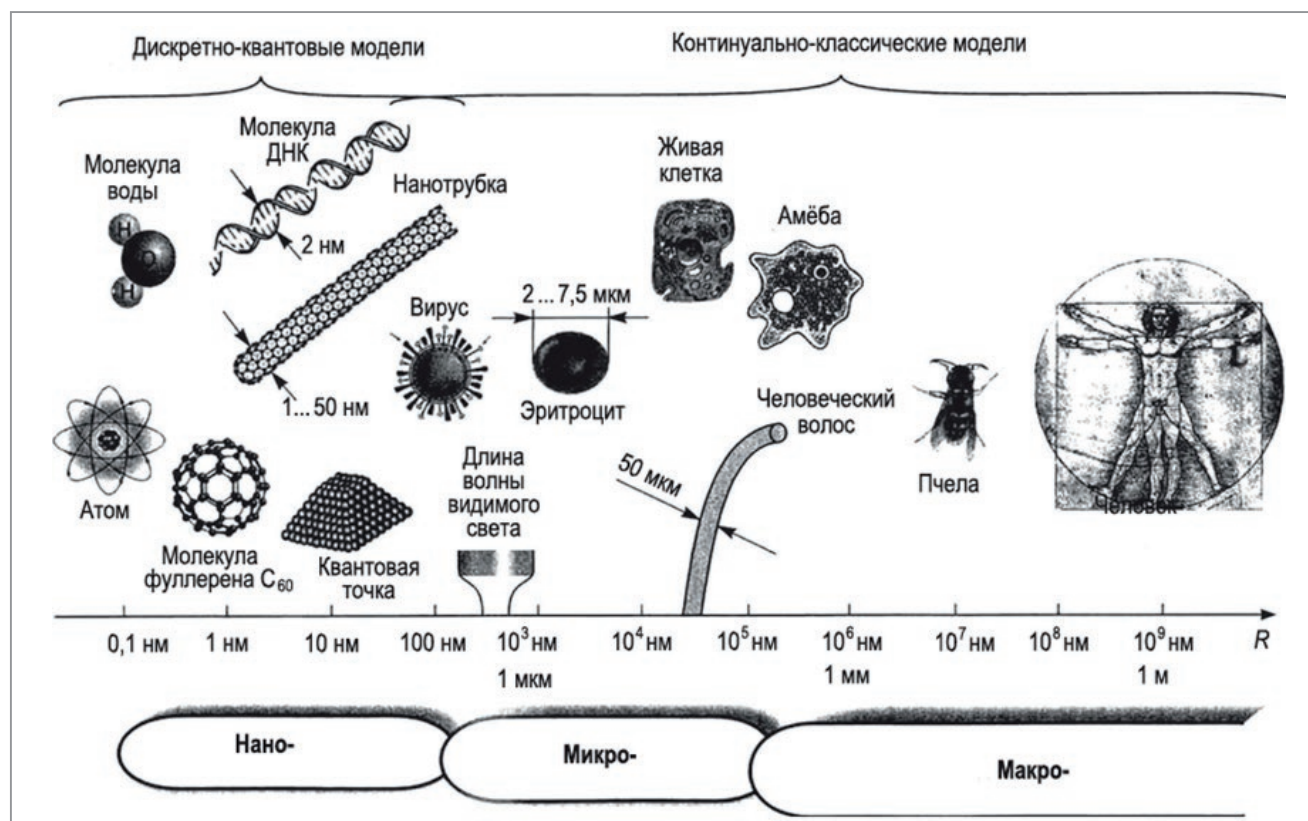


Рис. 3. Шкала характерных размеров типичных объектов нано-, микро- и макромира с указанием принятых способов их описания

Таблица 1. Объекты наноауки и нанотехники и их типичные размеры

Область знаний	Объекты, процессы, характеристики	Диапазон размеров, нм
Электроника, электрофизика	Волновая функция электронов	10 ... 100
	Типичная длина свободного пробега электронов	1 ... 100
	Затворы полевых транзисторов в интегральных схемах	50 ... 200
	Толщина напыляемых слоев в интегральных схемах	1 ... 10
	Доменная стенка	10 ... 100
Оптика	Характерная длина спиновой релаксации	1 ... 100
	Квантовый колодец	1 ... 100
	Ближняя зона излучения у торца оптоволокна	10 ... 100
	Глубина скин-слоя в металле	10 ... 100
Сверх-проводимость	Длина волны УФ-излучения	10 ... 100
	Длина волны рентгеновского излучения	0,01 ... 10
Механика и материалы	Когерентная длина куперовской пары	0,1 ... 100
	Мейснеровская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник	1 ... 100
	Дислокационное взаимодействие	1 ... 100
	Толщина границ зерен	1 ... 10
	Радиус вершины хрупкой трещины	0,1 ... 100
	Примесные кластеры, преципитаты	0,1 ... 100
	Зародыши новой фазы	1 ... 10
	Критический размер дислокационной петли	10 ... 100
	Краудион	1 ... 10
	Субструктурные ячейки	100 ... 1000
	Микродвойники	10 ... 100
Катализ	Реечный мартенсит	10 ... 1000
	Упрочненные приповерхностные слои, пленки	1 ... 1000
	Шероховатость номинально гладких поверхностей	0,1 ... 100
	Фуллерены	~1
	Нанотрубки (диаметр)	1 ... 100
Молекулярная химия	Активные центры	0,1 ... 1
	Нанопоры, наночастицы	1 ... 100
	Первичная структура макромолекул	0,1 ... 1
Молекулярная биология	Вторичная структура макромолекул	1 ... 10
	Третичная структура макромолекул	10 ... 1000
	Бактерии	100 ... 10 000
	Вирусы	20 ... 300
	Рибосома (диаметр)	~ 20
	Белки	2 ... 100
	ДНК (диаметр)	~ 2
	Мембраны (толщина)	1 ... 100

Наряду с отдельными наночастицами естественного или искусственного происхождения и их слабосвязанными ансамблями (порошками, аэрозолями, суспензиями и т.п.) предметом нанотехнологий являются также и наноструктурные материалы. Под ними понимают макроскопические тела, имеющие в своем составе наноразмерные морфологические или структурные единицы. К наноматериалам, в частности, относятся нанокристаллические металлы и сплавы, тонкопленочные одно- и многослойные покрытия, нанопористая керамика и полимеры, нанокомпозиты и др. Еще более сложно устроены наноструктурированные системы, например биологические клетки и их отдельные элементы (органеллы, ядра, мембраны и др.), гибридные микросистемные устройства (например, микро- и наноэлектромеханические системы (МЭМС и НЭМС)), а также сложные интеллектуальные комплексы, имеющие в своем составе наноразмерные компоненты (рис. 4).

В документах Национальной нанотехнологической инициативы США дано следующее определение нанотехнологий: «нанотехнологии – это совокупность фундаментальных и прикладных исследований и разработок, направленных на познание специфики поведения вещества и управление его свойствами в интервале его характерных размеров от ~ 1 до ~ 100 нм, где уникальные явления позволяют реализовать инновационные приложения».

В целях упорядочения терминологии, облегчения общения и взаимодействия людей и ведомств Американская международная организация по испытанию материалов приняла стандарт E2456–06 «Терминология для нанотехнологий». Нанонаука в нем определяется как «изучение вещества, процессов, явлений и устройств в нанометровом диапазоне». Подчеркивается, что свойства этих объектов отличаются от макроскопических, что и является предметом изучения и применения на практике.

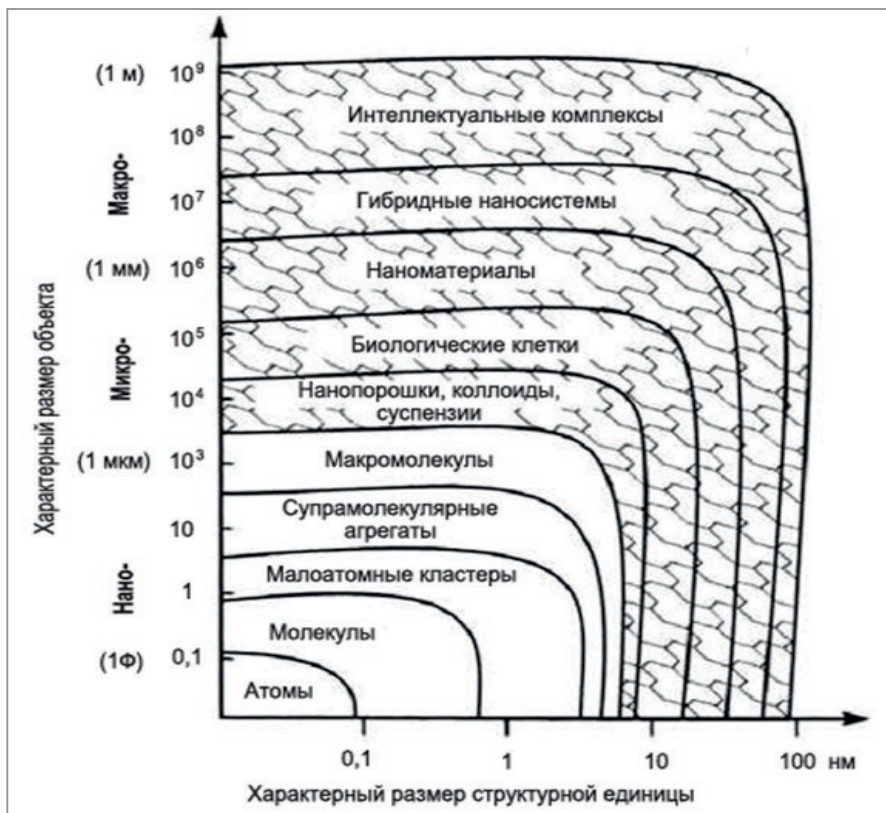


Рис. 4. Типичные объекты нанотехнологий (незаштрихованные области соответствуют размерным характеристикам отдельных наночастиц, заштрихованные – их ансамблям, наноструктурам, наносистемам)

Обобщая можно сказать, что наноматериалы занимают промежуточную область между миром отдельных атомов, управляемым законами квантовой механики, и макромиром, хорошо описываемым в рамках различных континуальных теорий (упругости, гидродинамики, электродинамики и т.п.), в которых игнорируется атомно-молекулярное строение вещества и оно рассматривается в приближении как однородная, непрерывная среда.

Фундаментальным базисом нанотехнологий являются физика, химия и молекулярная биология. Большую роль играют также прикладная математика и компьютерное моделирование наноструктур на основе квантово-механических закономерностей поведения объектов, состоящих из счетного числа атомов или молекул.

Классификация нанопродукции, учитывающая ее иерархическую сложность, представлена на рис. 5. Наночастицы, нанокластеры, слабосвязанные агрегаты, нанопорошки, аэрозоли, коллоиды, находящиеся на нижних уровнях иерархии по сложности, представляют наиболее обширный класс. За ними следуют наноматериалы, а затем – наноизделия, состоящие из многих элементов или требующих специальной обработки материалов.

Зачастую нанотехнологии позволяют создавать готовые изделия, содержащие миллионы элементов, минуя стадию производства материалов и отдельных



Рис. 5. Иерархическая лестница наноструктурных объектов

деталей, их последующей обработки и сборки (на рис. 5 этот переход показан пунктиром). Наибольшее распространение такие интегральные технологии получили в твердотельной электронике, в частности, в так называемой планарной микро- и нанoeлектронике, когда на поверхности полупроводниковой пластины создаются десятки и сотни миллионов наномасштабных элементов большой интегральной схемы. Чаще всего такие интегральные схемы на одном чипе (как правило, на пластинке из сверхчистого монокристаллического кремния) используют в качестве микропроцессоров или блоков оперативной памяти в персональных компьютерах.

В общей глобальной системе нанотехнологий и наноматериалов можно выделить следующие стратегические направления их применения и развития:

1. Нанотехнологии и нанобъекты на атомно-молекулярном уровне, работающие на квантово-механических принципах, которые создаются комбинацией отдельных атомов, молекул, полученной в результате их самосборки. Такие технологии нивелируют границу между веществом и устройством, создаваемым на атомарно-молекулярном уровне. Пока они еще являются достижением отдельных научных центров и лабораторий, но завтра вполне могут стать обычной производственной практикой.

2. Нанобиотехнологии на клеточном уровне, в частности, работа с эмбриональными стволовыми клетками, адресная доставка лекарственных препаратов, ранняя диагностика заболеваний и т.д.

3. Синтез новых веществ в конденсированном состоянии с использованием наноразмерных реагентов и химических реакций нового типа.

4. Наноструктурированные и наноразмерные материалы функционального и конструкционного назначения, создаваемые с использованием традиционных подходов. Сегодня нанопродукция этого направления представлена наиболее широко.

Базой для современных нанотехнологий стали открытия и фундаментальные достижения физики, химии, биологии XX века. Так, в 1950 году было установлено влияние сферических наночастиц немагнитной фазы в матрице железа на его коэрцитивную силу (рис. 6).

В 60-х годах появились понятия молекулярного и ионного кластеров с устойчивой химической связью между атомами входящего в них металла (рис. 7). Дальнейшее развитие понятия о кластерах как о многоядерных комплексных соединениях позволило использовать его для описания зародышей кристаллизации, а также ассоциаций в жидкостях, расплавах и твердых телах. Была установлена зависимость свойств металлического кластера от его размеров. Исчезновение этой зависимости может быть критерием верхнего предела линейного размера наночастиц, конкретного для данного вещества.

В 70-х годах квантово-механическими расчетами была предсказана возможность существования стабильных гигантских молекул из атомов одного вещества – углерода, бора, кремния. В 1985 г. впервые были обнаружены полые многоатомные молекулы углерода со сферической поверхностью (*фуллерены*). Наиболее стабильными из них оказались C_{60} и C_{70} (рис. 8).

Открытия в области нанотехнологий и наноматериалов с каждым годом все более активно используются в металлургии и литейном производстве. Сегодня основными направлениями в этой сфере являются [13, 14]:

- компактирование и спекание нанопорошков в порошковой металлургии;
- термоактивация веществ с переводом в наноразмерный диапазон;
- плазменный карботермический способ восстановления металлов;

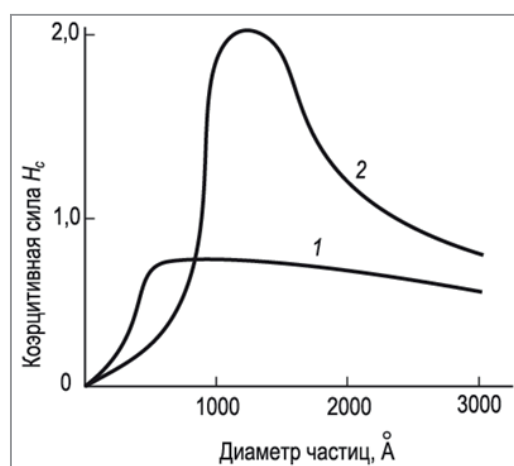


Рис. 6. Влияние размера сферических наночастиц немагнитной фазы на коэрцитивную силу железа: 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая

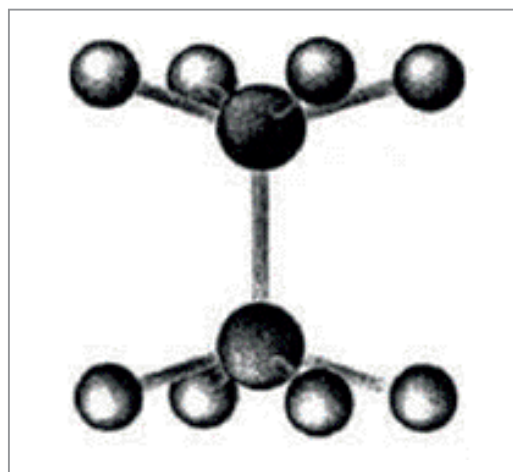
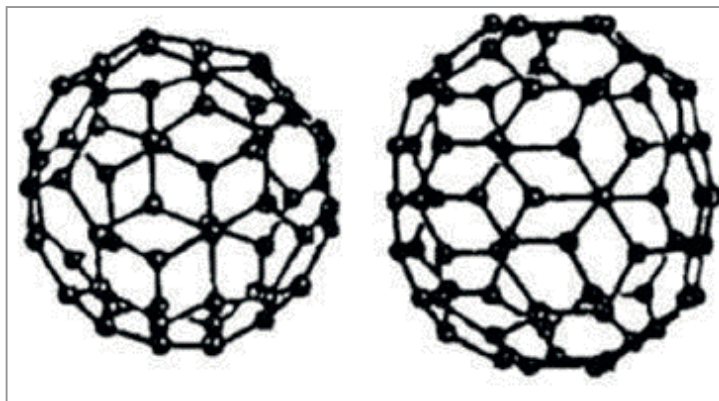


Рис. 7. Структура аниона $[Re_2Cl_8]^{2-}$

Рис. 8. Структура молекул фуллерена C_{60} и C_{70}

- обработка заготовок потоком высокоэнергетических наночастиц;
- нанесение упрочняющих металлических покрытий;
- кристаллизация наночастиц из аморфного состояния;
- внесение наночастиц модификатора в исходный расплав;
- использование наноструктурных добавок для модифицирования органических и силикатных связующих для формовочных и стержневых смесей;
- нанодиспергирование огнеупорных наполнителей противопожарных красок;
- разработка методов и аппаратов для улавливания наноразмерных частиц в горной металлургии (например, для извлечения ценных металлов), при рециклинге металлосодержащих отходов, в системах очистки промышленных выбросов;
- разработка средств индивидуальной защиты человеческого организма от воздействия наночастиц.

Развитие нанотехнологий, получение наноструктурированных материалов (наноразмерных частиц, пленок, композитов) и расширение сфер их применения сегодня является одним из магистральных направлений научно-технического прогресса, позволяет поднять на новый уровень конструкторские и технологические разработки, повысить качество потребляемых человеком продуктов и, несомненно, окажет огромное влияние на мировую экономику и социальную сферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии / пер. с англ. М.: Мир, 2002. 295 с.
2. Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. М.: Техносфера, 2004. 328 с.
3. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнику / Ю. И. Головин. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
4. Рыбалкина, М. Нанотехнологии для всех. Большое в малом / М. Рыбалкина. М.: Nanotechnology News Network. 2005. 444 с.
5. Фостер, Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности / Л. Фостер. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
6. Суздаев, И. П. Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. М.: КомКнига, 2006. 592 с.
7. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
8. Рамбиди, Н. Г. Физические и химические основы нанотехнологий / Н. Г. Рамбиди, А. В. Березкин. М.: Физматлит, 2008. 456 с.
9. Сидоров, Л. Н. Фуллерены / Л. Н. Сидоров и др. М.: Экзамен, 2005. 668 с.
10. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Под ред. А. Л. Алексеева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
11. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. М.: Академкнига, 2007. 398 с.
12. Сергеев, Г. Б. Нанохимия / Г. Б. Сергеев. М.: КДУ, 2006. 336 с.
13. Рудской, А. И. Нанотехнологии в металлургии / А. И. Рудской. С-Пб.: Наука, 2007. 186 с.
14. Гончаров, С. А. Нанотехнологии и нанокристаллические материалы в горной промышленности / С. А. Гончаров, Н. Ю. Чернегов. М.: Изд-во МГТУ, изд-во «Горная книга», 2009. 100 с.
15. Nanotechnology / ed. G. Schmid. Wiley-VCH. Weinheim. 2008. 300 p.
16. Nanophysics and Nanotechnology. An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience / ed. E. L. Wolf. Wiley-VCH. Weinheim. 2006. 292 p.
17. Biological and Biomedical Nanotechnology / eds. A. P. Lee, L. J. Lee. Springer Science. 2006. 522 p.
18. Physics and Engineering of New Materials / eds. D. T. Cat, A. Pucci, K. Wandelt. Springer, Berlin-Heidelberg. 2009. 387 p.
19. Koch, C. C. Structural Nanocrystalline Materials. Fundamental and Applications / C. C. Koch, L. A. Ovid'ko, S. Seal, S. Veprck. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 2007. 364 p.
20. Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices. Sensors and Actuators / eds. E. Gusev, E. Garfunkel, A. Dideikin. Springer Science. New York. 2010. 314 p.

21. Nanostructured Materials / ed. G. Wilde. Elsevier. Amsterdam. 2009. 374 p.
22. Introduction to Nanoscale Science and Technology / eds. M. Di Ventra et al. Kluwer Academic Publishers. 2004. 611 p.
23. Nanoscale Science and Technology / eds. R. Kelsall et al. John Wiley & Sons. 2005. 472 p.
24. **Mansoori, G.A.** Principles of Nanotechnology / G.A. Mansoori. World Scientific. 2005. 360 p.
25. Nanoethics. The ethical and social implications of nanotechnology / eds. F. Allhoff et al. John Wiley & Sons. 2007. 385 p.
26. Nanotechnology and Society / eds. F. Allhoff and P. Lin. Springer. US. 2008. 299 p.
27. **Витязь, П. А.** Наноматериаловедение / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович, Д. В. Куис. Минск: Выш. шк., 2015. 511 с.
28. **Витязь, П. А.** Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович. Минск: Выш. шк., 2010. 297 с.
29. **Свидунович, Н. А.** Нанокompозит на основе железа и углеродных добавок различной дисперсности с гетерофазной структурой и включениями сверхтвердого углерода, полученный методом термобарической обработки / Н. А. Свидунович и др. // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 139–146.
30. **Рудницкий, Ф. И.** Использование энергии поверхности ультрадисперсных частиц при разработке наномодифицирующих комплексов / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // Металлургия машиностроения. 2019. № 6. С. 9–13.