

---

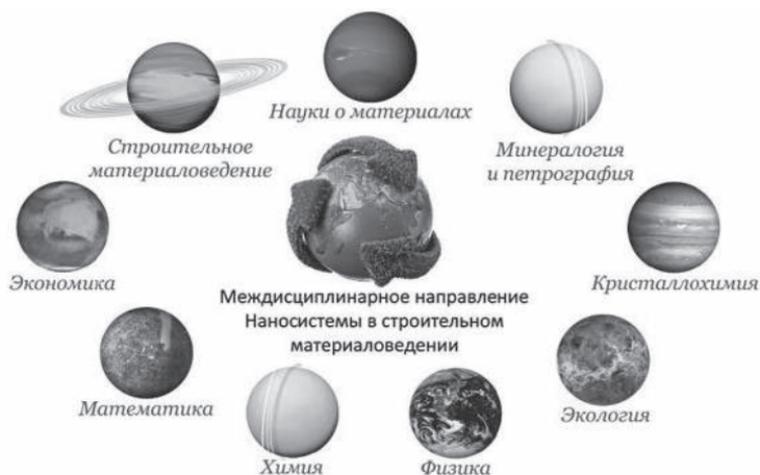
## ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание современных конкурентоспособных, высокоэкологических и энергосберегающих строительных материалов предполагает переориентацию строительной индустрии на широкое применение нанотехнологических производств.

Строительное материаловедение как наука включает ряд направлений, занимающихся разработкой и исследованием строительных материалов широкого спектра технологий производства, свойств и назначений. Комплекс этих направлений пополняется по мере расширения потребностей стройиндустрии в соответствии с новыми реалиями, за счет их дифференциации и формирования новых научных направлений, возникающих главным образом на стыке строительного материаловедения с другими областями знания.

Отличительной чертой современных научных направлений строительного материаловедения является то, что они не только позволяют создавать новые и совершенствовать существующие технологии и материалы, но и дают возможность сквозь призму нетрадиционных подходов по-новому взглянуть на сырье, технологию, свойства и области применения современных строительных материалов и изделий, открывая путь к стремительному развитию нового научного направления «Наносистемы в строительном материаловедении».

Проводимые в последние десятилетия исследования различными научными школами ведущих вузов России и зарубежных научных центров позволили сформулировать теоретические основы ряда направлений как фундаментального,



так и прикладного характера, которые явились основой для внедрения наноматериалов и наносистем при проектировании строительных материалов.

Индустрия строительных материалов в настоящее время испытывает острый недостаток инженерных кадров, способных реализовать нанотехнологические инновации в условиях конкретного производства, и актуальной задачей высшей школы является ликвидация этого кадрового дефицита.

В основу курса «Наносистемы в строительном материаловедении» положена идея междисциплинарности, наиболее отвечающая современным тенденциям развития науки.

Содержание и структура материала отражает общий концептуальный подход авторского коллектива к проблематике направления «Наносистемы в строительном материаловедении». При изложении ряда глав были использованы результаты авторских исследований.

Авторы считают приятным долгом выразить искреннюю благодарность преподавателям, сотрудникам, аспирантам, магистрантам и студентам секции «Наносистемы в строительном материаловедении» кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В. Г. Шухова за помощь при подготовке настоящего издания.

---

## ВВЕДЕНИЕ

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАНОРАЗМЕРНОМ СОСТОЯНИИ ВЕЩЕСТВА

В 1914 г. выдающийся немецкий физико-химик В. Оствальд в своей книге под символическим названием «Мир обойденных величин» написал пророческие слова: «Согласно историческому развитию нашего естествознания, мы привыкли свойства всех тел рассматривать с точки зрения материи в массе или же с точки зрения молекулярных и атомистических теорий. До недавнего времени мы не видели, что между материей в массе и материей в молекулах существует целый мир замечательных явлений... промежуточное царство с чрезвычайно многочисленными представителями... Только теперь мы знаем, что каждое тело приобретает особые свойства и показывает своеобразные явления, когда частички его больше размеров молекул, но все же еще так малы, что их нельзя различить в микроскоп»<sup>1</sup>.

### «Мир обойденных величин» — это наноструктуры в современном понимании

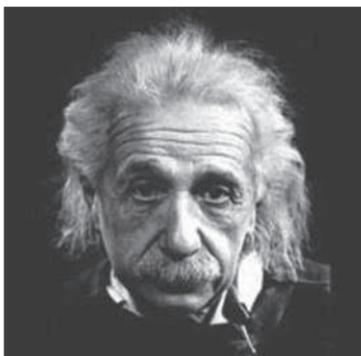
Приставка «нано» (от *греч.* *nanos* — карлик — миллиардная доля чего-либо) имеет значение «маленький», «крошечный». Поэтому, исходя даже из формальных соображений, наноразмерными объектами являются материальные

---

<sup>1</sup> В начале XX в. предел разрешения (оптических) микроскопов составлял не более 0,5 мк.



*Вильгельм Оствальд*



*Альберт Эйнштейн*

образования, размеры которых по крайней мере вдоль одной пространственной координатной оси измеряются нанометрами ( $1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA} = 10^{-3} \text{ мкм} = 10^{-9} \text{ м}$ )<sup>2</sup>. В этот диапазон размеров попадают атомные ассоциации, кластеры, супрамолекулярные образования, представители биологического мира и т.д. (рис. В.1, В.2).

Особенность таких сверхмалых образований состоит в том, что их размер соизмерим с радиусом действия сил межатомного взаимодействия, т.е. с расстоянием, на которое должны быть удалены атомы тела, чтобы их взаимодействие не сказывалось на его свойствах в заметной степени<sup>3</sup>. Вследствие данной особенности наноразмерные объекты взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой иначе, чем макротела.

В обычных макротелах площадь поверхности тела невелика по сравнению с его объемом. Все физические свойства

тела определяются физическими свойствами объемного образца, хотя многочисленные исследования установили,

<sup>2</sup> Первое упоминание о наночастицах принадлежит А. Эйнштейну, который в 1905 г. теоретически доказал, что размер молекулы сахара равен одному нанометру.

<sup>3</sup> Большой процент атомов, находящихся на поверхности наноразмерных частиц, является одним из принципиально важных факторов, приводящих к различию свойств наноструктур и объемных материалов.



Рис. В.1

Нанометрическая шкала (по академику В. Я. Шевченко)

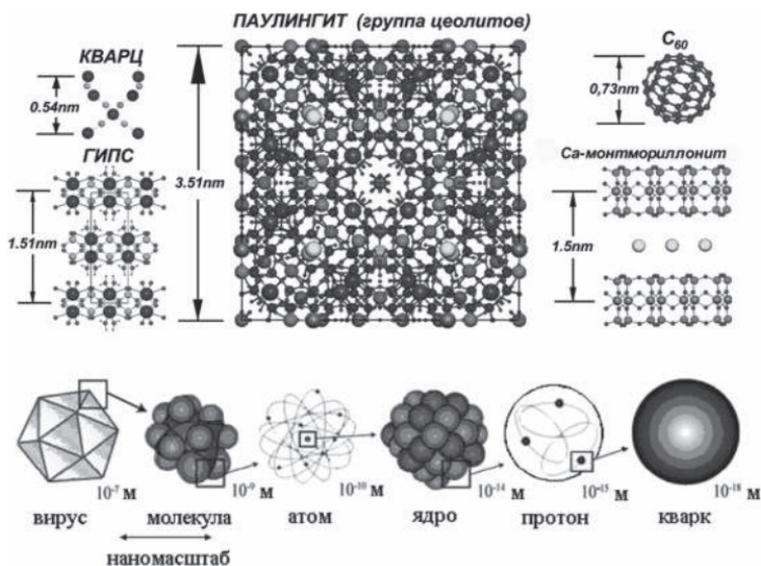


Рис. В.2

Характерные размеры различных структур

что свойства поверхности твердого тела существенно отличаются от свойств объемного образца. Особенность тонких пленок состоит в том, что у них объем, занимаемый поверхностными атомными или молекулярными слоями, вполне сопоставим с объемом самой пленки. Ситуация с пленками нанометровых толщин усугубляется тем, что такую пленку можно рассматривать как особую двумерную систему, свойства которой определяются исключительно свойствами поверхностного слоя, так как слоев, соответствующих объемному образцу, практически не существует. Однако поскольку в объемном образце атомы, расположенные в объеме, находятся в уравновешенном состоянии и экранированы от внешней среды поверхностным слоем, то имеет место альтернативная точка зрения, заключающаяся в том, что в наноразмерной структуре доминируют и проявляют себя именно ранее демпфированные объемные свойства материала.

Точно такая же ситуация складывается с частицами нанометрового размера. При диаметре порядка 10–15 Å практически вся частица представляет собой поверхность, и свойства ее будут совершенно уникальными (рис. В.3). При диспергировании резко возрастает активность вещества в твердом состоянии и скорость физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Скорость такого взаимодействия всегда пропорциональна величине поверхности. Чем меньше ее величина, тем быстрее вещество растворяется или тем быстрее протекают твердотельные реакции, например, при взрывах.

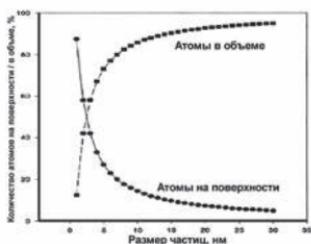


Рис. В.3

*Зависимость доли атомов в объеме и на поверхности от размера частиц*

## ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Научный интерес к нанокристаллическому состоянию твердого тела в дисперсном или компактном состоянии связан прежде всего с ожиданием различных размерных эффектов на свойствах наночастиц и нанокристаллитов, размеры которых соизмеримы или меньше, чем характерный корреляционный масштаб того или иного физического явления или характерная длина, фигурирующие в теоретическом описании какого-либо свойства или процесса (например, длина свободного пробега электронов, длина когерентности в сверхпроводниках, длина волны упругих колебаний, размер экситона в полупроводниках, размер магнитного домена в ферромагнетиках и т. д.).

Прикладной интерес к наноматериалам обусловлен возможностью значительной модификации и даже принципиального изменения свойств известных материалов при переходе в нанокристаллическое состояние, новыми возможностями, которые открывает нанотехнология в создании материалов и изделий из структурных элементов нанометрового размера.

Любая технология (от *греч.* *techne* — искусство, мастерство, умение и *logos* — наука) — это совокупность методов получения, обработки, изменения состояния (свойств, формы) первоначального сырья в процессе производства конечной продукции.

Задача технологии — использование законов природы на благо человека. Существуют технологии машиностроения, технологии химической очистки воды, информационные технологии и т. д. Очевидно, что технологии в основе своей различаются природой исходного материала. Именно значительная разница между такими видами исходного материала, как металлические конструкции и информация, определяет и существенные различия способов их обработки и преобразования.

Что же такое нанотехнологии?

В Концепции развития нанотехнологии на период до 2010 г., одобренной Правительством Российской Федерации 18 ноября 2004 г., используются следующие термины:

- *нанотехнологии* — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;
- *наноматериалы* — материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении менее 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Поясним приведенные термины.

### Нанотехнология

Впервые термин «нанотехнология», по-видимому, предложил японский инженер Норико Танигучи (Norio Taniguchi). Он связывал этот термин с контролем материалов и инженерией на микрометровом уровне, а именно: высокоточная обработка поверхности с использованием сверхтонкого плавления, нанесения пленок, высокоэнергетических электронных, фотонных и ионных пучков. Однако современное содержание этого термина более точно впервые приведено в работах Эрика Дрекслера и соответствует атомным манипуляциям с помощью высокотехнологичной методологии.



*Эрик Дрекслер*

Существует довольно много определений нанотехнологий. Наиболее простое и широкое определение следующее: *нанотехнология* — это совокупность методов производства продуктов с заданной атомарной структурой путем манипулирования атомами и молекулами.

С помощью нанотехнологий получают частицы вещества и создают устройства,

размер которых составляет 1–100 нм. По рекомендации Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) за нанокритерий принимают величину 100 нм.

Система получает приставку «нано» не столько потому, что ее размер становится меньше 100 нм, а вследствие того, что ее свойства начинают зависеть от размера. Не менее важно для понимания специфических особенностей наночастиц и то обстоятельство, что по своим свойствам они отличаются как от объемной фазы вещества, так и от молекул или атомов, их составляющих.

Приведенное определение можно обобщить, а именно: *нанотехнологии* — это методы создания наноматериалов, наноустройств и способы оперирования с нанобъектами.

### Причины интереса к нанобъектам и наносистемам

Во-первых, методы нанотехнологии позволяют получить принципиально новые устройства и материалы с характеристиками, значительно превосходящими их современный уровень, что весьма важно для интенсивного развития многих областей техники, биотехнологии, медицины, охраны окружающей среды, обороны, строительного материаловедения и т. д.

Во-вторых, нанотехнология оказалась весьма широким междисциплинарным направлением, объединяющим специалистов в области физики, химии, материаловедения, биологии, медицины, технологии, наук о Земле, компьютерной техники, экономики, социологии и др.

В-третьих, решение проблем нанотехнологии выявило много пробелов как в фундаментальных, так и в технологических знаниях, что также способствовало концентрации внимания научно-инженерного сообщества в этом направлении.



*Этапы развития  
новых технологий (по академику  
Ю. Д. Третьякову)*

Нанотехнологии, в отличие от обычных технологий, характеризуются повышенной наукоемкостью и затратностью, поэтому путь от лаборатории к наноиндустрии, несомненно, более сложен, чем при промышленным созданием обычных продуктов.

### **НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Глобальная цель нанотехнологий* — создание самовоспроизводящихся наносистем и наноустройств, наделенных развитым компьютерным интеллектом, способных выполнять механические действия и проводить физико-химический анализ и модификацию окружающей среды.

В отечественном научном сообществе весьма распространено мнение, что строительное материаловедение отличается от многих других предметных направлений тем, что оно непосредственно не связано с современными научными нанодисциплинами, а также с созданием наноструктурированных материалов с использованием нанотехнологических подходов и наносистем.

Считается, что это является прерогативами направлений, относящихся к более фундаментальной научной сфере. Возможно, подобной точкой зрения можно объяснить тот факт, что в изложенных на страницах «Белой книги по нанотехнологиям» основных направлениях развития исследований в области наноиндустрии строительная отрасль не упомянута. Такое положение представляется весьма странным, если учесть что, например, II Интернациональный симпозиум по нанотехнологиям в строительстве (2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction), посвященный применению нанотехнологий в передовой строительной практике (Бильбао, 2005), проходил под девизом «From atoms to cities» («От атомов до городов»).

В то же время применение нанотехнологических подходов и наносистем при производстве строительных материалов — это новая стратегия, новый подход к выбору

сырья технологий, формированию структуры строительных композитов и, в конечном итоге, увеличение объема выпускаемых строительных материалов, расширение их ассортимента спектра, а также повышение конкурентоспособности как научно-информационной, так и материальной отечественной продукции на российском и мировом рынках.

Исходя из того, что нанотехнологии — это совокупность процессов, позволяющих создавать материалы, устройства и технические системы, функционирование которых определяется в первую очередь наноструктурой, т. е. фрагментами структуры размером от 1 до 100 нм, следует отметить, что *основная масса строительных материалов является наносистемной по своей сущности*. Так, формирование прочностных свойств, отражающих эксплуатационные характеристики композиционных материалов, например бетона, происходит именно на наноразмерном уровне при гидратационном (композиционные материалы) либо высокотемпературном (керамические материалы) минералобразовании и переходе вяжущих материалов в кристаллическое или твердое консолидированное состояние матрицы композита (см. цв. вкл., ил. 1).

Современные строительные композиционные материалы — это поликомпонентные и полидисперсные системы (см. цв. вкл., ил. 2), включающие в себя различные специализированные вяжущие, химические модифицирующие добавки, наноразмерные кремнезем и силикаты, другие ультрадисперсные разнофункциональные минеральные компоненты, специальные наполнители, микроволокна, полимеры и т. д.

Характерно, что строительное материаловедение, в отличие от других направлений науки о материалах, имеет дело, пожалуй, с объектами максимальной степени сложности.

Особенности объектов строительного материаловедения:

- существенная полифазность как минерально-сырьевой компоненты технологического цикла производства строительных материалов, так и финальной продукции — композиционных материалов;

- полидисперсность этих компонент во всем масштабном диапазоне (нано-, мезо-, микро- и макроуровни структурной организации вещества);
- существенный температурный диапазон синтеза и эксплуатации композиционных материалов;
- жесткие, задаваемые действующими нормативными документами, требования к физико-химическим и эксплуатационным характеристикам (тепло- и звукопроводность, влаго- и морозоустойчивость и др.).

С подобными системами и материалами не работает ни одно из развивающихся направлений в области наноматериалов и нанотехнологий. При создании строительных композитов нового поколения необходимо учитывать специфику работы с наносистемами в строительном материаловедении, которая заключается в фазовой и размерной гетерогенности сырьевого комплекса и композита в целом. То есть при синтезе композитов строительного назначения приходится оперировать полиминеральными, полидисперсными, полиструктурными и полигенетическими системами, которыми представлена минерально-сырьевая база промышленности строительных материалов, регулируя при этом механизмы фазообразования на каждом из структурных уровней не изолированно, а в системе в целом.

Из национальной нанотехнологической инициативы США: «Возникновение областей нанонауки и nanoинженерии — возможность работать на молекулярном уровне, атом к атому, для создания больших структур с принципиально новой молекулярной организацией, ведущая к беспрецедентному пониманию и контролю над фундаментальными строительными блоками для всех физических объектов.

Наномасштаб — это не только следующий шаг в миниатюризации. По сравнению с физическими свойствами и поведением отдельных молекул или объемных материалов материалы со структурными особенностями в области  $\approx 1-100$  нанометров показывают важные изменения, которые не могут быть объяснены традиционными моделями и теориями.

Развитие этих новых областей, видимо, приведет к изменению по существу всего научно-технического

многообразия — от вакцин, компьютеров, автомобильных шин и т. д.

Всего еще и не представишь.

Но это будет спроектировано и сделано».

Руководство США объявило национальную нанотехнологическую инициативу (ННИ) высшим приоритетом, считая, что это даст возможность существенно развить химические, физические, биологические, технические, медицинские и материаловедческие науки, будет способствовать междисциплинарной кооперации в науке и производстве.

Таким образом, по нашим представлениям, *наносистемами в строительном материаловедении* являются множества (совокупности) взаимосвязанных объектов наномасштабного уровня природного и техногенного (искусственного) происхождения, обладающие синергетическими свойствами и находящиеся в состоянии структурных и пространственно-временных взаимосвязей (в парагенетических отношениях) с системами других масштабных уровней.

Следовательно, нельзя рассматривать наноразмерные системы и их уникальные свойства изолированно от композита в целом. В этом, пожалуй, и заключается основная специфика наносистем в строительном материаловедении.

К изложенному следует добавить, что в последнее время стала фигурировать идея о нанопарадигме в строительном материаловедении. При этом следует признать, что в научном сообществе среди отечественных специалистов в области строительного материаловедения до сих пор не озвучена сколько-нибудь приемлемая формулировка этого фундаментального руководящего понятия.

Парадигма, являясь обобщенной руководящей идеей, на определенном этапе развития фундаментальных и прикладных исследований в конкретной предметной (или в междисциплинарной) области предполагает постановку сверхзадачи. А именно она до сих пор не сформулирована.

Логично поставить вопрос: что можно ожидать от применения нанотехнологий в отрасли строительной индустрии, чего нельзя было бы получить без их использования?

Если согласиться с простым определением: *нанотехнологии* — это технологии предоставления возможностей, позволяющие создавать материалы с улучшенными или абсолютно новыми свойствами, можно сформулировать сверхзадачу наносистемного строительного материаловедения следующим образом.

*Основная цель применения наносистем (или нанотехнологий) в строительном материаловедении* — разработка промышленно приемлемых технологических приемов создания строительных (конструкционных, функциональных, декоративных и т. д.) материалов с заданными свойствами, при условии сведения к теоретически достижимому минимуму техногенного прессинга на экосферу планеты.

В рамках такой сверхзадачи гораздо проще ставить проблемы меньшего уровня для их решения и промышленной реализации в конкретные, обозримые, временные периоды. Основные задачи (далеко не полный список) строительного материаловедения, решение которых возможно только с применением нанотехнологических подходов, приведены далее.

*Задачи направления «Наносистемы в строительном материаловедении»:*

1) разработка катализаторов для низкотемпературного синтеза клинкерных минералов и ускоренной гидратации стандартных цементов (применение механохимии и нанокатализаторов может способствовать коренному изменению современной технологии цементного производства, существенному уменьшению температуры клинкерообразования и даже реализации возможности холодного спекания клинкерных минералов в механохимических реакторах);

2) создание технологических основ золь-гель синтеза наноразмерных минеральных индивидов клинкерных компонент для создания произвольных (по минеральному составу) наноцементных вяжущих композиций;

3) повышение эффективности традиционных классов строительных материалов (цемент, бетон, асфальтобетон и др.) путем модифицирования структуры;

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)