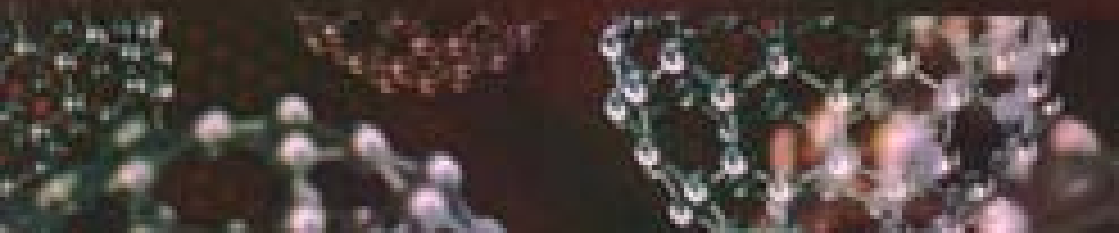


С. В. Мелешкин, А. А. Клишотин, Ю. Ф. Иванков,  
В. А. Литвинова, П. В. Космачев, О. Г. Волокитин

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ  
И ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Томск  
Издательство ТГАСУ  
2019

*Авторы: С.В. Мелентьев, А.А. Клопотов, Ю.Ф. Иванов,  
В.А. Литвинова, П.В. Космачев, О.Г. Волокитин*

УДК 539.211:539.27

ББК 22.3я7

**С56** **Современные технологии получения и особенности физико-механических и структурных свойств наноматериалов** [Текст] : учебное пособие / С.В. Мелентьев, А.А. Клопотов, Ю.Ф. Иванов, В.А. Литвинова, П.В. Космачев, О.Г. Волокитин. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2019. – 80 с. ISBN 978-5-93057-906-2

В данном учебном пособии рассмотрены такие понятия, как «наночастица» и «наноматериал», представлена информация о современных технологиях получения наночастиц и наноматериалов и основных направлениях современных нанотехнологий, а также приведены основные особенности физико-механических свойств наноматериалов.

Анализ и применение технологий получения и исследования наноматериалов, а также изучение их физико-механических свойств, является составной частью дисциплин «Наноматериалы и нанотехнологии», «Материаловедение», «Технология композиционных материалов» и предназначены для изучения студентами очной формы обучения.

**УДК 539.211:539.27**

**ББК 22.3я7**

**Рецензенты:**

**Ю.А. Абзаев**, докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Высшая математика» ТГАСУ;

**В.И. Верещагин**, докт. техн. наук, профессор НОЦ им. Кижнера НИ ТПУ.

ISBN 978-5-93057-906-2

© Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2019

© Мелентьев С.В., Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф., Литвинова В.А., Космачев П.В., Волокитин О.Г., 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно установленным приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации, переход к новым конструкционным, электротехническим и прочим материалам закономерно предполагает постановку и решение актуальных задач по проектированию и исследованию наноматериалов. Развитие нанотехнологий стимулирует возникновение перспективных технических идей и решений, создавая эффективные системы жизнедеятельности человека. Наноматериалы используются во всех без исключения отраслях промышленности. Прорывные технологии в строительной, машиностроительной, энергетической и прочих отраслях неразрывно связаны с развитием нанотехнологий.

Нанотехнологии подразумевают собой разработку и применение материалов, систем и аппаратов со структурой нанометрового масштаба. Нанотехнологии занимаются созданием из таких нанообъектов более крупных структур, обладающих новой надмолекулярной организацией. Такие наноструктуры, построенные «из первых принципов», с использованием атомно-молекулярных элементов, представляют собой мельчайшие объекты с новыми химическими и физическими свойствами, которые могут быть созданы искусственным путем.

В связи с этим возникли понятия нанонауки, нанотехнологии и наноинженерии: нанонаука занимается фундаментальными исследованиями свойств наноматериалов и явлений в нанометровом масштабе, нанотехнология и наноинженерия – поиском эффективных методов их получения и использования, соответственно.

Первая глава является вводной и в ней рассмотрены такие понятия, как «наночастица» и «наноматериал».

Во второй главе представлена обширная информация о современных технологиях получения наночастиц и наномате-

риалов и основных направлениях современных нанотехнологий, а также приведены основные особенности физико-механических свойств наноматериалов.

Третья глава представляет собой изложение особенностей физико-механических и структурных свойств наноматериалов, полученных модифицированием поверхностных слоев высокоэнергетическими воздействиями

В учебном пособии приведены контрольные вопросы закрепления материала и самопроверки. В Приложении содержится информация о терминах, используемых в нанотехнологии.

# 1. НАНОМАТЕРИАЛ И НАНОЧАСТИЦА

Наночастицы представляют собой мельчайшие, не более одной миллионной метра, структуры и при этом могут обладать хлопьевидной, игольчатой, сферической, гексагональной формой, иметь мелкокристаллическую или аморфную структуру. За счет того, что они состоят из  $10^6$  или еще меньшего количества атомов (как правило, такие материалы состоят из кристаллических зерен или являются монокристаллами), их свойства отличаются от свойств тех же атомов, связанных в объемном веществе.

Классификация наночастиц, в представлении различных учёных, представлена в табл. 1. Классификация наночастиц приведена в зависимости от диаметра и числа атомов.

На рис. 1.1 представлены несколько терминологических подходов к понятию наноматериалов, из которых подход, связанный с геометрическими размерами структуры наноматериалов, является самым простым и понятным. Отталкиваясь от геометрических размеров, считаем, что материалы с размером микроструктуры от 1 до 100 нм являются наноструктурными.

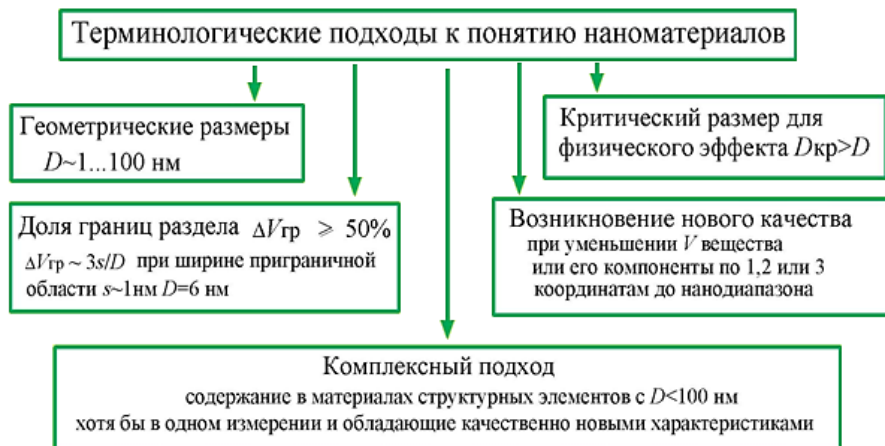


Рис. 1.1. Терминологические подходы к понятию наноматериалов

Согласно литературным данным [1], наноматериал – это дисперсный или массивный материал, содержащий структурные элементы (зёрна, кристаллиты, блоки, кластеры), геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм. Такие геометрические размеры позволяют наноматериалам обладать качественно новыми свойствами.

Таблица 1

**Классификации наночастиц**

У. Крейбиг							
Область I		Область II		Область III		Область IV	
Молекулярные кластеры		Кластеры твердого тела		Микрокристаллы		Частицы компактного вещества	
$N \leq 10$		$10^2 \leq N \leq 10^3$		$10^3 \leq N \leq 10^4$		$N > 10^5$	
Поверхность и объемы неразличимы		Соотношение поверхность/объем = 1		Соотношение поверхность/объем < 1		Соотношение поверхность/объем << 1	
К. Клабунде							
Химия		Наночастицы			Физика твердого тела		
Атом	$N = 10$	$N = 10^2$	$N = 10^3$	$N = 10^4$	$N = 10^6$	Компактное вещество	
Размер, нм		1	2 3	5 7	10	100	
Н. Такео							
Сверхмалые кластеры		Малые кластеры			Большие кластеры		
$2 < N \leq 20$		$20 < N \leq 500$			$500 < N \leq 10^7$		
$2R \leq 1,1$ нм		$1,1$ нм $\leq 2R \leq 3,3$ нм			$3,3$ нм $\leq 2R \leq 100$ нм		
Поверхностный и внутренний объемы неразделимы		$0,9 \geq N_3/N_v \geq 0,5$			$0,5 \geq N_3/N_v$		
Г.Б. Сергеев, В.Е. Боченков							
Химия атомов		Нанохимия				Химия твердого тела	
		Число атомов в частице					
Единичные атомы		10	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^6$	Компактное вещество
Диаметр, нм		1	2 3 5 7	10	> 100		

## 2. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ

Основываясь на анализе существующих методов синтеза наночастиц, можно сделать вывод, что все они разделяются на две большие группы, имеющие свои достоинства и недостатки:

1. В первую группу входят методы, которые позволяют получать и исследовать наночастицы. Однако использование данных методов затрудняет создание новых наноматериалов;

2. Во вторую группу входят методы, которые позволяют разрабатывать наноматериалы на основе синтезированных наночастиц.

### 2.1. Газовый синтез

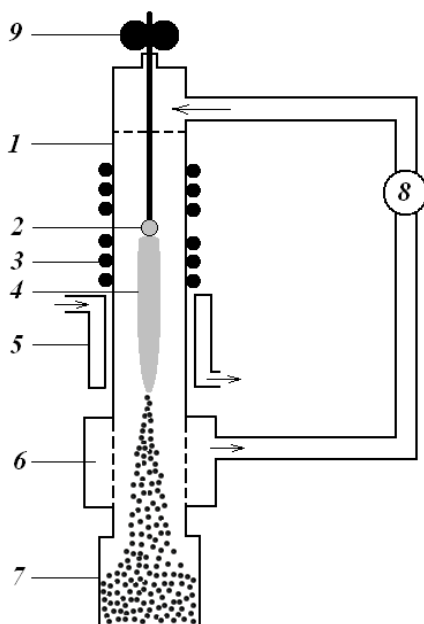
Газовый синтез представляет собой перспективный метод получения наночастиц в результате испарения металла при контролируемой температуре в атмосфере инертного газа низкого давления с последующей конденсацией пара вблизи или на холодной поверхности [2].

Например, пары металла пропускают через ячейку с гелием под давлением  $\sim 1000\text{--}1500$  Па, затем выводят в вакуумную камеру ( $\sim 10^{-5}$  Па), где масса кластера устанавливается по времени пролета определенного расстояния.

На рис. 2.1 приведена схема получения высокодисперсных металлических порошков в левитационно-струйном генераторе.

Таким способом получали кластеры сурьмы, висмута и свинца, содержащие 650, 270 и 400 атомов соответственно; температура газообразного гелия в случае паров Sb и Bi составляла 80 К, а в случае паров Pb – 280 К. Нанокристаллические порошки оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  получали испарением оксидных мишеней в атмосфере гелия, магнетронным распылением циркония в смеси аргона и кислорода, контролируемым окислением нанокристаллов иттрия.





*Рис. 2.1.* Схема получения высокодисперсных металлических порошков в левитационно-струйном генераторе:

1 – испаритель; 2 – капля; 3 – индуктор; 4 – аэрозоль; 5 – холодильник; 6 – фильтр; 7 – контейнер; 8 – насос; 9 – механизм подачи проволоки в масс-спектрометре

## 2.2. Плазмохимический синтез

Получение наночастиц плазмохимическим синтезом осуществляется за счет увеличения скорости охлаждения потока плазмы, в котором происходит конденсация из газовой фазы [3]. При этом уменьшается размер образующихся наночастиц от 10 до 200 нм.

При плазмохимическом синтезе используется низкотемпературная (4000–8000 К) азотная, аммиачная, углеводородная, аргоновая плазма дугового, тлеющего, высоко- или сверхвысо-

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Наноматериал и наночастица</b> .....	5
<b>2. Технологии получения наночастиц</b> .....	7
2.1. Газовый синтез .....	7
2.2. Плазмохимический синтез .....	8
2.3. Методы химической конденсации .....	9
2.3.1. Плазмохимический метод .....	9
2.3.2. Переработка газообразных соединений в плазме .....	10
2.3.3. Переработка капельно-жидкого сырья .....	12
2.3.4. Переработка твердых частиц, взвешенных в потоке плазмы .....	13
2.4. Осаждение из коллоидных растворов .....	15
2.5. Термическое разложение и восстановление .....	16
2.6. Механосинтез .....	16
2.7. Детонационный синтез и электровзрыв .....	18
2.8. Упорядочение нестехиометрических соединений .....	20
2.9. Получение высокодисперсных оксидов в жидких металлах .....	21
2.10. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез .....	22
2.11. Криохимический синтез .....	23
2.12. Плазменно-дуговой метод .....	25
2.13. Электровзрывная установка ЭВУ 60/10 .....	29
2.14. Импульсные электронно-пучковые установки .....	32
<b>3. Особенности физико-механических и структурных свойств наноматериалов, полученных модифицированием поверхностных слоев высокоэнергетическими воздействиями</b> .....	49
3.1. Фазовые изменения при плазменном воздействии на кремнеземистое сырье .....	49
3.2. Исследование структурно-морфологических характеристик нанопорошка диоксида кремния, полученного плазменно-дуговым методом .....	51
3.3. Наноструктурные состояния на поверхности сплавов после облучения сильноточными электронными пучками .....	54
Контрольные вопросы .....	71
<b>Заключение</b> .....	73
<b>Список литературы</b> .....	74
<b>Приложение. Словарь терминов и определений</b> .....	77

*Учебное издание*

*Мелентьев Сергей Владимирович  
Клопотов Анатолий Анатольевич  
Иванов Юрий Федорович  
Литвинова Виктория Александровна  
Космачев Павел Владимирович  
Волокитин Олег Геннадьевич*

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ  
И ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Редактор Г.Г. Семухина  
Технический редактор Н.В. Удлер

Подписано в печать 19.12.2019.  
Формат 60×84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,21. Тираж 100 экз. Зак. № 230.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.  
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.