



Г. М. ВОЛКОГОН, Ж. В. ЕРЕМЕЕВА, Д. А. ЛЕДОВСКОЙ

ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ



«Инфра-Инженерия»

Г. М. Волкогон, Ж. В. Еремеева, Д. А. Ледовской

**ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2022

УДК 621.762
ББК 34.39
В67

Рецензент:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения
и технологии обработки материалов ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский университет)»

Шлятин Сергей Дмитриевич

Волкогон, Г. М.

В67 Прогрессивные методы синтеза нанокристаллических порошков :
монография / Г. М. Волкогон, Ж. В. Еремеева, Д. А. Ледовской. – Москва ;
Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 124 с. : ил.
ISBN 978-5-9729-0917-9

Представлены современные процессы получения нанопорошков. Рассмотрен метод химического осаждения, газофазный метод с конденсацией, метод молекулярных пучков, растворные методы. Описано технологическое оборудование, которое используется для производства нанопорошков.

Для инженерно-технических работников промышленного производства, а также научных сотрудников, технологов и студентов, интересующихся вопросами металлургии и материаловедения.

УДК 621.762
ББК 34.39

ISBN 978-5-9729-0917-9

© Волкогон Г. М., Еремеева Ж. В., Ледовской Д. А., 2022
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022
© Оформлен. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. ДЕЗИНТЕГРАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ	10
1. Измельчение – основной процесс дезинтеграции получения наноразмерных порошков	10
2. Электроэрозионное диспергирование металлов в жидкостях.....	14
3. Применение ультразвука при производстве наноматериалов.....	15
4. Механический синтез нанопорошков и композитов	17
5. Детонационный метод	24
ГЛАВА 2. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ	25
1. Растворные методы	25
1.1. Методы, основанные на различных вариантах смешения исходных компонентов.....	25
1.1.1. Методы химического осаждения (соосаждения).....	25
1.1.1.1. Химико-металлургический – прогрессивный метод получения нанокристаллических порошков.....	27
1.1.1.2. Применение методов химических процессов для синтеза нанокристаллических порошков.....	35
1.1.1.2.1. Газофазный метод с конденсацией.....	36
1.1.1.2.2. Конденсационный метод с ускорителем	39
1.1.1.3. Технология осаждения из растворов.....	41
1.1.1.3.1. Метод осаждения с использованием прекурсоров	42
1.1.1.3.2. Микроэмульсионный метод.....	42
1.1.1.3.3. Метод жидкофазного восстановления из растворов	43
1.1.1.3.4. Метод газофазных реакций	43
1.1.1.3.5. Метод разложения нестабильных соединений	44
1.1.1.3.6. Метод водородного восстановления соединений.....	46
1.1.1.3.7. Синтез нанокристаллических оксидных материалов с использованием сверхкритических флюидов.....	46
1.1.2. Золь-гель метод.....	48
1.1.3. Гидротермальный метод.....	54
1.1.4. Метод комплексонатной гомогенизации.....	61
1.1.5. Метод замены растворителя.....	62
1.1.6. Синтез под действием микроволнового излучения.....	63

1.1.7. Метод быстрого термического разложения прекурсоров в растворе (RTDS)	65
1.2. Методы, основанные на различных вариантах удаления растворителя	66
1.2.1. Распылительная сушка.....	66
1.2.2. Метод быстрого расширения сверхкритических флюидных растворов (RESS).....	68
1.2.3. Криохимический метод	70
1.3. Метод Печини.....	73
1.3.1. Получение методом Печини нанопорошков иттрий-алюминиевого граната.....	74
1.3.2. Формирование наночастиц состава $YFeO_3-CaZr(Ti)O_3$ со структурой «ядро-оболочка» последовательным осаждением и $YFeO_3@C$ методом Печини.....	75
2. Конденсация из газовой фазы	77
2.1. Методы химической конденсации.....	78
2.1.1. Плазмохимический метод	78
2.1.1.1. Метод переработки газообразных соединений.....	78
2.1.1.2. Метод переработки капельножидкого сырья.....	79
2.1.1.3. Процесс переработки твердых частиц, взвешенных в потоке плазмы.....	80
2.1.2. Метод гидролиза в пламени.....	89
2.1.3. Метод импульсного лазерного испарения.....	89
2.2. Методы физической конденсации.....	90
2.2.1. Метод молекулярных пучков.....	90
2.2.2. Аэрозольный метод.....	92
2.2.3. Метод криоконденсации.....	94
2.2.4. Электровзрыв металлических проволок (ЭВП).....	95
2.2.5. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).....	99
ГЛАВА 3. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОВОЛОКОН.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
ЛИТЕРАТУРА	111