



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)»

Шляпин 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
© Оформление. 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 комплексоной 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 |