

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Институт технической акустики

М. М. Кулак  
Б. Б. Хина

---

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ  
ПРИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМся  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ  
СИНТЕЗЕ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ  
И ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЯХ**

Минск  
«Беларуская навука»  
2023

Кулак, М. М. Структурообразование при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе в ультразвуковом и центробежном полях : [монография] / М. М. Кулак, Б. Б. Хина ; Национальная академия наук Беларуси, Институт технической акустики. — Минск : Беларуская навука, 2023. — 233, [1] с.

УДК 536.46:[534.29+621.74.042]

ББК 22

**Чит. зал №1 — 1 экз.**

В монографии рассматриваются эффекты, возникающие в веществе под воздействием ультразвуковых колебаний. Сформулированы требования к ультразвуковым колебательным системам. Приведен обзор работ по влиянию ультразвуковых колебаний на процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Подробно изложены вопросы влияния ультразвуковых колебаний на процесс горения систем титан - углерод - металлическая связка, титан - кремний, титан - бор. Описан механизм влияния ультразвука на скорость и максимальную температуру горения, на фазовый состав, электросопротивление и микроструктуру продуктов синтеза. Рассмотрены проблемы получения градиентных материалов методом СВС с наложением центробежного воздействия.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, научных и инженерно-технических работников, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, занимающихся исследованием, разработкой и получением новых материалов с уникальными свойствами методом СВС с применением ультразвуковых колебаний высокой интенсивности и центробежных сил.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	6
<b>Глава 1. Исследования влияния ультразвуковых колебаний на процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза</b> .....	11
1.1. Процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: история и современные исследования .....	11
1.2. Воздействие ультразвуковых колебаний на вещество. Нелинейные эффекты, возникающие в веществе под воздействием ультразвуковых колебаний. Требования к ультразвуковым колебательным системам .....	25
1.3. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза .....	28
Краткие выводы к главе 1 .....	36
<b>Глава 2. Экспериментальное оборудование, материалы и методики проведения исследований</b> .....	37
2.1. Экспериментальное оборудование. Методика проведения процесса СВС при физических воздействиях .....	37
2.2. Используемые материалы и методика приготовления образцов .....	41
2.3. Методы измерения скорости и максимальной температуры горения .....	42
2.4. Методика рентгеноструктурного анализа продуктов СВС .....	44
2.5. Методика металлографических исследований, измерения электросопротивления и калориметрического анализа образцов. Исследование топологии поверхности .....	45
2.6. Методика микроструктурного анализа многофазных композиционных материалов, полученных методом СВС .....	47
Краткие выводы к главе 2 .....	52
<b>Глава 3. Изучение влияния ультразвуковых колебаний на тепловые характеристики волны СВС, микроструктуру и фазовый состав продукта в многокомпонентных системах на основе карбидов</b> .....	53
3.1. Механизм разгрузки ультразвуковой колебательной системы от действия статической силы поджатия .....	53

3.2. Особенности СВС-процессов. Представления о механизме гетерогенного взаимодействия в волне СВС .....	58
3.3. Влияние ультразвука на исходную шихту и СВС-процесс.....	60
3.4. Фазовый состав продукта СВС .....	64
3.5. Микроструктура СВС-продуктов .....	68
Краткие выводы к главе 3 .....	79
<b>Глава 4. Изучение влияния ультразвуковых колебаний на тепловые характеристики волны СВС, микроструктуру и фазовый состав продукта в системах на основе силицидов. Термодинамическое моделирование.....</b>	<b>81</b>
4.1. Роль термодинамического моделирования при разработке новых материалов и методов их синтеза .....	81
4.2. Обоснование методики термодинамического моделирования. Результаты термодинамического моделирования и их обсуждение.....	82
4.3. Взаимодействие ультразвуковых колебаний с образцами. Влияние ультразвука на характеристики горения в системе Ti-Si.....	88
4.4. Фазовый состав и микроструктура СВС-продуктов .....	95
4.5. Качественный и количественный рентгеноструктурный анализ.....	96
4.5.1. Анализ параметров кристаллических структур по рентгеновским данным.....	98
4.6. Влияние отжига на продукты синтеза.....	101
4.7. Микроструктура СВС-продуктов в системе Ti-Si .....	104
4.7.1. Микроструктура состава Ti-0,6Si .....	105
4.7.2. Микроструктура состава Ti-0,5Si .....	108
4.7.3. Микроструктура состава Ti-0,8Si .....	112
4.7.4. Микроструктура состава Ti-0,4Si .....	117
Краткие выводы к главе 4 .....	123
<b>Глава 5. Изучение влияния ультразвуковых колебаний на тепловые характеристики волны СВС, микроструктуру и фазовый состав продукта в системах на основе боридов. Термодинамическое моделирование.....</b>	<b>125</b>
5.1. Термодинамическое моделирование СВС в системе Ti-B .....	125
5.2. Экспериментальное исследование температуры и скорости горения в системе Ti-B .....	130
5.3. Рентгеноструктурный анализ и исследование микроструктуры СВС-продуктов .....	132
5.3.1. Фазовый состав продуктов СВС в системе Ti-B .....	132
5.3.2. Микроструктура СВС-продуктов в системе Ti-B.....	141
5.4. Термодинамический расчет адиабатической температуры СВС в системе Ti-B с использованием CALPHAD-подхода .....	153
5.5. Термодинамические функции фаз .....	154
5.5.1. Расплав.....	154
5.5.2. Соединение TiB <sub>2</sub> .....	156

5.5.3. Соединение TiB.....	159
5.5.4. Соединение Ti <sub>3</sub> B <sub>4</sub> .....	160
5.6. Расчет адиабатической температуры СВС: модель, результаты и обсуждение.....	160
5.6.1. Предварительные расчеты .....	160
5.6.2. Модель для определения адиабатической температуры СВС .....	162
5.7. Механизм влияния ультразвука на процессы горения и структурообразования при СВС в системах на основе титана .....	167
5.7.1. Влияние ультразвука на кинетику взаимодействия в волне СВС .....	172
Краткие выводы к главе 5 .....	176
<b>Глава 6. Получение материалов с градиентным распределением упрочняющих частиц методом СВС-литья.....</b>	<b>178</b>
6.1. Конвективный теплоперенос под действием центробежных сил в процессе СВС.....	180
6.2. Синтез износостойких материалов на основе железа.....	193
6.2.1. Анализ влияния центробежных сил на распределение упрочняющих частиц .....	193
6.2.2. Металлографические исследования синтезированных образцов .....	196
6.3. Влияние центробежной силы на распределение упрочняющих твердых фаз в матрице композиционного материала .....	207
6.4. Исследование механических свойств синтезированных материалов. Испытания на износостойкость .....	211
Краткие выводы к главе 6 .....	214
<b>Заключение.....</b>	<b>216</b>
<b>Список источников.....</b>	<b>218</b>