

А.П. АМОСОВ  
И.П. БОРОВИНСКАЯ  
А.Г. МЕРЖАНОВ

# ПОРОШКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ

Под научной редакцией  
академика РАН, д-ра техн. наук, проф. *В.Н. Анциферова*

*Допущено Учебно-методическим объединением по образованию  
в области металлургии  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Металлургия»*



Москва  
2007

УДК 621.762+621.793+666.7

Рецензенты:

кафедра "Порошковая металлургия и функциональные покрытия"  
Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета);  
д-р техн. наук, проф. **И.А. Дроздов**, Самарский государственный аэрокосмический ун-т.

**Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г.**

**Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов:** Учеб. пособ. / Под научной редакцией В.Н. Анциферова. – М.: Машиностроение–1, 2007. – 567 с.

Учебное пособие посвящено новому технологическому процессу получения материалов, основанному на самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) твердых химических соединений (карбидов, нитридов, боридов, оксидов и др.) при проведении экзотермической химической реакции взаимодействия исходных реагентов в форме горения. Главный принцип "не греть исходные порошки, а сжигать их", отличающий технологию СВС от технологии традиционной порошковой металлургии, обеспечил большие преимущества и оказался очень плодотворным: создано около 100 разновидностей технологии СВС, позволивших синтезировать свыше 1000 веществ и материалов, в том числе и наноматериалов, наносить покрытия, сваривать детали.

В пособии рассматривается теория процессов СВС: химические реакции, термодинамика, закономерности и механизмы горения и образования продуктов СВС. Детально излагаются конкретные технологии СВС шести типов: реакторной порошковой, спекания, силового компактирования, литья и наплавки, сварки, газотранспортных покрытий. Приводится оборудование, как специализированное, в котором происходит процесс СВС, так и вспомогательное. Описываются свойства СВС-материалов: порошков; пористых, спеченных керамических, компактированных твердосплавных, литых; наплавов и покрытий. Приводится 28 видов продукции СВС, уже нашедшей использование в производстве или рекламируемой для такого использования. Рассматриваются вопросы обеспечения СВС-производства: техника безопасности, технический контроль, химический анализ продукции, стандартизация и экономическая эффективность.

Учебное пособие рассчитано на студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 (651300) – Металлургия, а также на широкий круг специалистов: исследователей, инженеров и производителей в области порошковой металлургии, технической керамики, огнеупоров, ферросплавов и лигатур, композиционных материалов, наплавов и покрытий, сварки, материалов для электротехники и электроники, химической промышленности.

Табл. 100. Ил. 142. Библиогр.: 19 назв.

ISBN 978-5-94275-360-3

© А.П. Амосов,  
И.П. Боровинская,  
А.Г. Мержанов, 2007  
© Машиностроение–1, 2007

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие научного редактора.....	8
Введение в самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) 12	
<b>Глава 1. ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ СВС</b> .....	19
1.1. Реакции и продукты СВС .....	19
1.1.1. Реакции СВС.....	19
1.1.1.1. СВС из элементов.....	19
1.1.1.2. Химические соединения в качестве реагентов .....	23
1.1.2. Продукты СВС.....	27
1.2. Температура процессов СВС и термодинамические расчеты.....	29
1.2.1. Теплота и температура горения.....	29
1.2.2. Термодинамика горения.....	30
1.2.2.1. Учет фазовых переходов .....	31
1.2.2.2. Учет диссоциации продуктов горения.....	33
1.2.2.3. Расчет состава продуктов горения .....	35
1.3. Закономерности горения СВС-систем .....	38
1.3.1. Методика исследования.....	38
1.3.2. Зажигание СВС-систем.....	40
1.3.3. Закономерности стационарного распространения горения.....	41
1.3.4. Режимы нестационарного горения.....	45
1.3.5. Структура волны горения.....	46
1.4. Механизм процессов СВС.....	53
1.4.1. Классификация процессов СВС .....	53
1.4.2. Идеальный твердофазный СВС .....	54
1.4.3. Реальный твердофазный СВС.....	61
1.4.4. СВС с промежуточным расплавленным слоем.....	64
1.4.5. Жидкофазный СВС .....	69
1.4.6. Фильтрационный СВС.....	75
1.4.7. Образование фаз и структура продуктов.....	83
1.4.7.1. Макроструктура продуктов СВС.....	83
1.4.7.2. Формирование микроструктуры.....	87
1.4.7.3. Формирование кристаллической структуры .....	94
1.5. СВС в режиме теплового взрыва.....	96
1.5.1. Закономерности теплового взрыва.....	97
1.5.2. Синтез при тепловом взрыве .....	103

<b>Глава 2. ТИПЫ И РАЗНОВИДНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВС</b> .....	109
2.1. Технологические типы СВС .....	109
2.2. СВС-технология порошков .....	112
2.2.1. Технология получения карбида титана из элементов .....	114
2.2.1.1. Приготовление исходной шихты .....	114
2.2.1.2. Проведение синтеза .....	117
2.2.1.3. Влияние характеристик исходных порошков .....	118
2.2.1.4. Влияние технологических условий сжигания .....	121
2.2.1.5. Оптимальные условия синтеза карбида титана .....	127
2.2.1.6. Переработка продукта синтеза в порошок .....	128
2.2.2. Технология получения других тугоплавких соединений из элементов .....	129
2.2.2.1. Карбиды, бориды, силициды .....	129
2.2.2.2. Халькогениды .....	130
2.2.2.3. Нитриды .....	131
2.2.2.4. Гидриды .....	132
2.2.2.5. Сложные соединения .....	133
2.2.3. Технология с магнийтермическим восстановлением из оксидов .....	134
2.2.4. Фильтрационная технология .....	137
2.2.5. Азидная технология .....	142
2.2.6. Технология порошков сложных оксидов .....	147
2.2.6.1. СВС из смеси простых оксидов .....	147
2.2.6.2. СВС из смеси оксидов с металлами .....	150
2.2.6.3. СВС с участием газообразного кислорода .....	153
2.2.7. Технология порошков интерметаллидов .....	165
2.2.8. Технология субмикронных и наноразмерных порошков .....	174
2.3. СВС-спекание .....	191
2.3.1. Технология пористых изделий .....	191
2.3.2. Технология огнеупорных материалов .....	203
2.3.3. Газостатическая технология керамических изделий .....	207
2.4. Силовое СВС-компактирование .....	218
2.4.1. Закономерности процесса СВС-прессования .....	220
2.4.1.1. Схема СВС-прессования .....	220
2.4.1.2. Уплотнение синтезируемого материала .....	223
2.4.1.3. Теплообмен при СВС-прессовании .....	232
2.4.1.4. Влияние сыпучей оболочки .....	234
2.4.2. Технология СВС-прессования .....	238

2.4.3. Технология СВС-экструзии .....	243
2.5. СВС-металлургия .....	250
2.5.1. Закономерности процесса жидкофазного СВС.....	251
2.5.2. Технология литых СВС-материалов .....	258
2.5.3. Технология СВС-наплавки.....	261
2.5.4. Центробежная СВС-технология .....	264
2.6. СВС-сварка .....	265
2.6.1. Закономерности процесса СВС-сварки .....	267
2.6.2. Технология СВС-сварки.....	271
2.7. Газотранспортная СВС-технология .....	276
2.7.1. Закономерности процесса газотранспортного СВС .....	277
2.7.2. Технология газотранспортных СВС-покрытий .....	284
<b>Глава 3. ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ СВС.....</b>	<b>289</b>
3.1. Универсальный СВС-реактор .....	290
3.2. Температуры и напряжения в реакторе СВС.....	296
3.3. Полупромышленная СВС-установка получения карбида титана.....	304
3.4. Реакторы фильтрационной технологии СВС .....	307
3.5. Реакторы азидной технологии СВС .....	309
3.6. Реактор СВС сложных оксидов .....	318
3.7. Формы для открытого СВС-спекания.....	319
3.8. СВС-газостат.....	323
3.9. Установки СВС-прессования .....	325
3.10. Центробежные СВС-установки .....	332
3.11. Вспомогательное оборудование .....	336
3.11.1. Сушилki .....	336
3.11.2. Смесители .....	338
3.11.3. Пресс-форма для брикетирования шихты.....	342
3.11.4. Дробильно-размольное оборудование .....	343
3.11.5. Классифицирующее оборудование .....	348
3.12. Технологические линии и участки СВС .....	352
<b>Глава 4. МАТЕРИАЛЫ СВС, ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ .....</b>	<b>362</b>
4.1. СВС-порошки .....	364
4.2. Пористые материалы и изделия.....	379
4.3. Спеченные керамические материалы и изделия.....	386
4.3.1. Оксидные огнеупоры.....	387
4.3.2. Газостатная нитридная керамика .....	389
4.3.3. Алмазосодержащая интерметаллидная керамика .....	394

4.4. Компактированные твердосплавные материалы и изделия.....	395
4.4.1. Однородные твердые сплавы группы СТИМ.....	396
4.4.2. Функционально-градиентные СВС-материалы .....	408
4.4.3. Электроды, получаемые методом СВС-экструзии .....	412
4.5. Литые материалы, изделия и наплавки .....	416
4.5.1. Слитки тугоплавких неорганических материалов и порошки из них.....	416
4.5.2. Литые СВС-изделия .....	425
4.5.3. Покрытия, полученные СВС-наплавкой.....	430
4.6. Газотранспортные СВС-покрытия .....	433
<b>Глава 5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ</b>	
<b>И ТЕХНОЛОГИЙ СВС.....</b>	<b>434</b>
5.1. Абразивные пасты на основе порошка TiC .....	439
5.2. Абразивный порошок TiC марки СВС-ФГ .....	443
5.3. Порошки нитридов кремния и алюминия.....	444
5.4. Борсодержащие порошки .....	445
5.5. Порошки сегнетоэлектриков .....	447
5.6. Порошки ферритов.....	448
5.7. Порошки высокотемпературных сверхпроводников .....	450
5.8. Порошки твердых смазок .....	452
5.9. Порошки гидридов .....	453
5.10. Азотированные ферросплавы (слитки, порошки).....	454
5.11. Нитрид хрома.....	457
5.12. Сплавы с памятью формы .....	459
5.13. Порошки интерметаллидов для нанесения защитных покрытий.....	460
5.14. Порошки литых тугоплавких соединений для нанесения защитных покрытий .....	460
5.15. Высокотемпературные электронагреватели из порошка MoSi <sub>2</sub> .....	461
5.16. Керамические и интерметаллидные фильтры .....	462
5.17. Оксидные огнеупорные материалы.....	469
5.18. Изделия из термостойкой нитридной керамики .....	472
5.19. Инструменты из безвольфрамовых твердых сплавов марки СТИМ ...	476
5.20. Ударопрочные градиентные твердосплавные пластины СИГМА.....	479
5.21. Мишени для магнетронного и ионно-плазменного напыления .....	480
5.22. Электроды для электроискрового легирования .....	482
5.23. Электроды для наплавки и сварки.....	485
5.24. Литые металлические трубы с корундовой футеровкой и керметные .....	485
5.25. Газотранспортные износостойкие покрытия.....	468

5.26. Катализаторы .....	487
5.27. Лигатуры алюминиевых сплавов .....	489
5.28. Сварочные стержни.....	491
<b>Глава 6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВС .....</b>	<b>492</b>
6.1. Техника безопасности в СВС-производстве .....	492
6.2. Технический контроль в СВС-производстве .....	500
6.3. Особенности химического анализа СВС-материалов .....	506
6.3.1. Разложение СВС-материалов.....	507
6.3.2. Определение содержания металлических составляющих СВС-соединений .....	510
6.3.3. Определение общего содержания неметаллических составляющих СВС-продуктов.....	512
6.3.4. Определение несвязанных («свободных») элементов .....	515
6.4. Стандартизация разработок СВС .....	518
6.4.1. Стандартизация процессов и продукции СВС.....	519
6.4.1.1. Технический регламент .....	520
6.4.1.2. Технические условия .....	522
6.4.1.3. Методики испытания продукции .....	525
6.4.1.4. Технические требования к оборудованию .....	528
6.4.1.5. Типовые технологические процессы (ТТП).....	529
6.4.2. Разработка справочной литературы и баз данных по СВС .....	532
6.4.3. Оценка технического уровня и эффективности продукции СВС .....	537
6.4.4. Сертификация продукции СВС .....	539
6.5. Экономическая эффективность материалов и технологий СВС.....	542
Заключение .....	553
Библиографический список .....	564
Разработчики технологии СВС в России.....	566