


О. Ф. ШЛЁНСКИЙ, И. В. МАКЛАШОВА, К. В. ХИЩЕНКО

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ



Инновационное
машиностроение

О.Ф. ШЛЁНСКИЙ, И.В. МАКЛАШОВА, К.В. ХИЩЕНКО

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

Москва
Инновационное машиностроение
2017

УДК 536.46+662.42

ББК 24.54:35.63

Ш 68

Рецензенты: *В.С. Зарубин*, доктор техн. наук, проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана;
Л.Г. Гвоздева, доктор техн. наук, проф., ст. научный сотр.
Объединенного института высоких температур РАН

Шлёнский О.Ф., Маклашова И.В., Хищенко К.В.

Ш 68 Горение и детонация материалов. — М.: Инновационное машиностроение, 2017. — 240 с., ил.

ISBN 978-5-9909601-7-6

Процессы горения и взрыва впервые рассматриваются как результат перегрева и последующих мезофазовых и механоактивационных превращений. При взрыве волна перегрева и скачка напряжений, движущихся с околозвуковой или сверхзвуковой скоростью, вызывают ударную волну в продуктах горения.

Для инженеров и научных работников, специализирующихся в области физики и теории горения и детонации.

УДК 536.46, 662.42

ББК 24.54:35.63

ISBN 978-5-9909601-7-6

© Авторы, 2017
© ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2017

Оглавление

Предисловие	3
Основные обозначения	5
Основные сокращения	7
Глава первая. Характеристики фазовых и хемофазовых превращений.....	8
1.1. Термодинамические характеристики	8
1.1.1. Граница устойчивости фазового состояния	8
1.1.2. Полимерные системы	12
1.1.3. Вещества кристаллического строения	16
1.1.4. Условия устойчивости тепловых колебаний	17
1.2. Кинетические характеристики парообразования	21
1.2.1. Испарение, сублимация и взрывная возгонка	21
1.2.2. Парообразование в пузырьках	21
1.3. Режимы пузырькового и нуклеационного кипения. Предспинодальный взрыв	22
1.4. Кинетика нуклеационного взрывного вскипания и возгонки перегретых КС	24
1.5. Эффект механоактивации вскипания и возгонки	26
1.6. Понятие достижимого перегрева	27
1.7. Кипение с разложением и диссоциативная сублимация термонеустойчивых КС	29
1.8. Кинетика хемофазовых превращений	32
1.8.1. Процессы при низких температурах	32
1.8.2. Процессы при высоких температурах ($T > T_{\phi}$)	32
1.9. Достижимый перегрев энергоемких соединений	33
1.10. Уравнения спинодали и небольших перегревов	36
1.11. Связь законов испарения и горения	38
1.12. Кипение с разложением и диссоциативная сублимация на поверхности горения	39
Глава вторая. Методы и результаты экспериментальных исследований ...	40
2.1. Регистрация тепловой волны горения	40
2.2. Специальные методы термического анализа	45

2.2.1. Метод «теплового зонда»	45
2.2.2. Метод контактного термического анализа	49
2.2.3. Метод пиролиза «отпечатка».	50
2.2.4. Филаментный метод	57
2.2.5. Результаты испытаний	57
2.3. Микрокинетика термодеструкции полимеров	63
2.3.1. Пенополиуретан	63
2.3.2. Бутадиеновый каучук	68
2.3.3. Погрешности метода флеш-пиролиза	69
2.4. Метод линейного пиролиза	71
2.5. Влияние темпа нагрева на диапазон температур термолиза КС.	74
2.6. Условие локализации хемофазовых превращений на поверхности горения	76
2.7. Два режима испарения и термолиза	80
2.7.1. Режимы испарения	80
2.7.2. Режимы термолиза с испарением	82
2.8. Аналитическое описание опытных данных.	83
2.8.1. Кинетика испарения и парообразования в объеме	83
2.8.2. Кинетика термолиза с объемным испарением	84
2.9. Тепловые эффекты реакций термолиза и ХФП	87
Выводы	89

Глава третья. Математическое моделирование режимов горения 90

3.1. Терморазложение летучих энергоемких систем	90
3.1.1. Эффект объемного испарения	90
3.1.2. Кинетика термолиза летучих ВВ	91
3.1.3. Кинетика тепловыделения.	93
3.1.4. «Мягкий» тепловой взрыв летучих систем.	94
3.1.5. Вспышка с хлопком.	95
3.2. Уравнения тепло- и массопереноса	96
3.3. Температурный профиль Михельсона	97
3.4. Режим медленного горения	99
3.4.1. Уравнение теплового баланса.	99
3.4.2. Кинетическое уравнение	100
3.4.3. Движение фронта убыли массы	101
3.4.4. Зависимость скорости убыли массы от температуры	102
3.5. Решение системы уравнений	103
3.5.1. Определение параметров.	103
3.5.2. Условия устойчивости горения	106
3.6. Движение тепловой волны перегрева	108
3.6.1. Уравнение теплового баланса.	108
3.6.2. Кинетическое уравнение	109
3.8. Движение фронта горения от очага воспламенения	110
3.9. Моделирование вспышки с хлопком	111
3.10. Сравнение результатов испытаний и расчетов	114

<i>Глава четвертая. Самороспространяющийся высокотемпературный синтез</i>	115
4.1. Основные понятия	115
4.2. Скорость тепловой (температурной) волны	115
4.3. Условие устойчивости горения	119
<i>Глава пятая. Нестационарные режимы горения</i>	122
5.1. Основные сведения	122
5.2. Связь температур вспышки и достигнутого перегрева	123
5.3. Возбуждение вспышки ЭМ ударом	123
5.4. Кинетика механоактивационных процессов	127
5.5. Механика ударного нагружения жидких ВВ	130
5.7. Условие вспышки в результате механоактивации	132
5.8. Ударное инициирование горения твердых ЭМ	136
5.8.1. Возбуждение вспышки ЭМ при ударе копра	136
5.8.2. Обработка результатов копровых испытаний	140
5.9. Условия появления очага воспламенения	143
5.10. Определение размера ОВ	145
5.11. Влияние вибраций на распад ЭМ	145
5.12. Инициирование вспышки ЭМ статическим сжатием на прессе и поверхностным трением	148
5.13. Опытное определение предельной и критической деформаций	149
5.14. Критическая деформация первичных (инициирующих) и вторичных ВВ	150
<i>Глава шестая. Высокоскоростной режим горения энергоёмких материалов (субдетонация)</i>	152
6.1. Математическая модель	152
6.2. Экспериментальные данные	155
6.3. Численное решение уравнения теплопроводности	157
6.4. Возникновение механических напряжений и хлопка	164
6.5. Аналитическое решение уравнения теплопроводности гиперболического типа	166
<i>Глава седьмая. Горение смесевых видов топлива</i>	170
7.1. Схематизация структуры	170
7.2. Основные соотношения	173
7.3. Условия на границе раздела фаз	174
7.4. Модель теплообмена в КС с учетом теплового излучения объема газа	175
7.5. Результаты численного моделирования	177
7.6. Факторы интенсификации горения	178
7.7. Обоснование допущения о бесконечно тонком реакционном слое	179
7.8. Температурная чувствительность горения ЭМ	182
7.9. Горение и взрыв смесевых видов ВВ	187

Глава восьмая. Моделирование детонационных волн	188
8.1. Особенности фронта волн химической детонации	188
8.2. Связь скоростей детонации D и распространения тепла W	189
8.3. Температурный профиль в зоне сжатия	189
8.4. Формы записи уравнений законов сохранения	190
8.5. Термодинамический метод моделирования детонационных волн	192
8.6. Начальная стадия горения во фронте ДВ	195
8.7. Молекулярно-динамическое моделирование процессов горения ЭМ	197
8.8. Ударно-волновое и тепловое инициирование горения в ДВ	199
8.9. Связь критического диаметра ВВ с диспергированием ...	201
8.10. Моделирование термоядерных ДВ	202
8.11. Уравнения состояния для моделей ДВ	205
Заключение	207
Приложение	210
П1. Зависимость коэффициента линейного расширения и модуля упругости от силового воздействия	210
П2. Изменение тепловых свойств при термоллизе	212
П3. Обоснование нетеплового механизма вспышки при сжатии образцов ВВ на прессе и ударе копра	214
П4. Ориентация и распад растянуто-деформированных осцилляторов при сжатии и кручении образцов на прессе	215
П5. Упруго-волновое инициирование горения ЭМ	217
П6. Условие инициирования вспышки ЭМ силами сухого трения, нанесение укола или царапины	222
П7. Влияние сил инерции на инициирование вспышки ЭМ при ударе	224
П8. Калибровка параметров потенциалов взаимодействия в УРС	226
П9. Полуэмпирическое уравнение состояния ЭМ	228
Список литературы	230