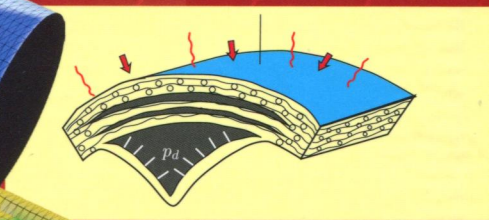
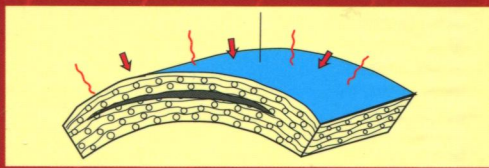
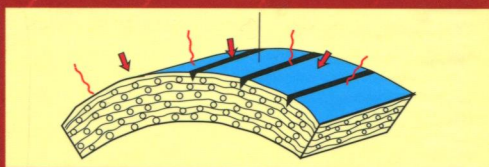
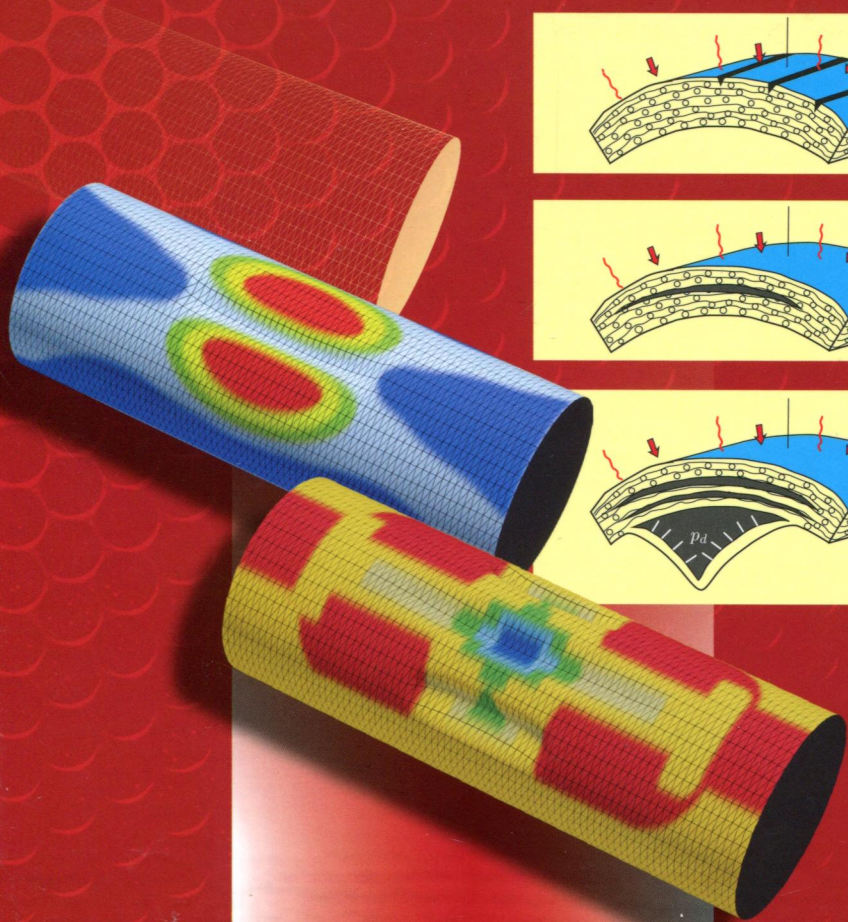


Ю.И. Димитриенко

МЕХАНИКА КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ



Ю.И. Димитриенко

**МЕХАНИКА
КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2018

УДК 539.3+539.4+
536.4:678.5-419.8
ББК 22.251
Д 46



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 18-18-00039,
не подлежит продаже*

Димитриенко Ю.И. **Механика композитных конструкций при высоких температурах.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 448 с. — ISBN 978-5-9221-1822-4.

В монографии изложены модели поведения композиционных материалов и конструкций из композитов при высоких температурах с учетом внутренних физико-химических превращений — термодеструкции, абляции и других. Рассмотрены структурные методы расчета эффективных термомеханических и теплофизических характеристик аблирующих матриц, волокон, однонаправленных и тканевых композитов по свойствам составляющих их фаз. Большое внимание уделено сравнению результатов моделирования с экспериментальными данными. Представлены методы расчета термпрочности конструкций из композитов в условиях неравномерного нагрева и процессов абляции.

Книга адресована научным и инженерно-техническим работникам проектно-конструкторских и научно-исследовательских организаций, занимающихся вопросами механики композитов и композитных конструкций, многофазных сред, а также вопросами термодинамики и термомеханики.

ISBN 978-5-9221-1822-4

© ФИЗМАТЛИТ, 2018

© Ю. И. Димитриенко, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Основные обозначения	10
Глава 1. Особенности термомеханического поведения композитов при высоких температурах	17
1.1. Основные виды высокотемпературных воздействий на композитные конструкции	17
1.2. Процессы абляции композитов при высоких температурах	33
1.3. Эффекты в композитных конструкциях, обусловленные воздействием высоких температур	37
1.4. Модель аблирующих композиционных материалов	40
Глава 2. Основные уравнения механики многофазных сред для аблирующих композиционных материалов	42
2.1. Законы сохранения	42
2.2. Определяющие соотношения для фаз аблирующих композитов	47
2.3. Соотношения на поверхности раздела фаз	53
2.4. Уравнение для скорости фазового превращения	56
2.5. Случай бесконечно малых деформаций твердых фаз	58
Глава 3. Математическая модель аблирующих композиционных материалов	66
3.1. Основные предположения	66
3.2. Постановка задачи термомеханики аблирующих композитов	69
3.3. Метод асимптотического осреднения	71
3.4. Осреднение процессов в аблирующих композитах	75
3.5. Анализ метода асимптотического осреднения	77
3.6. Постановка задач термомеханики для композитов с аблирующими матрицей и волокнами	78
Глава 4. Модель аблирующих полимерных матриц	84
4.1. Изменение плотности матриц	84
4.2. Упругие свойства аблирующих матриц	90
4.3. Тепловое расширение и усадка матриц при высоких температурах	99
4.4. Прочность матриц при высоких температурах	101

4.5. Теплопроводность и теплоемкость аблирующих матриц	109
4.6. Газопроницаемость матриц	112
Глава 5. Модели волокон при высоких температурах	117
5.1. Изменение фазового состава волокон при нагреве	117
5.2. Теплопроводность и теплоемкость аблирующих волокон	121
5.3. Изменение упругих свойств волокон при нагреве.	123
5.4. Тепловая деформация волокон при высоких температурах	124
5.5. Прочностные свойства волокон при высоких температурах	125
5.6. Короткие волокна и дисперсные частицы	132
Глава 6. Модели однонаправленных композиционных материалов при высоких температурах	134
6.1. Многомасштабная модель аблирующего однонаправленного композита	134
6.2. Модель микрокомпозита	137
6.3. Термоупругие характеристики однонаправленных композитов	142
6.4. Термопрочность однонаправленных композитов	145
6.5. Тепловое расширение/усадка	162
Глава 7. Модели аблирующих тканевых композиционных материалов	164
7.1. Многомасштабная модель структуры аблирующего тканевого композита	164
7.2. Модель слоя с искривленными нитями	166
7.3. Определяющие соотношения для аблирующих тканевых композитов	171
7.4. Термоупругие модули тканевых композитов	171
7.5. Тепловые деформации тканевых композитов	176
7.6. Коэффициенты межфазного взаимодействия	180
7.7. Теплопрочность тканевых композитов при высоких температурах	180
7.8. Теплофизические свойства тканевых композитов при высоких температурах	188
7.9. Газопроницаемость	193
Глава 8. Композиционные материалы, армированные дисперсными частицами	195
8.1. Модель дисперсно-армированного композита	195
8.2. Термоупругие характеристики	196
8.3. Прочность	199
8.4. Теплофизические свойства	201

Глава 9. Моделирование процессов в термодеструктурирующих композитах при неравномерном нагреве	205
9.1. Внутренний тепломассоперенос и напряжения в термодеструктурирующих композитах при неравномерном нагреве	205
9.2. Плоские задачи термомеханики композитов при высоких температурах	211
9.3. Тепловая деформация, напряжения и несущая способность композитной пластины при неравномерном нагреве	214
Глава 10. Линейная абляция композиционных материалов	224
10.1. Основные типы линейной абляции композитов	224
10.2. Скорость горения	225
10.3. Скорость сублимации	229
10.4. Скорость термомеханической эрозии	232
10.5. Скорость плавления	243
10.6. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными	243
10.7. Тепловой баланс на аблирующей поверхности	249
10.8. Критерии эффективности композитов	250
Глава 11. Термонапряжения в осесимметричных композитных конструкциях при высоких температурах	254
11.1. Осесимметричные задачи термомеханики композитов при высоких температурах	254
11.2. Термонапряжения в композитных конструкциях воздушно-реактивных двигателей	258
11.3. Термонапряжения в теплозащитных конструкциях камер сгорания ракетных двигателей	271
11.4. Термонапряжения в теплозащитных конструкциях летательных аппаратов при аэродинамическом нагреве	278
11.5. Термонапряжения в композитах при локальном нагреве излучением	286
Глава 12. Механика композитных тонкостенных оболочек при высоких температурах	291
12.1. Схема композиционной оболочки с внешним аблирующим слоем	291
12.2. Основные уравнения для тонкостенных композитных оболочек при высоких температурах	292
12.3. Основные предположения для модели расчета тонкостенных аблирующих оболочек	297
12.4. Особенности теории композиционных оболочек при высоких температурах	299
12.5. Цилиндрические композитные оболочки при высоких температурах	303
12.6. Разрушение конструкций из композитов при высоких температурах	310

Глава 13. Моделирование термомеханических процессов в композитных оболочках при высоких температурах методом конечного элемента	316
13.1. Вариационные постановки задач для композитных оболочек при высоких температурах	316
13.2. Метод конечного элемента для аблирующих композитных оболочек	326
13.3. Методы расчета внутреннего тепломассопереноса в аблирующих тонкостенных композитных оболочках.	330
13.4. Цилиндрические композитные оболочки при локальном высокотемпературном нагреве	339
13.5. Моделирование осесимметричных композитных оболочек при локальном высокотемпературном нагреве	366
13.6. Моделирование композитных пластин при локальном высокотемпературном нагреве	377
Глава 14. Динамические задачи термомеханики аблирующих композитов	389
14.1. Постановка динамической задачи термомеханики аблирующих композитов	389
14.2. Осреднение процессов в пористых полимерных материалах при импульсном термическом воздействии	393
14.3. Задача об импульсном воздействии мощного излучения на аблирующую композитную пластину	406
Глава 15. Методы экспериментального исследования высокотемпературных свойств композиционных материалов	413
15.1. Определение плотности при нагреве	413
15.2. Определение термических характеристик при нагреве	414
15.3. Определение газопроницаемости.	418
15.4. Определение тепловой деформации при нагреве	419
15.5. Определение прочности и модуля упругости композитов при высоких температурах.	420
15.6. Газодинамическое тестирование композитов	423
Литература	426
Предметный указатель	444