

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
<b>Глава 1. Особенности термомеханического поведения композитов при высоких температурах . . . . .</b>	<b>17</b>
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
<b>Глава 2. Основные уравнения механики многофазных сред для аблирующих композиционных материалов . . . . .</b>	<b>42</b>
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
<b>Глава 3. Математическая модель аблирующих композиционных материалов . . . . .</b>	<b>66</b>
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
<b>Глава 4. Модель аблирующих полимерных матриц . . . . .</b>	<b>84</b>
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
<b>Глава 5. Модели волокон при высоких температурах . . . . .</b>	<b>117</b>
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
<b>Глава 6. Модели однонаправленных композиционных материалов при высоких температурах . . . . .</b>	<b>134</b>
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
<b>Глава 7. Модели аблирующих тканевых композиционных материалов . . . . .</b>	<b>164</b>
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. Термопрочность тканевых композитов при высоких температурах. . . . .	180
7.8. Теплофизические свойства тканевых композитов при высоких температурах . . . . .	188
7.9. Газопроницаемость. . . . .	193
<b>Глава 8. Композиционные материалы, армированные дисперсными частицами . . . . .</b>	<b>195</b>
8.1. Модель дисперсно-армированного композита . . . . .	195
8.2. Термоупругие характеристики . . . . .	196
8.3. Прочность . . . . .	199
8.4. Теплофизические свойства. . . . .	201

<b>Глава 9. Моделирование процессов в термодеструктурирующих композитах при неравномерном нагреве . . . . .</b>	<b>205</b>
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
<b>Глава 10. Линейная абляция композиционных материалов. . . . .</b>	<b>224</b>
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
<b>Глава 11. Термонапряжения в осесимметричных композитных конструкциях при высоких температурах. . . . .</b>	<b>254</b>
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
<b>Глава 12. Механика композитных тонкостенных оболочек при высоких температурах . . . . .</b>	<b>291</b>
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



<b>Глава 13. Моделирование термомеханических процессов в композитных оболочках при высоких температурах методом конечного элемента . . . . .</b>	<b>316</b>
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
<b>Глава 14. Динамические задачи термомеханики аблирующих композитов . . . . .</b>	<b>389</b>
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
<b>Глава 15. Методы экспериментального исследования высокотемпературных свойств композиционных материалов. . . . .</b>	<b>413</b>
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