



С.Л. БАЖЕНОВ

МЕХАНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Л. БАЖЕНОВ

МЕХАНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



ДОЛГОПРУДНЫЙ
2014



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского
Фонда Фундаментальных Исследований по проекту № 13-03-07008

С.Л. Баженов

Механика и технология композиционных материалов:
Научное издание / С.Л. Баженов – Долгопрудный: Изда-
тельский Дом «Интеллект», 2014. – 328 с.

ISBN 978-5-91559-160-7

В учебно-справочном руководстве описаны технология изготовления, механические свойства и разрушение композиционных материалов на основе полимерных матриц.

В последние годы существенное значение приобрели композиты бытового назначения, используемые в корпусах автомобилей и маломерных судов. Детально изложена технология производства стеклянных, углеродных, борных и органических волокон. Описаны терморезистивные и термопластичные полимерные матрицы, а также технология формования высокопрочных композитов и композитов бытового назначения на их основе.

Дана теория разрушения волокнистых композиционных материалов и наполненных композитов.

Книга предназначена для научных и инженерных работников, занимающихся применением и разработкой композитов в автомобильной промышленности, судостроении, авиационной и космической технике, а также для студентов и преподавателей материаловедческих и технологических специальностей.

ISBN 978-5-91559-160-7

© 2013, С.Л. Баженов
© 2014, ООО Издательский Дом
«Интеллект», оригинал-макет,
оформление

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	11
-------------------	----

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ	13
1.1. Определение	19
1.2. Масштабные уровни структуры	21
1.3. Волокна и матрица	23
1.4. История разработки композитов	25
1.5. Показатели эффективности	28
<i>Список литературы</i>	30

Глава 2

ВОЛОКНА	32
2.1. Стекланные волокна	36
2.1.1. Типы стекловолокон	37
2.1.2. Производство стекловолокон	38
2.2. Борные волокна	39
2.3. Углеродные волокна	41
2.3.1. Производство волокон	43
2.4. Органические волокна	47
2.4.1. Арамидные волокна	47
2.4.2. СВМПЭ-волокна	50
2.5. Термостойкие волокна	52
2.6. Натуральные волокна	53
2.7. Замасливатели и аппреты	54
2.8. Форма волокон	54
2.8.1. Ткани	55
2.8.2. Нетканые материалы	58



2.8.3. Препреги	59
2.8.4. Плетеный текстиль	60
2.8.5. Прошивка	60
2.8.6. Заготовки	61
2.9. Гибридные композиты	62
Список литературы	62

Глава 3

МАТРИЦЫ И ИХ СВОЙСТВА	64
3.1. Радикальная полимеризация	65
3.2. Реакция поликонденсации	67
3.3. Кристаллические и аморфные полимеры	67
3.4. Температура стеклования	69
3.5. Термопласты и реактопласты	70
3.6. Стойкость к действию растворителей	71
3.7. Газопроницаемость	72
3.8. Стойкость к ультрафиолетовому излучению	73
3.9. Пропитка волокон	74
3.10. Ненасыщенные полиэфирные смолы	75
3.10.1. Химическая структура ненасыщенных полиэфиров	76
3.10.2. Свойства	77
3.10.3. Двухосновные кислоты	77
3.10.4. Гликоли	79
3.10.5. Мономерные добавки	79
3.10.6. Отверждение смолы	80
3.10.7. Ингибиторы отверждения	81
3.10.8. Ускорители отверждения	82
3.10.9. Объемный формовочный компаунд	82
3.10.10. Отверждение	83
3.10.11. Добавки	84
3.11. Эпоксидные смолы	84
3.11.1. Структура	85
3.11.2. Отверждение	85
3.11.2.1. Отвердитель	87
3.11.2.2. Пропитка волокон	88
3.11.2.3. Температура отверждения	88
3.11.3. Препреги	89
3.11.4. Адгезия	90



3.11.5. Усталостная прочность	90
3.11.6. Ползучесть	90
3.11.7. Вязкость разрушения	91
3.11.8. Изготовление пресс-форм	93
3.12. Сложные винилэфирные смолы	93
3.12.1. Структура	94
3.12.2. Коррозионная стойкость	96
3.13. Фенольные смолы	97
3.13.1. Структура	97
3.13.2. Отверждение	98
3.13.3. Свойства	99
3.13.3.1. Горючесть	99
3.13.4. Применение	100
3.14. Углерод-углеродные композиты	100
3.14.1. Производство	101
3.15. Полиимиды	102
3.15.1. Бисмалеимиды	103
3.16. Цианаты	104
3.17. Полиуретаны	105
3.17.1. Свойства и применение	107
3.18. Кремнийорганические полимеры	107
3.19. Дициклопентадиен	110
3.20. Термопластичные матрицы	110
3.20.1. Термопластичные композиты широкого потребления	111
3.20.2. Термостойкие матрицы	113
3.20.2.1. Полиэфирэфиркетон	113
3.20.2.2. Полисульфон	114
3.20.2.3. Термопластичные полиимиды	114
3.20.3. Жидкокристаллические полимеры	116
3.20.4. Фторопласты	116
Список литературы	117

Глава 4

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

4.1. Формование композитов широкого потребления в открытых формах	119
4.1.1. Наружный полимерный слой	119



4.2. Ручная послойная выкладка	120
4.2.1. Формование	121
4.3. Напыление	122
4.4. Изготовление пресс-форм	123
4.4.1. Извлечение деталей	125
4.5. Формование высокопрочных композитов в открытых пресс-формах	126
4.5.1. Ручная послойная выкладка препрегов	126
4.5.2. Автоматизированная послойная выкладка	127
4.6. Вакуумформование	127
4.6.1. Отверждение	129
4.7. Отверждение в автоклаве	130
4.8. Методы неавтоклавного отверждения	130
4.9. Прессование	131
4.9.1. Прессование компаундов	133
4.9.2. Прессование заготовок	134
4.9.3. Прессование препрегов	134
4.10. Инжекция термореактивной смолы	134
4.10.1. Вакуумная инъекция термореактивной смолы	136
4.10.2. Термокомпрессионное формование	136
4.10.3. Метод матричной пленки	136
4.10.4. Центробежное литье	138
4.11. Намотка	138
4.11.1. Намотка препрегом	142
4.11.2. Оправки	142
4.11.3. Намоточные станки	143
4.12. Машинная укладка волокон	145
4.13. Пултрузия	145
4.14. Производство композитов на основе термопластов	149
4.14.1. Формование композитов, армированных короткими волокнами	150
4.14.1.1. Экструзия	150
4.14.2. Литье под давлением	151
4.14.3. Формование в открытых формах	152
4.14.4. Пултрузия	153
4.14.5. Прессование	154



4.14.6. Специфические методы формования термопластичных композитов	154
4.14.7. Последовательное формование	156
4.14.7.1. Двухстадийное формование	156
4.14.7.2. Прокатка	156
4.15. Ремонт композитов	156
4.15.1. Повреждение при ударе	157
4.15.2. Оценка поврежденности	159
4.15.3. Технология ремонта	160
4.15.3.1. Внешняя накладка	160
4.15.3.2. Ремонт с заменой поврежденной области	161
4.16. Обозначение схемы укладки слоев	163
4.17. Усталость	166
4.18. Остаточные напряжения	168
4.19. Сэндвич-структуры	169
4.19.1. Сердцевина	170
4.19.2. Производство сэндвич-структур	170
4.20. Соединение деталей из композита	171
4.20.1. Механическое соединение	171
4.20.2. Склеивание	173
4.20.2.1. Состав клеев	175
4.20.3. Другие методы соединения	177
4.21. Конечная обработка	177
4.21.1. Водоструйная резка	178
4.21.2. Лазерная резка	179
<i>Список литературы</i>	179

Глава 5

РАЗРУШЕНИЕ	181
5.1. Что такое разрушение?	181
5.2. Механизмы разрушения	184
5.2.1. Хрупкое разрушение	186
5.2.2. Пластическое разрушение	186
5.2.3. Квазихрупкое разрушение	189
5.2.4. Крэйзы	189
5.3. Механические характеристики	191
5.3.1. Виды разрушения	192



5.4. Теория хрупкого разрушения Гриффитса—Орована	193
5.4.1. Теоретическая прочность	193
5.5. Концентрация напряжений	197
5.5.1. Теория Гриффитса	199
5.5.2. Теория Орована	200
5.5.3. Методы измерения вязкости разрушения	203
5.5.3.1. Метод податливости	203
5.5.3.2. Сильный изгиб консолей	205
5.5.4. Плосконапряженное состояние и плоская деформация	208
5.5.5. Размер зоны пластичности	209
5.5.6. Температура и скорость нагружения	212
5.6. Вязкость разрушения волокнистого композита	212
5.7. Поперечное разрушение	214
5.7.1. Энергия упругой деформации волокна	215
5.7.2. Отслоение волокон	216
5.7.3. Извлечение волокон	216
5.7.4. Адгезионное разрушение	217
5.7.5. Слой адгезива	219
Список литературы	220

Глава 6

ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИТЫ	223
6.1. Продольный модуль упругости	223
6.2. Поперечный модуль упругости	224
6.3. Модуль сдвига	226
6.4. Влияние температуры	227
6.5. Коэффициент Пуассона	228
6.6. Прочность	229
6.6.1. Поперечное растяжение	229
6.6.2. Пластичная матрица	230
6.6.2.1. Регулярная решетка волокон	230
6.6.2.2. Случайно распределенные волокна	231
6.7. Внутрислойный сдвиг	234
6.8. Продольное растяжение	236
6.8.1. Растяжение под углом к оси волокон	236
6.9. Осевое растяжение	241
6.9.1. $\varepsilon_f > \varepsilon_m$	241
6.9.2. $\varepsilon_f < \varepsilon_m$	243



6.10. Растрескивание	246
6.10.1. Исчерпание несущей способности волокон	249
6.11. Теория Розена	251
6.11.1. Неэффективная длина волокна	253
6.11.2. Малые степени армирования	257
6.11.3. Пластичная матрица	257
6.11.4. Прочность пучка волокон	258
6.11.5. Средняя прочность волокон	260
6.12. Размотка	262
6.12.1. Отслоение разрушенного волокна	265
6.12.2. Растрескивание вблизи отверстия	266
6.13. Коэффициент реализации прочности волокон	269
6.14. Влияние температуры	270
<i>Список литературы</i>	272

Глава 7

РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СЖАТИИ	274
7.1. Потеря устойчивости волокон	275
7.2. Исчерпание несущей способности волокон	279
7.2.1. Разрушение органопластика при повышенной температуре	285
7.3. Разрушение стеклопластика	289
7.3.1. Крутка нити	291
7.3.2. Потеря устойчивости стеклянных волокон	292
7.4. Разрушение углепластика	294
7.4.1. Высокопрочные углеродные волокна	295
7.4.1.1. Влияние отверстия	295
7.4.1.2. Влияние пор	299
7.4.1.3. Разрушение при повышенной температуре	299
<i>Список литературы</i>	300

Глава 8

РАЗРУШЕНИЕ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ	303
8.1. Предел прочности	305
8.1.1. Модель регулярной упаковки частиц	306
8.1.2. Модель композита со случайно распределенными частицами	308
8.1.3. Крупные частицы	309



8.2. Деформация при разрыве	313
8.2.1. Однородно деформирующиеся матрицы	314
8.2.2. Матрицы, деформирующиеся путем распространения шейки	315
8.3. Верхний предел текучести	316
8.4. Нижний предел текучести	317
8.4.1. Переходы механизмов разрушения	318
8.4.2. Переход к хрупкому разрушению	318
8.4.2.1. Хорошая адгезия	319
8.4.2.2. Слабая адгезия	321
8.4.2.2.1. $\sigma_m < \sigma_y$. Переход к хрупкому разрушению	321
8.4.2.2.2. $\sigma_m > \sigma_y$. Переход к однородному пластическому течению	323
Список литературы	325