



*Ю.А. Михайлин*

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2-е издание,  
исправленное и дополненное

ИЗДАТЕЛЬСТВО



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ и ТЕХНОЛОГИИ

Санкт-Петербург, 2010

**УДК 66.06**  
**ББК 35.719**  
**М69**

**М69 Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд.** — СПб.: Научные основы и технологии, 2010. — 822 стр., ил.

ISBN 978-5-91703-003-6

В книге приведена информация о принципах создания, составах, структуре, свойствах, ассортименте конструкционных полимерных композиционных материалов, в основном использующих в качестве наполнителей непрерывные минеральные, полимерные, углеродные волокна и текстильные формы из них (нити, ленты, ткани). Рассмотрены армированные термореактивные и термопластичные стекло-, органо-, углепластики (ВПКМ), поливолоконистые (гибридные) ВПКМ, многослойные металл-полимерные (супергибридные) материалы. Особое внимание уделено применению конструкционных ВПКМ различных типов, экономическим вопросам разработки и применения ВПКМ.

Книга адресована специалистам, связанным с разработкой, совершенствованием и переработкой в изделия ВПКМ в различных областях техники, студентам, магистрам, аспирантам, и может быть использована преподавателями факультетов повышения квалификации инженерного состава отраслевых производств.

УДК 66.06  
ББК 35.719

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-91703-003-6

© Михайлин Ю.А., 2010

© Изд-во «Научные основы и технологии», 2010

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>9</b>
<b>1. Принципы создания, составы, структура и свойства полимерных композиционных материалов</b>	<b>14</b>
1.1. Структура и свойства полимерных композиционных материалов с непрерывными волокнами в качестве наполнителей (ВПКМ)	15
1.2. Трещиностойкость ВПКМ	34
1.3. Усталостная прочность ВПКМ	43
1.4. Эксплуатационные свойства ВПКМ и их оптимизация	52
1.5. Термоустойчивость ВПКМ	76
1.6. Термопластичные ПКМ (ТПКМ)	78
1.6.1. Особенности ТПКМ – гетерофазных полимерных композиций	82
1.6.2. ТПКМ с порошкообразными наполнителями	86
1.6.3. ТПКМ с дискретными волокнами	88
1.6.4. ТПКМ с непрерывными волокнами	95
1.6.4.1. ТПКМ, формируемые из пленочных препрегов	96
1.6.4.2. ТПКМ, формируемые из волоконных препрегов	100
Литература	104
<b>2. Связующие для ВПКМ</b>	<b>107</b>
2.1. Тенденции развития термореактивных связующих	118
2.2. Термопластичные связующие	183
Литература	195
<b>3. Полимерные волокна и полимерные композиционные материалы на их основе</b>	<b>199</b>
3.1. Полимерные волокна	208
3.1.1. Волокна из ароматических полиамидов	209
3.1.1.1. Технология получения полиарамидных волокон	210

3.1.1.2. Строение и структура полиарамидных волокон	217
3.1.1.3. Свойства полиарамидных волокон	222
3.1.1.4. Волокнистые полуфабрикаты из арамидных волокон	236
3.1.1.5. Применение волокон из полиарамидов	247
3.1.2. Волокна на основе жесткоцепных полимеров	251
3.1.3. Волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)	257
3.1.3.1. Теоретические предпосылки получения высокомолекулярных волокон из гибкоцепных полимеров	260
3.1.3.2. Технология получения волокон из СВМПЭ через гель-состояние	267
3.1.3.3. Ассортимент и свойства волокон из СВМПЭ	283
3.2. Материалы на основе полимерных волокон	286
3.2.1. Полимерные композиционные материалы с полимерными волокнами в качестве наполнителей (органопластики, кевларопластики)	288
3.2.1.1. Организация взаимодействия между компонентами в органопластиках	290
3.2.1.2. Термореактивные органопластики	293
3.2.2. Полимерные композиционные материалы с полимерными «матричными» волокнами	317
3.2.2.1. Тенденции развития термопластичных композиционных материалов (ТКМ)	317
3.2.2.2. Волоконная технология ТКМ	320
3.3. Применение материалов на основе полимерных волокон	327
Литература	334
<b>4. Углеродные волокна и композиционные материалы на их основе</b>	<b>338</b>
4.1. Аллотропные и переходные формы углерода	341
4.1.1. Алмаз ( $sp^3$ -гибридизация)	341
4.1.2. Графит ( $sp^2$ -гибридизация)	341
4.1.3. Карбин ( $sp$ -гибридизация)	342
4.1.4. Углеродные наноструктуры	342
4.1.4.1 Фуллерены	342
4.1.4.2. Углеродные нанотрубки	344
4.1.4.3. Углеродные нановолокна	348
4.1.4.4. Углеродные наноструктуры в нанотехнологии	348
4.1.5. Углеродные и графитизированные волокна	358
4.2. Углеродные волокна на основе гидратцеллюлозы	367
4.2.1. Целлюлоза	367
4.2.2. Технология получения углеродных волокон из гидратцеллюлозных волокон	375
4.2.3. Ассортимент, свойства и применение промышленных углеродных волокнистых материалов (УВМ) на основе ГЦ-волокон	384
4.3. Углеродные волокна на основе полиакрилонитрила	390
4.3.1. Полиакрилонитрил (ПАН) и ПАН-волокна	391
4.3.2. Технология получения углеродных волокон из ПАН-волокон	394
4.3.3. Структура и свойства углеродных и графитизированных волокон из ПАН-волокон	409

4.3.4. Ассортимент и свойства промышленных углеродных волокнистых материалов на основе ПАН-волокон	420
4.4. Углеродные волокна из пеков	440
4.5. Обработка поверхности углеродных волокон	454
4.6. Углепластики	471
4.6.1. Конструкционные свойства углепластиков	474
4.6.2. Термореактивные углеволокниты	491
4.6.2.1. Конструкционные свойства промышленных углеволокнитов на основе термореактивных связующих	491
4.6.2.2. Водопоглощение углеволокнитов	506
4.6.2.3. Электрофизические свойства углеволокнистых материалов и углеволокнитов	514
4.6.2.4. Теплофизические и другие эксплуатационные свойства термореактивных углеволокнитов	527
4.6.3. Термопластичные углеволокниты	534
4.6.4. Применение углепластиков	558
Литература	574
<b>5. Минеральные наполнители и полимерные композиционные материалы на их основе</b>	<b>580</b>
5.1. Тенденции развития ПКМ с минеральными наполнителями	580
5.1.1. Микродисперсные минеральные наполнители и ПКМ на их основе	581
5.1.2. Нанодисперсные минеральные наполнители и наноккомпозиты на их основе	585
5.1.2.1. Полимерные наноккомпозиты с природными модифицированными минеральными наноразмерными наполнителями	586
5.1.2.2. Полимерные наноккомпозиты с синтетическими минеральными наноразмерными наполнителями	595
5.1.2.3. Полимерные наноккомпозиты с металлическими наноразмерными фазами	598
5.1.3. Минеральные волокна и ПКМ на их основе	599
5.2. Минеральные волокна на основе SiO <sub>2</sub> . Стеклопластики	605
5.2.1. Стекланные волокна и текстильные формы из них	605
5.2.2. Организация взаимодействия между компонентами в стеклопластиках. Аппретирование. Аппреты	620
5.2.3. Свойства стеклопластиков	637
5.3. Базальтовые волокна и материалы на их основе	648
5.4. Карбидокремниевые волокна и материалы на их основе	662
5.5. Керамические поликристаллические волокна и материалы на их основе	681
Литература	687
<b>6. Поливолокнистые (гибридные) полимерные композиционные материалы</b>	<b>692</b>
6.1. Упругопрочностные свойства поливолоконистых ВПКМ при статическом и динамическом нагружении	695
6.1.1. Упругие характеристики поливолоконистых ВПКМ	695

6.1.2. Прочностные характеристики поливолоконистых ВПКМ	704
6.1.3. Синергические эффекты в поливолоконистых ВПКМ	714
6.1.4. Ползучесть поливолоконистых ВПКМ (ПВПКМ)	718
6.1.5. Ударная вязкость и трещиностойкость поливолоконистых ВПКМ	718
6.1.6. Динамическая усталость и демпфирующие свойства поливолоконистых ВПКМ	725
6.2. Конструкционные свойства промышленных поливолоконистых ВПКМ (ПВПКМ)	730
6.2.1. Углестеклопластики	735
6.2.2. Углеорганопластики	738
6.2.3. Органостеклопластики	744
6.2.4. Другие типы поливолоконистых ВПКМ	747
6.3. Применение поливолоконистых ВПКМ	749
Литература	753
<b>7. Многослойные металлополимерные (супергибридные) материалы</b>	<b>755</b>
7.1. Металлоорганопластиковые многослойные материалы (Алоры, <i>Arall</i> )	758
7.2. Металлостеклопластиковые многослойные материалы (Сиалы, <i>Glare</i> )	769
7.3. Другие типы металлополимерных многослойных материалов	772
7.4. Применение металлополимерных многослойных материалов	775
Литература	779
<b>8. Экономические проблемы разработки и применения ПМ, ПКМ, ВПКМ</b>	<b>781</b>
8.1. Производство и потребление полимерных материалов и их компонентов	781
8.2. Стоимость ПКМ, ВПКМ и их компонентов	791
8.3. Эффективность использования ВПКМ в конструкциях	795
Литература	807
<b>Приложение. Критерии оценки технологических и эксплуатационных свойств полимерных и полимерных композиционных материалов</b>	<b>809</b>
1. Критерии оценки технологических свойств	810
2. Критерии оценки эксплуатационных свойств	811