

В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



«Инфра-Инженерия»

В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Допущено учебно-методическим объединением по образованию
в области металлургии в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлениям подготовки 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия»

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК 669.018.95
ББК 34.39
К72

Рецензент:
профессор, доктор технических наук *С. Д. Шляпин*

Костиков, В. И.

К72 Технология композиционных материалов : учебное пособие / В. И. Костиков, Ж. В. Еремеева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 484 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0520-1

Рассмотрены классификация и основы конструирования композиционных материалов. Описаны физико-химические основы технологии получения армирующих элементов и матриц композиционных материалов. Представлены основные технологии получения композиционных материалов на основе металлических, полимерных и углеродных матриц. Приведены особенности технологии эвтектических композиционных материалов.

Для инженерно-технических работников промышленного производства порошковых изделий, а также студентов технических вузов.

УДК 669.018.95
ББК 34.39

ISBN 978-5-9729-0520-1

© Костиков В. И., Еремеева Ж. В., 2021
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

Оглавление

Предисловие.....	8
Введение.....	10
1. Классификация композиционных материалов.....	13
1.1. Цели и задачи создания композиционных материалов (КМ).....	13
1.2. Классификация композиционных материалов по виду материала матрицы, ориентации и типу арматуры, назначению.....	14
1.3. Требования, предъявляемые к армирующим волокнам и материалу матриц.....	16
2. Методы контроля свойств композиционных материалов.....	18
2.1. Методы определения механических свойств армированных КМ.....	18
2.1.1. Растяжение.....	19
2.1.2. Сжатие.....	22
2.1.3. Сдвиг.....	24
2.1.4. Изгиб.....	26
2.2. Испытания кольцевых образцов.....	33
2.2.1. Растяжение.....	33
2.2.2. Сжатие.....	34
2.3. Анализ структуры КМ и механизмов ее разрушения.....	35
2.3.1. Микроскопический анализ.....	35
2.3.2. Фрактографический анализ.....	37
3. Методы получения и свойства армирующих материалов.....	39
3.1. Металлические волокна.....	39
3.1.1. Стальная проволока.....	39
3.1.2. Вольфрамовая и молибденовая проволока.....	47
3.1.3. Проволока из бериллия.....	51
3.1.4. Титановая проволока.....	52
3.1.5. Биметаллическая проволока.....	53
3.2. Стекланые волокна (СВ).....	54
3.3. Волокна бора, карбида кремния и борсика.....	65
3.3.1. Борные волокна.....	65
3.3.2. Волокна из карбида кремния, борсика.....	72
3.4. Углеродные волокна.....	76
3.4.1. Исходные материалы и химические превращения при формировании углеродного волокна.....	81
3.4.2. Углеродные волокна на основе полиакрилонитрила.....	82
3.4.3. Углеродные волокна на основе пека.....	88
3.4.4. Углеродные волокна на основе гидратцеллюлозы.....	91
3.4.5. Свойства углеродных волокон.....	93

Оглавление

Предисловие.....	8
Введение.....	10
1. Классификация композиционных материалов.....	13
1.1. Цели и задачи создания композиционных материалов (КМ).....	13
1.2. Классификация композиционных материалов по виду материала матрицы, ориентации и типу арматуры, назначению.....	14
1.3. Требования, предъявляемые к армирующим волокнам и материалу матриц.....	16
2. Методы контроля свойств композиционных материалов.....	18
2.1. Методы определения механических свойств армированных КМ.....	18
2.1.1. Растяжение.....	19
2.1.2. Сжатие.....	22
2.1.3. Сдвиг.....	24
2.1.4. Изгиб.....	26
2.2. Испытания кольцевых образцов.....	33
2.2.1. Растяжение.....	33
2.2.2. Сжатие.....	34
2.3. Анализ структуры КМ и механизмов ее разрушения.....	35
2.3.1. Микроскопический анализ.....	35
2.3.2. Фрактографический анализ.....	37
3. Методы получения и свойства армирующих материалов.....	39
3.1. Металлические волокна.....	39
3.1.1. Стальная проволока.....	39
3.1.2. Вольфрамовая и молибденовая проволока.....	47
3.1.3. Проволока из бериллия.....	51
3.1.4. Титановая проволока.....	52
3.1.5. Биметаллическая проволока.....	53
3.2. Стекланные волокна (СВ).....	54
3.3. Волокна бора, карбида кремния и борсика.....	65
3.3.1. Борные волокна.....	65
3.3.2. Волокна из карбида кремния, борсика.....	72
3.4. Углеродные волокна.....	76
3.4.1. Исходные материалы и химические превращения при формировании углеродного волокна.....	81
3.4.2. Углеродные волокна на основе полиакрилонитрила.....	82
3.4.3. Углеродные волокна на основе пека.....	88
3.4.4. Углеродные волокна на основе гидратцеллюлозы.....	91
3.4.5. Свойства углеродных волокон.....	93

3.4.5.1.	Механические свойства.....	93
3.4.5.2.	Физические свойства	99
3.4.5.3.	Химические свойства	102
3.5.	Нитевидные кристаллы	103
3.6.	Керамические волокна.....	116
3.6.1.	Монокристаллические керамические волокна	116
3.6.2.	Поликристаллические керамические волокна	118
4.	Металлические матрицы композиционных материалов.....	124
4.1.	Матрицы на основе алюминия	124
4.1.1.	Технический алюминий	124
4.1.2.	Деформируемые алюминиевые сплавы.....	125
4.1.3.	Литейные алюминиевые сплавы	129
4.2.	Матрицы на основе магния	133
4.3.	Матрицы на основе титана.....	135
4.4.	Матрицы на основе меди.....	139
4.5.	Матрицы на основе никеля	140
5.	Технология и свойства металломатричных композиционных материалов	157
5.1.	Требования, предъявляемые к процессам получения КМ.....	157
5.2.	Композиционные материалы на основе алюминия.....	160
5.2.1.	Алюминий-сталь	162
5.2.2.	Al-B и алюминий-борсик	167
5.2.3.	Al-SiC	174
5.2.4.	Al-C.....	175
5.2.5.	Al-SiO ₂	178
5.2.6.	Al-W.....	179
5.2.7.	Al-Be.....	179
5.2.8.	Алюминий-НК Al ₂ O ₃ , алюминий-НК SiC	180
5.2.9.	Применение	182
5.3.	Композиционные материалы на основе магния	182
5.3.1.	Mg-Be	182
5.3.2.	Mg-SiC.....	184
5.3.3.	Mg-Ti	185
5.4.	Композиционные материалы на основе титана.....	186
5.4.1.	Ti-Be	187
5.4.2.	Ti-SiC.....	188
5.4.3.	Титан-борсик	191
5.4.4.	Ti-Al ₂ O ₃	194
5.4.5.	Применение	194

5.5.	Композиционные материалы на основе меди.....	195
5.5.1.	Cu-W	195
5.5.2.	Cu-C.....	198
5.5.3.	Применение	199
5.6.	Композиционные материалы на основе никеля	199
5.6.1.	Ni-W.....	199
5.6.2.	Ni-Al ₂ O ₃	209
5.6.3.	Ni-Si ₃ N ₄	214
5.6.4.	Ni-SiC	214
5.6.5.	Ni-C.....	216
5.6.6.	Применение	218
6.	Эвтектические композиционные материалы	220
6.1.	Общая характеристика	220
6.2.	Ориентационные и структурные характеристики	222
6.3.	Методы и условия получения эвтектических КМ.....	224
6.3.1.	Методы направленной кристаллизации	224
6.3.2.	Условия образования направлений эвтектической структуры.....	225
6.3.3.	Условия образования волокнистой и пластинчатой структуры.....	227
6.4.	Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия	228
6.5.	Эвтектические композиционные материалы на основе титана и ниобия	232
7.	Технология и свойства композиционных материалов на полимерной матрице (ПКМ).....	234
7.1.	Полимеры.....	234
7.2.	Наполнители ПКМ.....	242
7.2.1.	Порошкообразные наполнители.....	243
7.2.2.	Волокнистые наполнители.....	248
7.3.	Получение полимерных композиционных материалов и изделий из них	250
7.4.	Углепластики.....	255
7.4.1.	Выбор полимерной матрицы	255
7.4.2.	Выбор углеродных волокон и наполнителей.....	256
7.4.3.	Методы формования углепластиков.....	261
7.4.4.	Свойства углепластиков.....	262
8.	Углерод-углеродные композиционные материалы.....	269
8.1.	Кристаллические формы углерода.....	270

8.2.	Объемные структуры на основе углеродных волокон.....	273
8.3.	Матрицы УУКМ.....	276
8.3.1.	Пиролитический углерод	277
8.3.2.	Стеклоуглерод	281
8.3.3.	Углерод на основе пеков	286
8.4.	Технология получения УУКМ.....	289
8.4.1.	Газофазный способ	289
8.4.2.	Жидкофазный способ	294
8.4.3.	Комбинированный способ	300
8.5.	Свойства углерод-углеродных композиционных материалов	300
8.6.	Применение	305
9.	Применение композиционных материалов.....	311
9.1.	Применение КМ в автомобилестроении	311
9.2.	Применение КМ в гражданской авиации	313
9.3.	Применение КМ в военных самолетах	315
9.4.	Применение КМ в космических летательных аппаратах	324
9.5.	Композиционные материалы в судостроении	325
9.6.	Применение КМ для изготовления спортивных изделий.....	326
9.7.	Другие области применения КМ.....	328
9.8.	Современные технологии создания композиционных материалов	330
10.	Теоретические основы конструирования композиционных материалов	342
10.1.	Модули нормальной упругости в направлении оси волокна и в перпендикулярном направлении	344
10.2.	Коэффициент Пуассона и модуль сдвига для однонаправлено армированных композиционных материалов	347
10.3.	Прочность КМ, армированных непрерывными и дискретными волокнами	349
10.3.1.	Композиционные материалы, армированные непрерывным волокном	349
10.3.2.	Композиционные материалы, армированные дискретными волокнами	359
10.4.	Статистическая прочность композиционных материалов.....	368
10.5.	Формирование и развитие трещин в КМ	376
10.6.	Прочность КМ на сжатие	381
11.	Методы контроля свойств композиционных материалов.....	384
11.1.	Методы определения механических свойств армированных КМ	384
11.1.1.	Растяжение	385
11.1.2.	Сжатие	388
11.1.3.	Сдвиг	391
11.1.4.	Изгиб.....	392
11.2.	Испытания кольцевых образцов.....	400

11.2.1. Растяжение.....	401
11.2.2. Сжатие.....	402
11.3. Анализ структуры КМ и механизмов ее разрушения.....	403
11.3.1. Микроскопический анализ.....	403
11.3.2. Фрактографический анализ.....	404
12. Межфазное взаимодействие в композиционных материалах.....	405
12.1. Термодинамическая и кинетическая совместимость компонентов.....	406
12.2. Виды межфазного взаимодействия.....	410
12.4. Типы связей между компонентами.....	416
12.5. Процессы диффузии между компонентами КМ.....	417
12.5.1. Уравнения Фика.....	417
12.5.2. Диффузия через плоскую поверхность.....	419
12.5.3. Диффузия в среде со сферической симметрией.....	423
12.5.4. Диффузия в среде с цилиндрической симметрией.....	425
12.6. Смачивание и растекание.....	429
12.6.1. Поверхностное натяжение.....	441
12.6.2. Поверхностная энергия твердых тел.....	444
12.6.3. Свободная поверхностная энергия на границе твердое тело – жидкость.....	448
12.6.4. Смачивание в системах «твердые металлы – жидкие металлы».....	453
12.6.5. Смачивание в системах «тугоплавкие соединения – жидкие металлы».....	454
Заключение.....	471
Библиографический список.....	472