

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. Шлятин*

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. 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-В 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 «тугоплакие соединения – жидкие металлы».....	454
Заключение.....	471
Библиографический список.....	472

ПРЕДИСЛОВИЕ

Упрочнение металлов, полимеров и керамики различной природы высокопрочными и высокомодульными волокнами и частицами из веществ с высокой энергией межатомной связи является одним из перспективных направлений современного материаловедения. Применение армированных волокнами и частицами композиционных материалов (КМ) способствует решению ряда проблем, связанных с кардинальным повышением эксплуатационных характеристик высокопрочных и жаропрочных конструкционных материалов и созданию материалов с качественно новыми физическими свойствами. Использование КМ в технике связано с разработкой новых принципов конструирования ряда ответственных высоконагруженных изделий и повышением их технологичности.

В настоящее время КМ широко используется при производстве летательных аппаратов, в машиностроении, приборостроении, энергетике, электронной, радиотехнической, электротехнической промышленности, транспорте, медицине, строительстве и других отраслях народного хозяйства.

В последние годы в Российской Федерации проводятся исследования по разработке новых КМ с металлическими, полимерными и углеродными матрицами, организовано производство их полуфабрикатов и конечных изделий. Накоплен значительный опыт в различных областях технологии (плазменной, лазерной, парогазовой, жидкофазной, твердофазной и др.), используемой при получении армирующих волокон, барьерных и технологических покрытий на них, полуфабрикатов КМ в виде лент, прутков, труб и листов.

За последние годы опубликовано большое количество отечественных и зарубежных работ, посвященных вопросам химии, физики, механики, технологии и применению КМ. Наиболее полные сведения о них представлены в фундаментальном энциклопедическом восьмитомном издании «Композиционные материалы» под общей редакцией Л. Браутмана и Р. Крока (перевод с английского), изданного в СССР в 1976–1987 гг. и в фундаментальном шеститомнике «*Soviet Advanced Composites Technology Series*», выпущенным издательством Chapman and Hall в 1994–1996 гг. в Лондоне на английском языке под редакцией академика И. Н. Фридляндера и J. H. Marshall. Авторы этого издания крупные отечественные ученые. Редактирование отдельных томов осуществлено А. Г. Братухиным, В. С. Боголюбовым, В. И. Трефиловым, И. Н. Фридляндером, Р. Е. Шапиным, В. И. Костиковым, С. И. Загайновым, Г. Е. Лозино-Лозинским. К сожалению, это издание до сих пор не переведено на русский язык, несмотря на то,

что в нем на хорошем научном уровне описаны огромные достижения отечественной науки и техники в области общей технологии композитов, технологии и свойствах керамических и углеродных композитов, металлматричных и полимерных КМ, технологии и свойствах армирующих волокон, а также в области конструирования конечных изделий из КМ.

Наряду с этим имеется очень мало учебной литературы по этому очень важному для современной науки и технике вопросу.

Настоящее учебное пособие написано применительно к учебным дисциплинам для студентов, обучающихся по специальностям 150108 «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия», 150701 «Физико-химия процессов и материалов».

Поскольку отразить все аспекты КМ в одном учебном пособии невозможно, автор стремился осветить те проблемы, которые представляют наибольший интерес и требуют серьезной подготовки, однако не выходящей за пределы основных дисциплин учебных планов инженерных ВУЗов.

Учебное пособие может быть использовано студентами металлургических и машиностроительных ВУЗов, магистрами, аспирантами, слушателями курсов повышения квалификации и инженерно-техническими работниками, занимающимися разработкой композиционных материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Естественные волокнистые материалы известны с далеких времен. Достаточно внимательно посмотреть на растительные и животные вещества, имеющиеся на земле, чтобы увидеть, что армированные композиционные материалы уже давно используются самой природой. Кость, волосы, ногти на пальцах являются примерами этих материалов. Кость представляет собой композиционный материал на основе минерального апатита и белка коллагена. Дерево представляет собой композиционный материал на основе целлюлозы и лигнина. Однако реализовать принцип упрочнения волокнами при создании конструкционных материалов удалось сравнительно недавно. По мере развития металлургии и строительного дела появились железобетонные конструкции, в которых роль армирующего элемента отведена стальным пруткам, а роль матрицы, передающей нагрузку – бетону.

Затем прогресс в химии привел к появлению высокопрочных стеклянных, углеродных, борных, карбидокремниевых, оксидных и разнообразных органических волокон и полимерных материалов. На их основе были разработаны и получили широкое применение в технике разнообразные КМ – стеклопластики, угле- и боропластики и гибридные комбинации из них. Появился новый класс конструкционных материалов, с помощью которых практически впервые удалось одновременно реализовать комплекс самых противоположных свойств – высокую прочность и жесткость при растяжении и сжатии, высокие предел выносливости, работу разрушения и низкую удельную плотность.

Если традиционные методы упрочнения (благодаря легированию твердого раствора, фазовым превращениям с образованием метастабильных пересыщенных твердых растворов или гетерофазных дисперсных систем, в частности, с равномерно распределенными тонкодисперсными выделениями частиц упрочняющей фазы) позволяют получать конструкционные материалы с удельной прочностью не более 20–30 км и пределом усталости не выше 30 % от предела прочности, то упрочнение волокнами повышает эти характеристики соответственно до 50–70 км и 70 %. Изменение направления расположения волокон в разных слоях КМ позволяет регулировать их свойства в плоскости армирования.

Благодаря разработке волокнистых КМ появилась возможность создавать элементы конструкций с заранее заданными свойствами, высокой эффективностью по массе и высокой технологичностью, что, естественно, привело к ка-

чественным изменениям в авиационной, судостроительной и других отраслях промышленности [1–3,7].

Однако армированные волокнами пластмассы обладают рядом недостатков – низким сопротивлением сдвигу матрицы, относительно невысокой прочностью связи волокон с матрицей, невозможностью использования их для работы при повышенных температурах, низким сопротивлением эрозии при воздействии газовых потоков, недостаточно длительной стойкостью в контакте с водой и во влажной атмосфере и т. д. Поэтому особое внимание конструкторов и материаловедов в последние годы было обращено на разработку КМ с металлическими матрицами, лишенных указанных ранее недостатков. Эта задача оказалась значительно более сложной по двум основным причинам. Первая из них связана с более сильным по сравнению с полимерами реакционным взаимодействием металлов с материалом волокон, вторая обусловлена значительно большим различием физико-механических свойств компонентов, входящих в КМ.

Температура изготовления КМ с металлическими матрицами обычно выше, чем с матрицами из органических смол. Поэтому проблема химической и термомеханической совместимости компонентов в этих КМ значительно более серьезная как в научном, так и в технологическом плане. Наиболее простые пути ее решения следующие:

- 1) использование вариантов технологии с низкими температурами компактирования КМ, преимущественно в твердом состоянии;
- 2) применение термодинамически и химически стойких барьерных слоев между компонентами в тех случаях, когда не удается использовать компоненты, которые взаимно термодинамически стабильны или находятся в равновесии;
- 3) выбор компонентов по возможности с меньшей разницей коэффициентов термического расширения;
- 4) использование для матриц сплавов с пластичностью, достаточно высокой для релаксации напряжений при компактировании, последующих переделах и эксплуатации.

При выборе процесса получения КМ и оптимизации его технологических параметров следует одновременно учитывать необходимость обеспечения следующих условий: полное уплотнение КМ с равномерным распределением волокон в матрице, образование прочной связи между компонентами, ограничение развития химического взаимодействия между ними из-за опасности образования хрупких промежуточных фаз недопустимой толщины, предупреждение дробления волокон, производительность, простоту и технологичность конструкции, возможность последующего соединения ее элементов и т. д.

КМ с металлическими матрицами имеют ряд неоспоримых преимуществ, которые делают их весьма перспективными для использования в конструкциях, работающих в экстремальных эксплуатационных условиях: высокие удельные прочность, жесткость, вязкость разрушения, малую чувствительность к изменениям температуры и тепловым ударам, высокую стойкость против коррозии и эрозии, малую чувствительность к поверхностным дефектам, высокие демпфирующие свойства, электро- и теплопроводность, технологичность при конструировании, обработке и соединении, хорошую воспроизводимость свойств [3, 18].

В настоящее время для снижения анизотропии механических свойств КМ с однонаправленным и ортогональным армированием в качестве матрицы используют конструкционные сплавы повышенной прочности. Иногда применяют полиматричные КМ, в которых для повышения прочности под углом к основным направлениям армирования используют поочередно слои матрицы из сплавов с различными механическими свойствами.

По сравнению с двумя другими видами КМ с металлическими матрицами (слоистыми и упрочненными дисперсными частицами) КМ, армированные волокнами, позволяют получать механические и специальные физические свойства более высокого уровня.

По принципу упрочнения к классу КМ, упрочненных волокнами, относятся также естественные КМ, получаемые методом направленной кристаллизации сплавов эвтектического состава и ориентированного роста в твердом состоянии, например эвтектоидных колоний в сталях. Кроме того, к числу волокнистых КМ можно отнести и материалы, армированные нитевидными кристаллами [3, 7, 27].

К этому классу КМ относятся материалы, в которых упрочняющим элементом являются наночастицы и нановолокна, разработанные в последние годы.

Глава 1.

КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Цели и задачи создания композиционных материалов (КМ)

В широком смысле понятие композиционный материал (КМ) (его синонимами являются композит, композиция) – включает в себя любой материал с гетерогенной структурой (т. е. состоящий из двух и более фаз).

Такое определение позволяет отнести к числу КМ подавляющее большинство применяемых в технике материалов. Действительно, почти все металлические сплавы содержат несколько фаз, которые либо создаются намеренно, либо образуются в результате наличия в металле вредных примесей. Например, обычную сталь, согласно этому определению, можно рассматривать как КМ, состоящий из двух фаз – феррита и цементита. То же можно сказать о многих керамических и полимерных материалах. Понятие еще более расширится, если КМ рассматривать на молекулярном или атомном уровнях. В этом случае мы будем иметь дело с КМ из молекул или атомов. Значит, это определение КМ нуждается в уточнении, что мы и сделаем позже [1–3, 104].

Первым создателем КМ была сама природа. Множество природных конструкций (стволы деревьев, кости животных, скелеты насекомых, зубы людей) имеют характерную волокнистую структуру.

Человечество еще на заре своего существования применяло принцип КМ в своих целях. Сооружая жилища, наши далекие предки в глину для кирпичей добавляли солому или тонкие стебли бамбука и получали армированный материал повышенной прочности. Они знали, что лук из нескольких слоев дерева прочнее лука, не имеющего в своей конструкции границ раздела.

Таких примеров можно привести много, однако это были хоть и удачные, но случайные находки.

Наука о КМ зародилась относительно недавно. Примером научного подхода к созданию КМ можно считать появление железобетона, гальванических покрытий и стеклопластиков.

Как известно, бетон отлично сопротивляется сжатию и плохо выдерживает растягивающие нагрузки. Композиция из бетона и стальной арматуры, обладающая высокой прочностью на растяжение, объединяет в одном материале по-

ложительные свойства обоих компонентов. Железобетон можно отнести к числу первых образцов армированной керамики.

С позиций современного материаловедения армированный композиционный материал принято определять как материал, состоящий из металлической или неметаллической матрицы (основы) с заданным распределением в ней упрочнителя (волокон, дисперсных частиц и др.), обеспечивающих эффективное использование индивидуальных свойств составляющих композиции [13, 29].

Другое определение КМ выглядит так. Армированным композиционным считают такой материал, который:

- а) асоздан человеком (в отличие от природных КМ);
- б) состоит из двух или более компонентов, различающихся по химическому составу и разделенных границей;
- в) имеет свойства, отличные от свойств компонентов;
- г) имеет состав, форму и расположение компонентов, запрограммированные и полученные в процессе создания материала.

1.2. Классификация композиционных материалов по виду материала матрицы, ориентации и типу арматуры, назначению

Армированные КМ можно классифицировать по следующим признакам [3, 29]. По материалу матрицы (материаловедческий принцип) все КМ можно разбить на три группы: композиции с металлической матрицей (металлические композиционные материалы (МКМ)), с полимерной (полимерные композиционные материалы (ПКМ)) и с керамической (керамические композиционные материалы (ККМ)).

Полимерные КМ обычно называют по материалу армирующих волокон. ПКМ, армированные стеклянными волокнами, называются стеклопластиками (стекловолокнистами), металлическими – металлопластиками (металловолокнистами), органическими – органопластиками (органоволокнистами), борными – боропластиками (бороволокнистами), углеродными – углепластиками (углеволокнистами), асбестовыми – асбопластиками (асбоволокнистами) и т. п.

В отношении металлических и керамических КМ пока нет четко установленных правил присвоения названий. Чаще других сначала пишут материал матрицы, затем – материал волокна. Например, обозначение Cu-W относится к КМ с Cu-матрицей и W-волокнами; Al_2O_3 -Mo – к КМ на основе Al_2O_3 с арматурой из Mo-волокон. Мы будем пользоваться такими обозначениями, но в литературе иногда встречается другое: сначала указывается материал волокна, а затем – матрицы.

В зависимости от исходного структурного и фазового состояния матричного материала различают МКМ с порошковой, литой и листовой матрицей. Композиционные материалы, набираемые из чередующихся слоев волокон и тонких листов матричного материала, называют иногда КМ типа сэндвич. Для получения ККМ чаще всего используют матрицу в виде порошка [1, 3, 25].

По ориентации арматуры КМ подразделяются на изотропные и анизотропные (конструкционный принцип).

К изотропным, т. е. имеющим одинаковые свойства во всех направлениях, относятся дисперсноупрочненные и хаотично армированные материалы. В первом случае упрочняющие элементы имеют примерно равноосную форму, во втором упрочнение осуществляется частицами удлиненной формы, хаотично ориентированными в пространстве. В качестве таких частиц используют отрезки волокон или нитевидные кристаллы; при этом КМ получаются квазиизотропными, т. е. анизотропными в микрообъектах, но изотропными в объеме всего изделия.

К анизотропным, т. е. свойства которых различны в разных направлениях, относятся материалы, волокна которых ориентированы в определенных направлениях – однонаправленные, слоистые и трехмерноармированные. Анизотропия КМ конструкционная – ее специально закладывают в КМ для изготовления конструкций, где она наиболее желательна. В отличие от такой анизотропии существует технологическая анизотропия, возникающая при пластической деформации изотропных материалов, и физическая анизотропия, присущая кристаллам в связи с особенностями строения их кристаллической решетки.

Однонаправленными материалами называют материалы с ориентацией волокон 1:0 (дробь показывает отношение числа слоев волокон в продольном и поперечном направлениях), двумерноармированные слоистые КМ с взаимно перпендикулярной укладкой волокон обозначают дробями 1:1, 1:2; 1:3; 3:4 и т. п. Слоистые КМ со звездной укладкой, волокна которых в смежных слоях образуют между собой угол 60° , называют материалами с укладкой 1:1:1. Трехмерноармированные КМ получают армированием матриц волокнами в трех взаимно перпендикулярных направлениях или объемными тканями.

По типу арматуры (конструкционный принцип) КМ подразделяются на: волокнистые (упрочненные непрерывными или короткими волокнами, нитевидными кристаллами, жгутами, ровницей), дисперсноупрочненные (полученные путем введения в матрицу дисперсных частиц-упрочнителей), слоистые материалы (созданные путем прессования, литья, пропитки или прокатки разнородных материалов, в которых арматура может быть в виде лент, сеток различного плетения).

По способу получения (технологический принцип) полимерные КМ можно разделить на литейные, прессованные и намоточные [3, 33]. Полимеры с хаотичной структурой обычно получают литьем и прессованием, а с ориентированной – намоткой и прессованием. Металлические КМ по этому способу делят на литейные и деформируемые. Литейные получают, пропитывая арматуру расплавленным матричным сплавом, либо применяя направленную кристаллизацию сплавов эвтектического состава с выделением упрочняющей фазы непосредственно из расплава (так называемый метод *in situ* – в себе, на месте пребывания). Для получения деформируемых МКМ применяют спекание, горячую штамповку или прессование, взрывное прессование, электролитическое, химическое или парогазовое осаждение, плазменное и газоплазменное напыление и др. Большинство из этих твердофазных методов, исключая динамические, применяют и для получения керамических КМ [3, 43].

По назначению (эксплуатационный принцип) КМ можно разделить на материалы общеконструкционного назначения (различные несущие конструкции самолетов, ракет, судов, автомобилей, двигателей, сосудов высокого давления и др.), жаропрочные (для лопаток турбин, камер сгорания и других изделий, работающих при повышенных температурах), термостойкие (для изделий, эксплуатируемых в условиях резких теплосмен, например для облицовки каналов МГД-генераторов), фрикционные и антифрикционные (подшипники скольжения, шестерни и др.), ударопрочные (броня самолетов, танков и т. п.), теплозащитные и КМ со специальными свойствами (электрическими, магнитными, ядерными, оптическими и др.).

1.3. Требования, предъявляемые к армирующим волокнам и материалу матриц

Волокна используются в качестве арматуры КМ. Они должны обладать небольшой плотностью, высокой прочностью во всем интервале рабочих температур, технологичностью, минимальной растворимостью в матрице, высокой химической стойкостью, отсутствием фазовых превращений в зоне рабочих температур и быть нетоксичными при изготовлении и эксплуатации. Для армирования применяют НК (усы), металлическую проволоку, неорганические и органические волокна. НК имеют диаметр от долей микрометра до нескольких микрометров и длину от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Широко в качестве армирующих элементов конструкционных КМ они не используются [3, 13, 29, 43].

Высокопрочная металлическая проволока из стали, вольфрама, молибдена и других металлов, хотя и имеет большую плотность и меньшую прочность,

чем усы, благодаря своей технологичности, широкой доступности к сравнительно невысокой стоимости, используется в качестве арматуры, особенно для КМ на металлической основе, намного чаще, чем НК. Полукристаллические неорганические волокна, как и металлическая проволока, выпускаются промышленностью в больших количествах. Их недостатком является высокая чувствительность к механическим повреждениям, однако малая плотность, высокая прочность, химическая стойкость углеродных, борных, стеклянных, карбидокремниевых, кварцевых и других волокон позволяют широко использовать их для армирования пластмасс и металлов. Органические волокна используются для армирования полимерных матриц [3, 13, 37–43].

Роль матрицы в армированных КМ заключается в придании изделию необходимой формы и создании монолитного материала. Объединяя в одно целое многочисленные волокна, матрица позволяет композиции воспринимать различного рода внешние нагрузки: растяжение (как в направлении армирования, так и перпендикулярно ему), сжатие, изгиб, сдвиг и др. В то же время матрица должна принимать участие в создании несущей способности композиции, обеспечивая передачу усилий на волокна. За счет пластичной матрицы осуществляется также передача усилий от разрушенных или дискретных (коротких) волокон соседним волокнам и уменьшение концентрации напряжений вблизи различного рода дефектов. Матрица служит и защитным покрытием, предохраняющим волокна от механических повреждений и окисления.

Глава 2.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Методы определения механических свойств армированных КМ

Новые КМ разрабатывают обычно в два этапа. На первом этапе – расчетном – анализируют предполагаемые условия нагружения конструкции из КМ и оценивают возможности материала, рассчитывая его упругие константы, прочность и другие физико-механические свойства. Следует отметить, что такие расчетные формулы получены только для простейших случаев нагружения, которые на практике редко встречаются в чистом виде. И даже в этих случаях при расчете, как правило, влияние возможных факторов, в частности технологических, учесть не удается. Поэтому на втором этапе – экспериментальном – исследуют свойства КМ и выбирают оптимальные технологические варианты их получения. Желательно максимально использовать арсенал аналитических методов расчета, чтобы свести к минимуму экспериментальные исследования, отличающиеся обычно большой трудоемкостью [3, 13, 29, 43].

Определение механических свойств КМ имеет ряд особенностей по сравнению с аналогичным процессом для обычных изотропных материалов. Эти особенности связаны, в первую очередь, с анизотропией свойств КМ.

Анизотропные материалы нуждаются в определении большего числа упругих и прочностных характеристик, чем традиционные изотропные машиностроительные материалы. Например, для выявления всех девяти упругих постоянных ортотропного материала нужно испытать на одноосное растяжение (сжатие) шесть видов образцов. Но в зависимости от назначения материала количество подлежащих определению параметров можно и уменьшить. В некоторых случаях достаточно провести испытания двух-трех видов образцов.

Специфическая структура армированных КМ требует учитывать особенности их поведения при различных видах нагружения. Так, при одноосном растяжении или сжатии КМ могут иметь место сдвиговые деформации, тогда как у изотропных материалов это явление не наблюдается.

При испытаниях анизотропных материалов приходится обращать особое внимание на такие характеристики, которые при испытаниях обычных материалов, как правило, не учитываются, например, само понятие «*межслойный сдвиг*» для изотропного материала не имеет смысла, тогда как для многих КМ

прочность при межслойном сдвиге – одна из наиболее важных характеристик, от которой зависят эксплуатационные качества КМ [3, 7].

Для анизотропных КМ такие обычные понятия, как прочность, жесткость, теплопроводность и другие, теряют смысл, если указываются в отрыве от направления.

В некоторых случаях формулы, применяемые при расчете механических характеристик изотропных материалов, оказываются неприменимыми для анизотропных.

Рассмотрим особенности испытаний армированных КМ при растяжении, сжатии, сдвиге и изгибе.

2.1.1. Растяжение

Испытание материалов на одноосное растяжение – традиционно самый распространенный вид механических испытаний. При растяжении ортотропных КМ в направлении главных осей симметрии можно определить модули упругости, пределы прочности и коэффициенты Пуассона в этих направлениях [3, 104].

Особенность испытаний армированных материалов на растяжение заключается в том, что у них более резко, чем у обычных выражены концевые эффекты, связанные с неравномерностью распределения напряжений по длине образца. Чтобы избежать влияния мест захвата на результаты испытаний и обеспечить однородное напряженное состояние на измеряемой базе, приходится существенно увеличивать длину рабочей части образцов.

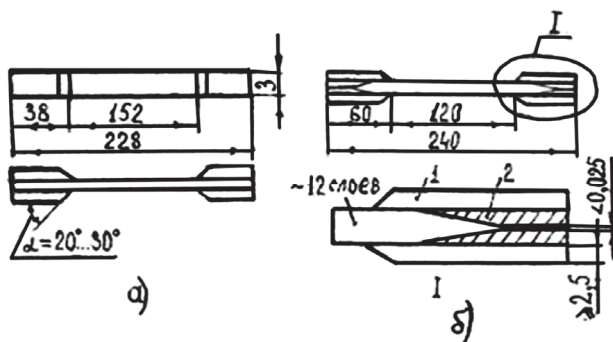


Рис. 2.1. Образцы-полоски для испытаний боропластиков на растяжение – с накладками из стеклотекстолита (а) и комбинированные (б):

1 – стеклотекстолит; 2 – алюминий

Для испытаний армированных пластиков форма образцов предусмотрена стандартами. Для армированных металлов методика испытаний не разработана. Однако, поскольку в них анизотропия свойств обычно выражена меньше, чем в

композициях на полимерной основе, размеры и форму образцов, применяемых для испытаний пластмасс, можно использовать и для испытаний армированных металлов. Экономически это не всегда оправдано, и в настоящее время на повестке дня стоит вопрос о разработке рациональной формы образцов для механических испытаний армированных металлических материалов [3, 13, 29, 43].

Испытания на одноосное растяжение проводят на плоских и трубчатых образцах. Плоские образцы по форме можно разделить на полоски и двухсторонние лопатки.

Полоски (рис. 2.1) обычно используют при испытании вдоль направления армирования; они наиболее просты по форме и обеспечивают стабильность измерений. Недостатки образцов-полосок: трудно надежно закрепить полосу в захватах испытательной машины; при небольшой длине и ширине образца нелегко предотвратить проскальзывание или раздавливание его в захватах. Чтобы частично устранить эти недостатки, к полоске приклеивают или приваривают накладки из материала с большей пластичностью и меньшей жесткостью, чем испытываемый материал. На боропластики, например, рекомендуется наклеивать стеклотекстолит, на углепластики – накладки из древесного шпона. Толщину накладок рекомендуется делать в 1–3 раза большей толщины испытываемого материала, их длину и ширину следует выбирать достаточными для того, чтобы воспринимаемое ими разрывное усилие было больше разрывного усилия рабочей части образца.

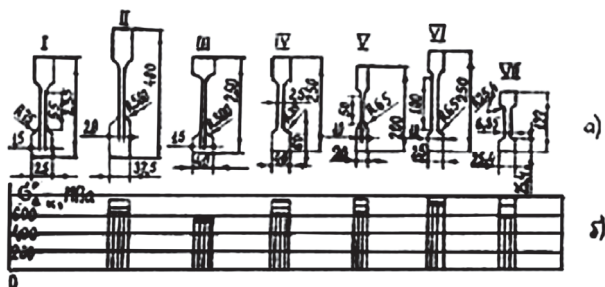


Рис. 2.2. Типы двухсторонних лопаток для испытаний стеклопластиков на растяжение (а) и полученные для них значения минимальной или средней и максимальной прочности ($\sigma_{в}^P$)_к (б):

I – по ГОСТ4649-55 (сопоставимых данных нет);

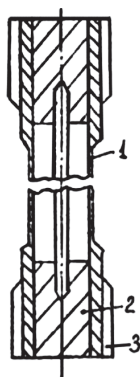
II – по Эриксону и Норрису; III – короткий образец по Эриксону и Норрису; IV, V – удлиненный образец по DIN53455/1; VI – измененный образец по DIN53455/2; VII – по Дину и Макс-Гарри

Образцы в форме двухсторонних лопаток (рис. 2.2) уменьшают вероятность разрушения в местах крепления и гарантируют разрушение в рабочей части. Их

целесообразно использовать при испытаниях на растяжение перпендикулярно к слоям арматуры.

Особое внимание нужно обращать на точность установки образцов в захватах, чтобы устранить влияние изгиба образцов на измеряемые прочность и жесткость КМ [8–11, 94]. Для этого в головках образцов по оси их сверлят отверстия, в которые вставляют затем фиксирующие пальцы. Одновременно фиксирующие пальцы предотвращают проскальзывание в захватах при креплении в них образца. Отверстия должны находиться на достаточно большом расстоянии от концов головок, чтобы исключить разрушение последних от сдвиговых напряжений.

Экспериментально установлено, что эффективный модуль Юнга таких многослойных образцов растет с увеличением ширины образцы, асимптотически приближаясь к модулю Юнга одного слоя [3, 49, 102]. При испытании широких образцов КМ с высокомодульными волокнами трудно обеспечить однородность напряженного состояния по всей ширине образца. Поэтому часто вместо плоских используют трубчатые образцы (рис. 2.3), которые можно рассматривать как образцы бесконечной ширины.



*Рис. 2.3. Схема крепления в захватах трубчатого образца:
1 – образец; 2 – металлическая пробка; 3 – захваты*

Результаты, полученные при осевом растяжении плоских и трубчатых образцов, часто не совпадают. Причина этого – различие в технологии получения образцов (плоские получают обычно прессованием, а трубчатые – намоткой) и нетождественность схем напряженного состояния (есть и другие, второстепенные, причины). Поэтому сравнивать между собой результаты испытаний плоских и трубчатых образцов не рекомендуется.

Формулы для определения модулей упругости, пределов прочности и коэффициентов Пуассона при растяжении армированных КМ используют те же, что и при растяжении обычных материалов.

Модуль упругости рассчитывают по формуле:

$$E = (\Delta P / F) \cdot (l / \Delta l),$$

где:

ΔP – приращение нагрузки в пределах упругой деформации;

F – площадь поперечного сечения рабочей части образца;

l – длина рабочей части образца;

Δl – деформация образца на базе l при изменении нагрузки на ΔP .

Для определения предела прочности σ_e используют соотношение

$$\sigma_e = P_p / F,$$

где:

P_p – разрушающее усилие.

Коэффициенты Пуассона находят по формуле

$$\mu = (\Delta l_n / l_n) \cdot (l_{np} / \Delta l_{np}) = \varepsilon_n / \varepsilon_{np},$$

где:

Δl_n – абсолютная поперечная деформация образца на базе l_n ;

Δl_{np} – абсолютная продольная деформация на базе l_{np} .

Относительные деформации ε_n и ε_{np} можно измерить непосредственно тензодатчиками.

2.1.2. Сжатие

Прочность и жесткость анизотропных армированных материалов при сжатии определяют по тем же формулам, что и при растяжении. Однако простота и аналогия с растяжением здесь только кажущиеся, так как механизмы разрушения КМ при сжатии и растяжении отличаются друг от друга [3, 102].

Одна из основных причин разрушения армированных материалов под действием сжимающих нагрузок – это потеря устойчивости волокнами. Она может произойти из-за слабого сопротивления КМ сдвиговому напряжению, либо из-за выпучивания слоев арматуры, расположенных вблизи боковых поверхностей образца. В последнем случае на диаграммах P - Δl наблюдаются характерные перемены и использование таких диаграмм для определения показателей жесткости и прочности может привести к ошибочным результатам. Значительно исказить результаты может неточная установка образцов, неправильный выбор их размеров

и формы, приводящие к неоднородному напряженному состоянию в рабочей части образца.

Подход к определению прочности и упругих констант при сжатии должен быть дифференцированным. Определяя модули упругости, используют длинные образцы, имеющие достаточно однородное поле напряжений в рабочей части. Для определения прочности можно применять более короткие образцы (рис. 2.4), хотя и в этом случае размеры их могут влиять на показатели прочности. У образцов в форме куба со стороной 12 мм прочность при сжатии оказывается в $1,5$ раза ниже, чем у образцов в виде тонких пластин $78 \times 18 \times 2$, и почти в 2 раза ниже, чем у образцов – лопаток таких же размеров. Объясняется это тем, что в коротких образцах деформации по длине рабочей части неравномерны, поперечная деформация образцов стеснена трением в опорных поверхностях. В длинных же образцах ограничение деформации в опорах значительно меньше влияет на поведение материала в рабочей зоне.

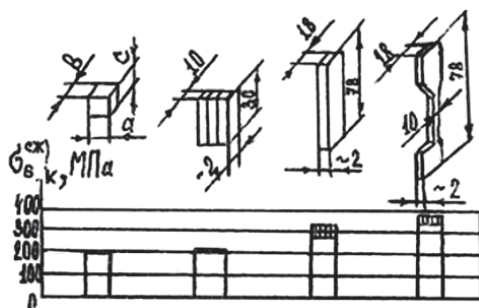


Рис. 2.4. Прочность при сжатии $(\sigma_{сж}^{сжс})_к$ образцов разной формы (заитрихован разброс экспериментальных данных)

При испытаниях на сжатие применяют параллелепипеды, двусторонние лопатки и образцы с круглым поперечным сечением [1–3, 104]. Рекомендации по выбору размеров образцов есть только для полимерных КМ.

Образцы-параллелепипеды следует применять, измеряя в условиях сравнительно небольших нагрузок упругие постоянные материалов, нагружаемых вдоль главных осей. Ширину b выбирают в диапазоне $13...30\text{ мм}$, длину l рассчитывают так, чтобы гибкость образца $\lambda = l / \sqrt{J_{\min} \cdot F}$ находилась в интервале $11...15$ (J_{\min} – минимальный момент инерции; F – площадь поперечного сечения образца). Чтобы предотвратить смятие концов образца, на них наклеивают накладки, материал которых выбирают так же, как и при испытаниях на растяжение.

Образцы-параллелепипеды используют и для определения характеристик при сжатии образцов с ориентацией волокон под углом 45° к сжимающей

нагрузке. В этом случае, чтобы устранить влияние концевых эффектов, нужно выдержать соотношение $l/b \geq 3$.

Двусторонние лопатки типа изображенных на рис. 3.2 имеют четко выраженную рабочую часть. Их используют, измеряя жесткость и прочность КМ с различной ориентацией арматуры. При испытаниях тонких образцов для предотвращения их выпучивания применяют специальные приспособления, поддерживающие широкие поверхности образца призматическими выступами или мягкими наполнителями, не стесняя деформации в другом поперечном направлении. Чтобы исключить смятие торцов, на концы образца иногда наклеивают тонкие металлические накладки или наконечники.

Наконечники из металла или других материалов используют и при испытаниях образцов с круглым поперечным сечением, которые обеспечивают меньший разброс значений прочности и жесткости. Такие образцы применяют обычно, испытывая армированные металлы и легко обрабатываемые полимерные КМ (например, углепластики) [4, 95, 104].

При испытании на сжатие очень важно обеспечить параллельность торцов. Тангенс угла между осью образца и направлением приложения нагрузки не должен превышать $0,001$. Как правило, у полимерных и металлических КМ твердость волокон значительно больше твердости матрицы, из-за чего не удастся получить гладкие опорные поверхности образца – концы волокон выступают над поверхностью матрицы. Чтобы обеспечить полный контакт между торцами образца и пуансоном испытательной установки, рекомендуется изготавливать пуансоны из мягкой стали. Применение наконечников на образцах также способствует улучшению условий испытаний.

Прочность некоторых КМ при сжатии ниже, чем при растяжении, так как при сжатии тонкие волокна не успевают полностью реализовать свою высокую прочность из-за потери устойчивости. Но, если диаметр волокон большой (100 мкм и более) и они имеют высокую жесткость, а следовательно, и хорошую устойчивость, прочность КМ при сжатии может оказаться выше, чем при растяжении, как это и имеет место у боропластиков.

2.1.3. Сдвиг

КМ на полимерной и металлической основах обычно состоят из сравнительно малопрочной, низко модульной матрицы и высокопрочных, высоко модульных волокон. Для такого типа материалов характерно слабое сопротивление сдвиговым напряжениям. В первую очередь это относится к армированным пластикам [3, 37, 91, 104].

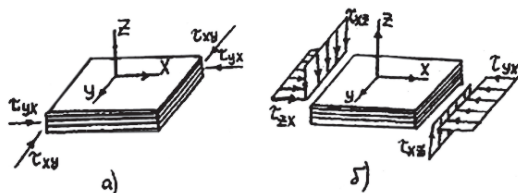


Рис 2.5. Схема сдвига в КМ с ориентированной структурой; а – в плоскости укладки арматуры ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$); б – межслойного ($\tau_{xz} = \tau_{zx}$)

В КМ с ориентированной структурой различают два вида сдвиговых деформаций (рис. 2.5): сдвиг в плоскости укладки арматуры, происходящей под действием касательных напряжений τ_{xy} и τ_{yx} (рис. 2.5, а), и межслойный сдвиг, обусловленный действием касательных напряжений τ_{xz} и τ_{zx} (рис. 2.5, б). Основное влияние на модули сдвига и сдвиговую прочность оказывает матрица.

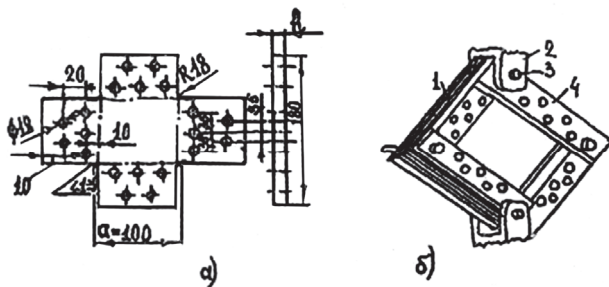


Рис. 2.6. Образец (а) и стандартный шарнирный четырехзвенник (б) для испытания армированных материалов на сдвиг:
1 – образец; 2 – захват; 3 – ось шарнира; 4 – подвижное звено

При испытаниях на сдвиг в плоскости укладки арматуры определяют модуль сдвига G_{xy} и сдвиговую прочность τ_{xy} . Один из наиболее распространенных методов определения их – метод перекашивания пластин в шарнирном четырехзвеннике (рис. 2.6) Крестообразную пластину – образец (рис. 2.6, а) закрепляют шпильками с 4-х сторон в шарнирном четырехзвеннике (рис. 2.6, б), который растягивается силой P вдоль одной из диагоналей пластины. Модуль сдвига G_{xy} определяют по формуле:

$$G_{xy} = \left[P / (a \cdot h \sqrt{2}) \right] \cdot \left[(1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) / (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right],$$

где:

P – растягивающая нагрузка;

a – размер стороны рабочей части пластины (сторона $a = 100$ мм);

h – толщина рабочей пластины;

ε_1 и ε_2 – относительные деформации пластины вдоль диагоналей растяжения и сжатия соответственно.

Сдвиговую прочность τ_{xy} в плоскости листа рассчитывают из соотношения:

$$\tau_{xy} = P_p / F = P_p / (a \cdot h \sqrt{2}).$$

У рассмотренных конструкций образца и четырехзвенника есть существенный недостаток – в углах рабочей части возникает концентрация напряжений, а у мест крепления возможно выпучивание образцов. При испытаниях сильно анизотропных материалов это приводит к погрешностям. Для таких материалов лучше изготовить образцы в виде пластин с пропилами, а испытания проводить на несколько модернизированных четырехзвенниках.

2.1.4. Изгиб

Изгибными испытаниями изотропных материалов обычно определяют модуль упругости E_u и предел прочности σ_u при изгибе [3, 25, 104]. При этом используют известные из курса сопротивления материалов зависимости между экспериментально измеряемыми нагрузками P и соответствующими им прогибами ω образцов-балок. Например, при трехточечном изгибе стержня (рис. 3.7, а) модуль E_u и прочность σ_u определяют по формулам:

$$E_u = -P \cdot l^3 / (48 \cdot J \cdot \omega_{\max}); \quad (2.1)$$

$$\sigma_u = (3/2) \cdot \left[(P_p \cdot l) / (b \cdot h^2) \right], \quad (2.2)$$

где:

P – текущая нагрузка, соответствующая прогибу ω_{\max} в середине пролета балки;

l – расстояние между опорами;

b – ширина образца;

h – его высота;

J – момент инерции поперечного сечения стержня.

Кроме нормальных, в изгибаемой балке действуют и касательные напряжения, влияние которых на прочность и жесткость изотропных материалов пренебрежимо мало.

Уравнения (2.1) и (2.2) не учитывают возможность межслойных сдвигов, поскольку для изотропного материала само понятие слоев не имеет смысла – он равнопрочен во всех направлениях. Наблюдаемая на практике некоторая анизотропия свойств у реальных гомогенных материалов, связанная с влиянием пластической деформации, неравномерной кристаллизацией и т. п., обычно выражена значи-

тельно слабее, чем у армированных материалов, и ею при использовании указанных зависимостей можно пренебречь. Композиционный армированный материал представляет собой по сути дела составную конструкцию, одним из слабых мест которой является низкая сдвиговая жесткость и прочность в некоторых направлениях. Поэтому применение к ним обычных формул теории изгиба, не учитывающих структурных особенностей, может привести к грубым ошибкам.

Разрушение изотропных материалов при изгибе, как правило, происходит под действием нормальных напряжений. Армированные анизотропные композиции при трехточечном изгибе в зависимости от размеров образца могут разрушаться как от нормальных, так и от касательных напряжений. В последнем случае формула (2.2) для определения прочности не применима, поскольку фактически определяется уже не прочность при изгибе, а прочность $\tau_{сдв}$ при межслойном сдвиге, равная

$$\tau_{сдв} = (3/4) \cdot (P_p / b \cdot h). \quad (2.3)$$

Таким образом, при изгибных испытаниях в зависимости от характера разрушения образца можно определить прочность или по касательным, или по нормальным напряжениям. На практике в образце всегда действуют оба вида напряжений и для анизотропных материалов, определяя свойства при изгибе, следует учитывать их взаимное влияние.

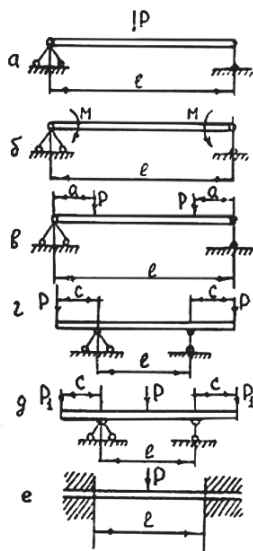


Рис. 2.7. Схемы нагружения образцов при испытании на изгиб:
 а – трехточечная; б – чистый изгиб; в, г – четырехточечная;
 д – пятиточечная; е – с заземленными концами

Рассмотрим существующие методы испытаний КМ на изгиб.

Трехточечный изгиб

Наиболее распространен такой его вид, когда свободно опирающийся на две опоры образец нагружен в середине пролета сосредоточенной силой P (рис. 2.7, а) [3, 41]. Рассчитывая модуль упругости слоистых КМ, следует пользоваться уточненными зависимостями, учитывающими влияние сдвиговых, деформаций и связывающими максимальный прогиб w_{max} балки посередине пролета с приложенной силой P , истинным модулем упругости $E_{u\text{ ист}}$ и модулем межслойного сдвига $G_{м.с.}$:

$$\omega_{max} = \left[-Pl^3 / (48E_{u\text{ ист}} \cdot I) \right] \cdot \left[1 + \alpha \cdot (h/l)^2 \cdot (E_{u\text{ ист}} / G_{м.с.}) \right], \quad (2.4)$$

где:

α – коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения балки (для прямоугольного сечения $\alpha \approx 1,2$);

остальные обозначения те же, что и в уравнении (2.1).

Сопоставив уравнения (2.1) и (2.4), заметим, что истинный модуль $E_{u\text{ ист}}$ связан с фиктивным модулем E_u соотношением

$$I/E_u = I/E_{u\text{ ист}} + (1,2/G_{м.с.}) \cdot (h/l)^2. \quad (2.5)$$

Чем больше h/l образца и чем больше степень анизотропии материала, характеризующая отношением $E_{u\text{ ист}}/G_{м.с.}$, тем больше истинный модуль упругости $E_{u\text{ ист}}$ отличается от фиктивного E_u .

Для трехточечного изгиба удобнее уравнение (2.1) привести к виду

$$J/E_u = [4bh \cdot \omega_{max} / P \cdot h] \cdot (h/l)^2, \quad (2.6)$$

так как

$$J = bh^3/12,$$

где:

J – момент инерции поперечного сечения балки.

В результате единичного эксперимента по уравнению (2.4) модуль упругости вычислить нельзя, поскольку оно содержит две неизвестные величины: $E_{u\text{ ист}}$ и $G_{м.с.}$ (в процессе испытания измеряют ω_{max} и P). Чтобы получить значение $E_{u\text{ ист}}$ и $G_{м.с.}$, испытаниям подвергают несколько образцов одного и того же КМ с разным отношением h/l , а затем строят график зависимости E_u от h/l (рис. 2.8). В приведенных на графике координатах зависимость (4) изображается прямой, пересекающей ось ординат в точке, соответствующей $1/E_{u\text{ ист}}$; а тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс равен $1,2/G_{м.с.}$.

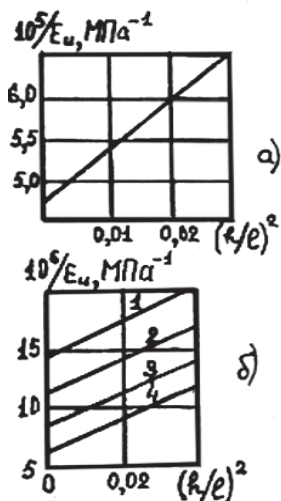


Рис. 2.8. Результаты экспериментов по определению модуля упругости (E_u) и модуля межслойного сдвига ($G_{м.с.}$) для стектекстолита ЭФ32-301 и боропластиков (б) (укладка волокон у боропластиков: 1 – 1:1:1; 2 – 1:1; 3 – 2:1; 4 – 1:0)

Аналитически по результатам экспериментов значения $E_{u\text{ усн}}$ и $G_{м.с.}$ определяют с помощью метода наименьших квадратов:

$$E_{u.\text{усн}} = (m \cdot S_{II} - S_1^2) / (S_{II} \cdot S_2 - S_1 \cdot S_2); \quad (2.7)$$

$$G_{м.с.} = 1,2 (m \cdot S_{II} - S_1^2) / (m \cdot S_{12} - S_{II} \cdot S_2), \quad (2.8)$$

где:

$$S_1 = \sum_{i=1}^m (h/l_i)^2; \quad S_{II} = \sum_{i=1}^m (h/l_i)^4;$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^m 1/E_{ui}; \quad S_2 = \sum_{i=1}^m (1/E_{ui}) \cdot (h/l_i)^2.$$

E_{ui} определяется по формуле (2.1) или (2.6).

m – число экспериментальных точек, равное сумме всех замеров h_n/l_i (здесь n – число измерений прогиба при $h/l_i = const$).

Другой способ вычисления модулей упругости $E_{u\text{ усн}}$ и $G_{м.с.}$ заключается в построении графика в координатах $l^2 - |\omega_{\max}|/l$, который в соответствии с уравнением (2.4) должен представлять собой прямую линию. При этом испытывают партию образцов одинакового поперечного сечения, но различной длины l . От-

резок, отсекаемый прямой от оси абсцисс равен $P/48 \cdot E_{u,ист} \cdot J$. Значения $E_{u,ист}$ и $G_{м.с.}$ находят или графически, или по методу наименьших квадратов [3, 25, 104].

Уточненные формулы для расчета максимальных нормальных и сдвиговых напряжений при изгибе следующие:

$$\sigma_u^* = \sigma_u \left[1 + (1/15)\chi^2 - (1/525)\chi^4 \right]; \quad (2.9)$$

$$\tau_{сдв}^* = \tau_{сдв} \left[1 + (1/60)\chi^2 + (1/12600)\chi^4 \right]. \quad (2.10)$$

σ_u и $\tau_{сдв}$ определяются по формулам (2.2) и (2.3) соответственно;

$$\chi = \frac{\pi \cdot h}{2l} \sqrt{\frac{E_u}{G_{м.с.}}} - \text{параметр анизотропии.}$$

Различие в результатах, полученных при использовании формул (2.2) и (2.9), (2.3) и (2.10) существенно только для КМ с очень большой конструкционной анизотропией (например, для боро- и углепластиков) и при больших отношениях h/l . Если величина $\chi < 1,2$, то без ущерба для практической точности можно вести расчет по формулам (2.2) и (2.3).

Из сопротивления материалов известно, что максимальные сдвиговые напряжения в изгибаемой по трехточечной схеме балке равны:

$$\tau_{\max} = 1/2 \left[\sigma / (l/h) \right].$$

Это справедливо как для изотропных, так и для анизотропных материалов, но у первых прочность при сдвиге высока, и от касательных напряжений они практически никогда не разрушаются. В слоистых же материалах с низкой прочностью при межслойном сдвиге максимальные касательные напряжения при малых отношениях l/h могут превысить предел прочности при сдвиге. В результате материал разрушается из-за расслоения вблизи нейтральной оси образца-балки, в отличие от разрушения под действием нормальных напряжений, сопровождаемого первоначальным разрывом поверхностных растянутых или сжатых слоев [3, 25].

На практике существует не одно значение, а интервал значений l/h , в котором наблюдается смешанное разрушение от обоих видов напряжений. Связано это с тем, что прочность при сдвиге имеет разброс из-за несовершенства технологии.

Для испытания армированных пластиков на межслойный сдвиг в стандартах рекомендуется выбирать образцы с $l/h \approx 5$, а для испытаний на чистый изгиб

с $l/h > 30 \div 40$ (см. дальше). В отношении армированных металлов рекомендаций по выбору размеров образцов нет. Размеры подбирают экспериментально.

Чтобы избежать ошибок в интерпретации полученных результатов, при испытании на изгиб всегда следует указывать вид разрушения образца. Поскольку в образцах с малым отношением l/h напряженное состояние неопределенно, результаты испытаний можно использовать только для качественного сопоставления сопротивления различных материалов межслойному сдвигу [3, 25].

Чистый изгиб

Образец-балка нагружен сосредоточенными изгибающими моментами по его концам (рис. 2.7, б). Практически этот изгиб осуществляют, поворачивая специальные блоки-головки, в которых закрепляют концы образца.

При чистом изгибе нет сдвиговых деформаций, напряженное состояние по всей длине образца однородно и разрушение из-за касательных напряжений исключается. В таких испытаниях можно определить модули упругости при растяжении E_p и сжатии $E_{сж}$, а также прочность σ_u .

Модули находят из следующих соотношений:

$$E_p = (M/W)(\varepsilon_p + \varepsilon_{сж}) / 2\varepsilon_p^2,$$

$$E_{сж} = (M/W)(\varepsilon_p + \varepsilon_{сж}) / 2\varepsilon_{сж}^2,$$

где:

M – изгибающий момент;

W – момент сопротивления изгибу поперечного сечения (для прямоугольного сечения размером $b \times h$ момент, $W = bh^2/6$;

$\varepsilon_p, \varepsilon_{сж}$ – относительные деформации крайних растянутых и сжатых волокон балки, измеряемые экспериментально соответственно.

Таким образом, испытания на чистый изгиб позволяют установить равномолекулярность материала при растяжении и сжатии. [3, 24, 47].

Модули упругости можно также рассчитать по результатам измерений: максимального прогиба W_{max} посередине образца:

$$E_u = M \cdot l^2 / 8 \cdot \omega_{max} \cdot J$$

или угла φ поворота концевое сечения стержня, входящего в момент инерции J_y :

$$E_u = M \cdot l^2 / 2J_y,$$

где:

$J = bh^3/12$ – момент инерции сечения образца.

Прочность при чистом изгибе рассчитывают по формуле:

$$\sigma_u = M_p / W ,$$

где:

M_p – разрушающий изгибающий момент.

Недостатками испытаний на чистый изгиб следует считать сравнительную сложность испытательного оборудования и необходимость использовать большие образцы (длина рабочей части обычно превышает 200 мм). Поэтому чаще для определения модулей упругости и прочности используют четырехточечную схему изгиба.

Все зависимости, используемые для обработки результатов испытаний КМ при чистом изгибе, совпадают с таковыми для изотропных материалов. [3, 25].

Четырехточечный изгиб

Изгиб по этой схеме можно проводить двумя способами. По первому способу (рис. 2.7, в) две одинаковые силы P прикладывают внутри пролета на одинаковом расстоянии a от опор; по второму (рис. 2.7, г) силы прикладывают вне пролета l на расстояниях c от опор.

Часто четырехточечный изгиб называют чистым изгибом. Действительно, на участке между точками приложения сил по первому способу и между опорами по второму – чистый изгиб имеет место. Однако на участках a (рис. 2.7, в) сдвиговые деформации существуют, и их влияние сказывается на прогибе балки. Более совершенен и надежен в этом отношении второй способ. Касательные напряжения здесь действуют на отрезках c , а вся рабочая часть образца между опорами испытывает чистый изгиб, при котором прогиб не зависит от сдвиговой жесткости материала. В этом случае связь между максимальным прогибом и приложенными силами выражается той же зависимостью, что и для изотропных материалов:

$$\omega_{\max} = P_{\max} \cdot c \cdot l^2 / 8 \cdot E_u \cdot J .$$

Опасность разрушения от касательных напряжений на участке a будет предотвращена, если выполняется условие:

$$a/h > \sigma_u / 4\tau_{\text{сдв}} .$$

Четырехточечный изгиб позволяет определить модуль упругости и прочность при изгибе на образцах меньшего по сравнению с чистым изгибом размера.

Существуют также методы испытаний на изгиб по пятиточечной схеме (рис. 2.7, д) и с защемлением концов образца (рис. 2.7, е). Но эти методы трудоемки, их анализ применительно к анизотропным КМ сложен и используют их редко. [25].

2.2. Испытания кольцевых образцов

Одним из самых распространенных методов получения труб, оболочек, колец и других изделий из полимерных КМ – намотка. Этот метод начинает применяться и при изготовлении металлических КМ. Испытания плоских образцов достаточно надежной информации о свойствах таких КМ не дают, поскольку технология изготовления намоточных изделий отличается от технологии получения плоских материалов. Учесть такие специфические особенности процесса намотки, как степень натяжения волокон, их искривление, наличие уплотняющего межслойного давления и внутренних напряжений, можно, испытывая кольцевые образцы. На них определяют все необходимые характеристики материалов – прочность и жесткость при растяжении, сжатии, сдвиге, изгибе и др. [25. 126]

Иногда кольцевые образцы называют NOL-образцами (NOL – сокращенное название Военно-морской лаборатории артиллерии США – Naval Ordnance Laboratory, в которой впервые были предложены эти образцы).

2.2.1. Растяжение

Испытания на растяжение проводят, нагружая жесткие полудиски, на которые одето испытываемое кольцо (рис. 2.9, а). Предварительно контактирующие поверхности колец и полудисков смазывают графитовыми или другими смазками для уменьшения трения. Модуль упругости кольцевых образцов рассчитывают по формуле:

$$E_0 = (\Delta P / 2bh) \cdot (\pi D / 2 \cdot \Delta P), \quad (2.11)$$

где:

b – ширина кольца;

h – его толщина;

D – средний диаметр;

a – прочность КМ при растяжении:

$$\sigma_a = P_a / (2 \cdot b \cdot h). \quad (2.12)$$

Размеры образцов чаще всего выбирают из конструктивных соображений. Для испытаний стеклопластиков американской стандарт рекомендует образцы с внутренним диаметром $146,05 \pm 0,05$ мм, толщиной $1,52 \pm 0,05$ мм или $3,18 \pm 0,05$ мм и шириной $6,35 \pm 0,13$ мм. С увеличением отклонения угла намотки от плоскости кольца ширина образца должна возрастать. [126].

Свойства, рассчитанные по формулам (2.11) и (2.12), строго говоря, истинными характеристиками КМ при растяжении считаться не могут, поскольку вблизи мест разреза полудисков в результате изменения кривизны кольца имеют место деформации растяжения и изгиба.

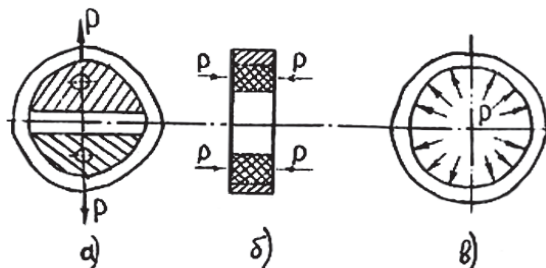


Рис. 2.9. Схемы погружения кольцевых образцов внутренним давлением с помощью жестких полудисков (а), резинового кольца (б) и жидкости (в)

При этом чем больше h/D и чем сильнее выражена анизотропия КМ, тем сильнее сказывается влияние изгиба. Поэтому такие испытания следует проводить лишь как сравнительные.

Описанного недостатка практически нет при нагружении NOL-образцов с помощью резинового кольца или жидкости. Схема испытания довольно сложная и этот вопрос мы рассматривать в настоящем пособии не будем [25. 126].

2.2.2. Сжатие

Сжатие кольцевых образцов осуществляется такими же способами, как и растяжение, – с помощью полудисков, резинового кольца или жидкости (рис. 2.10, а-в).

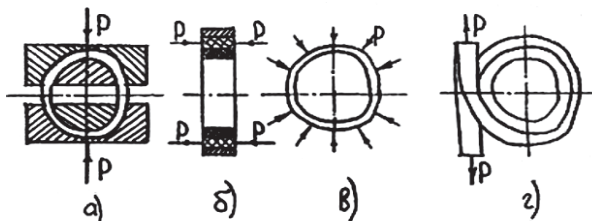


Рис 2.10. Схемы нагружения кольцевых образцов наружным давлением с помощью жестких полудисков (а), резинового кольца (б), жидкости или рычагов (в), стальной полосы (г)

Кроме того, используют сжатие с помощью упругой стальной ленты (рис. 2.10, г), которую обматывают вокруг кольца. В месте пересечения в ленте делают прорезь, которая позволяет замкнуть поверхность разрушения. Обычно в это место помещают прокладку, предупреждающую изгиб кольца. Прочность в этом случае рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{сж} = P_p / bh,$$

где:

P_p – разрушающее усилие, приложенное к концам ленты.

Отличительная особенность разрушения кольцевых образцов при сжатии в отличие от лопаток и полосок – возможность разрушения образцов по различным механизмам в зависимости от отношения h/D . При очень малых h/D образец разрушается под влиянием сжимающих напряжений (из-за потери устойчивости). В очень толстых образцах, кроме окружных сжимающих напряжений, существенное влияние на механические свойства оказывают радиальные и сдвиговые напряжения. Поэтому правильный выбор размеров образца имеет важное значение в определении характеристик КМ при сжатии. Для КМ рекомендуется использовать образцы с отношением $h/D \approx 0,05$ [126].

Кроме описанных схем нагружения, для определения комплекса механических свойств КМ, полученных намоткой, используют еще такие методы: 2-, 3- и 4-точечное нагружение целых колец, испытание на срез, изгиб, растяжение и кручение разрезанных колец, нагружение внутренним и внешним давлением труб и т. д.

2.3. Анализ структуры КМ и механизмов ее разрушения

2.3.1. Микроскопический анализ

Микроскопический анализ армированных КМ является важным методом определения их структуры, а следовательно, и эксплуатационных свойств. В процессе изготовления и эксплуатации КМ могут сформироваться разнообразные дефекты структуры: макро- и микропористость (включая различные трещины, скол на отдельных участках КМ, сдвиг, разрывы волокон), изменение фазового состава. Эти дефекты являются результатом конструкторского или технологического брака на этапе изготовления КМ или появляются благодаря воздействию механических нагрузок, температуры и среды в процессе эксплуатации. Следует подчеркнуть, что эти дефекты могут появиться не только в матрице и армирующей фазе, но прежде всего, на границе этих разнородных по химическим и физико-механическим свойствам материалов [25, 40].

Металлографический анализ армированных КМ позволяет определить размер пор, трещин, волокон и промежутков между ними, объемную долю структурных составляющих исследуемых образцов КМ. Методы количественного фазового и структурного анализа основываются на принципе Кавальери. Сущность этого принципа заключается в следующем. Плоские фигуры рассматриваются как состоящие из бесконечно большого числа взаимно параллельных линий, а тела – как состоящие из бесконечно большого числа взаимно параллельных плоскостей. Бесконечное число параллельных прямых располагаются между двумя прямыми, касающимися этих фигур с противоположных сторон. Если длины отрезков, отсекаемых контурами фигур на каждой из прямых, попарно равны друг другу или же находятся в определенном, постоянном для всех пар отрезков отношении, то и площади рассматриваемых фигур будут равны друг другу или будут находиться в том же отношении, что и отрезки. Если же отрезки будут равны между собой, то значит и площади их равны.

Аналогично изложенному принцип Кавальери используется для сравнения объемов двух образцов КМ или их структурных элементов с той лишь разницей, что прямые заменяют плоскостями, а отрезки – сечениями [40, 126].

Разрешающая способность метода не может превышать $0,2 \text{ мкм}$, что определяется длиной волны белого света, включающего спектр от 3800 \AA ($0,38 \text{ мкм}$) для фиолетовой до 7600 \AA ($0,76 \text{ мкм}$) для красной линии спектра. Длина волны белого света $0,55 \text{ мкм}$.

На практике используют светлопольное, темнопольное или поляризованное освещение для микроскопического анализа. При темнопольном освещении исходный луч проходит сначала на параболическое зеркало, затем на поверхность образца, а потом в объектив. Этот прием позволяет заметно повысить контрастность изображения и облегчает выявление отдельных деталей наблюдаемой поверхности.

При использовании поляризованного освещения свет, проходя через специальную пластину – поляроид, становится плоскополяризованным (электромагнитные колебания приобретают определенную ориентацию в плоскости поляризации). В методе используется тот факт, что металлы (и сплавы) с кубической решеткой оптически изотропны. А металлы и неметаллические включения, имеющие некубическую решетку – оптически анизотропны. При вращении поляроида в некубических материалах возникает контрастное изображение отдельных зерен (они как бы вспыхивают в микроскопе). Таким образом в многофазном КМ с помощью поляризованного света можно отличить фазы, с кубической решеткой от фаз с некубической решеткой. Значит, можно выявлять зеренное строение КМ и фазы, входящие в них, без травления образцов [126].

2.3.2. Фрактографический анализ

Фактографический анализ (изучение структуры поверхности разрушения, т. е. изломов) является эффективным средством анализа причин эксплуатационных повреждений в КМ.

При хрупком внутризеренном (транскристаллитном) разрушении происходит излом, при котором трещины распространяются обычно вдоль плоскости с малыми индексами. Чаще всего такое разрушение наблюдается в металлах с ГЦК-решеткой вдоль базисной плоскости, в металлах с ОЦК-решеткой разрушение сколом, как правило, не наблюдается. Очевидно, что плоскость разрушения меняет свою ориентировку от зерна к зерну, образуя так называемые фасетки (границы).

Внутрикристаллитный скол придает блеск излому, который кажется гладким при визуальном осмотре. В микроскопе видно, что скол не идеально гладок: на его поверхности обычно имеются ступеньки, придающие структуре вид ручьистых узоров. Следует отметить, что в поликристаллических образцах вид этих узоров при переходе от зерна к зерну меняется, так как плоскость разрушения меняет свою ориентировку. Это позволяет по фрактограмме измерить средний размер зерна в КМ.

По основным деталям рельефа (взаимное расположение, направление ступенек ручьистого узора) можно выявить очаги главной трещины. Чаще всего этот очаг располагается вблизи границы матрицы и армирующей фазы в КМ, в узлах пространственно-ориентированной арматуры, а также вблизи избыточных фаз на границе зерен. При фрактографическом анализе с использованием больших увеличений можно установить также очаги вторичных трещин и характер их локального расположения. [126]

При вязком разрушении излом имеет ямочную структуру. В результате происходит образование и рост множества микропор (микротрещин) при внутризеренном разрушении, сопровождающемся существенной пластической деформацией перемычек между развивающимися микропорами. Поверхность такого вида разрушения матовая, неровная, чаще всего со следами пластической деформации в виде грубых полос скольжения. Диаметр ямок колеблется в пределах $0,5...20$ мкм. По форме и глубине ямок можно судить о величине пластической деформации, схеме напряженного состояния и вязкости разрушения. Обычно ямки среднего размера оконтурены гребнями отрыва. Гребни отрыва часто имеют острый край и соответственно контрастное изображение. На гребнях отрыва могут наблюдаться сильно вытянутые ямки, а также плоские бесструктурные участки рельефа, напоминающие расслоение в плоскостях скольжения. При вязком разрушении зерна шероховатая ямочная поверхность раз-

рушения в общем случае не имеет сходства с поверхностями, видимыми на микрошлифах.

На поверхности разрушения КМ могут образовываться отдельные участки со структурой, типичной как для хрупкого, так и для вязкого разрушения. Это отражает переход от первоначального вязкого к хрупкому характеру развития трещины.

По технике фрактографического анализа различают макрофрактографию, т. е. изучение характеристик поверхности разрушения при увеличениях не более $\times 50$ и микрофрактографию, т. е. изучение рельефа излома КМ при увеличениях больше $\times 50$.

Универсальными возможностями обладает метод растровой электронной микроскопии, так как здесь возможно изучение поверхности изломов КМ как при малых, так и при больших увеличениях, причем с глубиной резкости примерно в 300 раз большей, чем у световой микроскопии [40].

Глава 3. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА АРМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Металлические волокна

Металлические проволоки являются одним из самых доступных волокон, которые по конструкционной прочности часто превосходят другие армирующие материалы. Они также более технологичны, выгодны с экономической точки зрения и наиболее надежны в эксплуатации. Благодаря высокой технологичности и пластичности тонкую металлическую проволоку можно перерабатывать текстильными методами в сетки различного переплетения, также используемые в качестве армирующего компонента.

Для легирования КМ применяются металлические проволоки из стали, вольфрама, молибдена, бериллия, титана, ниобия, никеля и других металлов и сплавов.

3.1.1. Стальная проволока

Наиболее часто для армирования КМ используется стальная проволока диаметром 20–1500 *мкм*, изготовленная из высокоуглеродистых и малолегированных, нержавеющей и мартенситностареющих сталей. Высокопрочная проволока из нержавеющей сталей – один из самых распространенных армирующих материалов для КМ, работающих в интервале температур 73–623 *К*. Ее преимущество по сравнению с проволокой из углеродистых сталей заключается в большей теплостойкости и наличии пассивной поверхности, слабо взаимодействующей не только с атмосферой, но и с матричными материалами [3, 20, 92].

Содержание углерода и легирующих компонентов углеродистых и малолегированных сталей приведены в таблице 3.1.

Содержание углерода и легирующих компонентов наиболее распространенных углеродистых и малолегированных сталей, применяемых для получения проволок

<i>Марка стали</i>	<i>Содержание, %</i>				
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
65	0,62–0,70	0,50–0,80	0,17–0,37	≤ 0,25	≤ 0,25
70	0,67–0,75	0,50–0,80	0,17–0,37	≤ 0,25	≤ 0,25
75	0,72–0,80	0,50–0,80	0,17–0,37	≤ 0,25	≤ 0,25
85	0,82–0,90	0,50–0,80	0,17–0,37	≤ 0,25	≤ 0,25
У7А	0,65–0,74	0,15–0,30	0,15–0,35	0	0
У9А	0,85–0,94	0,15–0,30	0,15–0,35	0	0
У10А	0,95–1,04	0,15–0,30	0,15–0,35	0	0
У11А	1,05–1,14	0,15–0,30	0,15–0,35	0	0
У12А	1,15–1,24	0,15–0,30	0,15–0,35	0	0

Нержавеющие стали по структуре, приобретаемой после термообработки, делятся на три класса: аустенитные, аустенитно-мартенситные и мартенситные (табл. 3.2 – 3.4). Способность мартенситно-старееющих сталей упрочняться в результате старения – свойство, ценное при использовании их в качестве армирующих волокон для КМ на основе легких сплавов. Поэтому при изготовлении, например КМ на алюминиевой основе, армированных волокнами из мартенситно-старееющих сталей, диффузионную сварку, прокатку или горячее прессование целесообразно проводить именно в том интервале температур, в котором такие армирующие волокна упрочняются. Высокопрочные стальные проволоки других классов при температуре формирования КМ разупрочняются [3, 20].