

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	17
Глава 1	
ВВЕДЕНИЕ	18
1.1. Введение	18
1.2. Полимеры в бытовых изделиях	18
1.2.1. Пластиковый чайник	19
1.2.2. Устройство видеокассеты (VHS)	21
1.2.3. Разборное полимерное кресло	22
1.2.4. Телефонная трубка	24
1.2.5. Резюме	25
1.3. Механические и оптические свойства полимеров	25
1.3.1. Образование трещин и разрушение шариковой ручки	25
1.3.2. Пластичность лент из полиэтилена низкой плотности	26
1.3.3. Оптические свойства компакт-дисков (CD) и полиэтиленовой пленки	27
1.3.4. Старение полимеров под действием солнечного света	28
1.3.5. Вязкоупругость пенопластовых покрытий	29
1.4. Идентификация полимеров	29
1.4.1. Маркировка для вторичной переработки	29
1.4.2. Внешний вид неокрашенного изделия	30
1.4.3. Плотность	30
1.4.4. Температура плавления	30
1.4.5. Модуль упругости	30
1.5. Особенности полимеров при переработке	32
1.5.1. Изделия, получаемые раздувом	32
1.5.2. Изделия, получаемые экструзией	33
1.5.3. Изделия, получаемые литьем под давлением	34



1.5.4. Изделия, получаемые термоформованием	35
1.5.5. Пленки, получаемые экструзией с раздувом	36
1.5.6. Бутылки, получаемые литьем под давлением с раздувом	36
1.6. Заключение	37

Глава 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА ПОЛИМЕРОВ	38
2.1. Введение	38
2.1.1. Масштабный фактор	38
2.1.2. Типы полимеров	38
2.1.3. Крупнотоннажные и конструкционные термопласты	39
2.1.4. Термореактивные полимеры и каучуки	40
2.2. Межмолекулярные связи в полимерах	41
2.2.1. Ковалентные связи	41
2.2.2. Ван-дер-ваальсовое взаимодействие	42
2.2.3. Водородные связи	44
2.2.4. Ионные связи	44
2.3. Полимеризация	44
2.3.1. Полимеры, получаемые радикальной полимеризацией	44
2.3.2. Поликонденсация	46
2.3.3. Молекулярно-массовое распределение	48
2.4. Регулярность цепи	51
2.4.1. Радикальная полимеризация стереорегулярных полимеров	51
2.4.2. Сополимеризация	53
2.4.3. Блок-сополимеры	54
2.5. Разветвленные и сшитые полимеры	55
2.5.1. Разветвление цепи	55
2.5.2. Термореактивные полимеры	56
2.5.3. Каучуки	58
2.6. Технология и экономика производства	59
2.6.1. Производство мономеров	59
2.6.2. Технологические процессы при полимеризации	62
2.6.3. Экономика и масштаб производства	63
2.7. Марки и характеристики крупнотоннажных полимеров	64



2.7.1. Полиэтилен	64
2.7.1.1. Плотность и индекс текучести расплава	66
2.7.2. Полипропилен	67
2.7.3. Поливинилхлорид	68
2.7.4. Полистирол	72
2.7.5. Добавки	72

Глава 3

СТРУКТУРА ПОЛИМЕРОВ	74
3.1. Введение	74
3.2. Моделирование формы макромолекул	75
3.2.1. Структура и конформация С—С-связи	75
3.2.2. Метод случайных блужданий по кристаллической решетке	76
3.3. Аморфные полимеры	78
3.3.1. Основные формы полимеров	78
3.3.2. Молекулярная масса и размер молекулы	79
3.3.3. Сетка зацеплений макромолекул в расплавах полимеров	82
3.3.4. Упругость полимерной цепи в сетчатой структуре	84
3.3.5. Каучуки	86
3.3.6. Температура стеклования	89
3.3.7. Микроструктура аморфных полимеров	91
3.3.8. Модуль упругости аморфных полимеров	93
3.4. Частично-кристаллические полимеры	95
3.4.1. Введение	95
3.4.2. Кристаллическая решетка	95
3.4.3. Модули упругости кристаллов	98
3.4.4. Форма кристаллов	99
3.4.5. Строение кристаллов	100
3.4.6. Сферолиты	101
3.4.7. Скорость кристаллизации	104
3.4.8. Степень кристалличности	105
3.4.9. Дифракция рентгеновских лучей	106
3.4.10. Ориентация кристаллической фазы	109
3.4.11. Заключение	112



Глава 4

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ	113
4.1. Введение	113
4.2. Модуль упругости	114
4.2.1. Модуль сдвига металлополимерных пружин	114
4.2.2. Сжатие многослойных пружин	116
4.2.3. Модуль упругости в направлении ориентации волокон	118
4.2.4. Предельные значения модуля упругости	119
4.3. Многослойные структуры	119
4.3.1. Жесткость при изгибе	119
4.3.2. Литье под давлением конструкционных пенопластов	121
4.4. Упрочнение каучуками	122
4.4.1. Упрочнение и структура	122
4.4.2. Модуль упругости и концентрация напряжений	123
4.4.3. Текучесть и возникновение трещин	125
4.4.4. Пластическое течение	127
4.5. Многофазные структуры	130
4.5.1. Блок-сополимеры	130
4.5.2. Литье под давлением сшивающегося полиуретана	131
4.5.3. Термозластопласты	133
4.6. Модуль упругости полиэтилена со сферолитной структурой	135
4.6.1. Механизмы деформации сферолитов	135
4.6.2. Модуль упругости полиэтилена со сферолитной структурой	137
4.7. Пенопласты	138
4.7.1. Получение пенополиуретана	138
4.7.2. Структура пенопласта с открытыми порами	139
4.7.3. Сжатие пенопластов с открытыми порами	140
4.7.4. Структура пенопласта с закрытыми порами	143
4.7.5. Сжатие поропапастов с закрытыми порами	144
4.8. Армирование короткими волокнами	145
4.8.1. Волокна и их ориентация	145
4.8.2. Модуль упругости	148
4.8.3. Прочность на растяжение	148



Глава 5

ПЕРЕРАБОТКА ТЕРМОПЛАСТОВ	151
5.1. Введение	151
5.2. Механизм теплопередачи	152
5.2.1. Теплопроводность	152
5.2.2. Конвекция	154
5.2.3. Число Био	155
5.2.4. Излучение	155
5.2.5. Разогрев расплава при вязком течении	156
5.3. Течение расплава термопластов	156
5.3.1. Сдвиговое течение	157
5.3.2. Продольное течение	158
5.3.3. Влияние молекулярной массы	160
5.3.4. Влияние температуры на течение расплава	162
5.4. Экструзия	162
5.4.1. Плавление и пластификация	162
5.4.2. Производительность экструдера	164
5.4.3. Стадия охлаждения	167
5.4.4. Плунжерная экструзия	168
5.5. Формование раздувом	168
5.5.1. Получение пленки экструзией с раздувом	169
5.5.2. Экструзия с раздувом	171
5.5.3. Литье с раздувом	173
5.5.4. Термоформование	175
5.6. Литье под давлением	179
5.6.1. Конструкция пресс-формы	179
5.6.2. Цикл литья	179
5.6.3. Контроль заполнения пресс-формы	182
5.6.4. Заполнение пресс-формы	184
5.6.5. Реакционно-литьевое формование	186
5.6.6. Формование пенопластов	189
5.7. Макетирование	190



Глава 6

ПЕРЕРАБОТКА ТЕРМОПЛАСТОВ В РАСПЛАВЕ	192
6.1. Введение	192
6.2. Изменение микроструктуры	192
6.2.1. Влияние скорости охлаждения на степень кристалличности и плотность	192
6.2.2. Эффекты напряжения в расплавах аморфных полимеров	194
6.2.3. Напряжения в расплаве частично-кристаллических полимеров	198
6.2.4. Сварные швы в полимерном изделии	200
6.3. Макроскопические эффекты	201
6.3.1. Усадка и коробление	201
6.3.2. Шероховатость поверхности	205
6.3.3. Остаточные напряжения в экструдатах	207
6.3.4. Остаточные напряжения в литьевых изделиях	209
6.4. Сплавление частиц и гранул полимеров	210
6.4.1. Смешение	210
6.4.2. Переработка порошка ПВХ	211
6.4.3. Переработка порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена	214
6.4.4. Переработка вспененного гранулированного полистирола	215

Глава 7

ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА	217
7.1. Введение	217
7.2. Линейные вязкоупругие модели	218
7.2.1. Модель Фойгта	218
7.2.2. Ползучесть в обобщенной модели Фойгта	221
7.2.3. Расчет релаксации напряжения	222
7.2.4. Температурная зависимость вязкоупругих свойств	224
7.3. Ползучесть	226



7.3.1. Расчет ползучести	226
7.3.2. Расчет линейной вязкоупругости	227
7.3.3. Расчет псевдоупругой ползучести	228
7.3.4. Восстановление и ползучесть при циклическом нагружении	229
7.4. Циклическая деформация	231
7.4.1. Анализ линейной вязкоупругости	231
7.4.2. Виброизоляция машин	234
7.4.3. Демпфирующие покрытия для металлических панелей	236
7.4.4. Полимеры с высокой демпфирующей способностью	238
Глава 8	
ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ	240
8.1. Молекулярный механизм пластического течения	240
8.1.1. Аморфные полимеры	240
8.1.2. Частично-кристаллические полимеры	242
8.2. Деформирование в различных напряженных состояниях	243
8.2.1. Образование шейки при растяжении	243
8.2.2. Пластичность при изгибе	248
8.2.3. Потеря устойчивости и пластическое течение при сжатии	249
8.2.4. Локальное пластическое течение при сжатии и твердость	251
8.2.5. Локализованное пластическое течение и задиры поверхности	252
8.2.6. Перфорация пленки	254
8.3. Пластическое течение при различных масштабах времени	255
8.3.1. Влияние скорости растяжения	255
8.3.2. Разрушение при ползучести	256
8.4. Ориентационное упрочнение	256
8.5. Микромеханизмы пластического течения	259
8.5.1. Крэйзинг	259
8.5.2. Энергетика роста крейза	261
8.5.3. Пластический коллапс пен	263



Глава 9

РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ	266
9.1. Введение	266
9.2. Характеристика поверхности разрушения	267
9.3. Зарождение трещины	270
9.3.1. Концентрация упругих напряжений	270
9.3.2. Предел текучести	272
9.3.3. Трещины в хрупких поверхностных слоях	275
9.3.4. Остаточные напряжения	276
9.3.5. Заключение	276
9.4. Рост трещины	276
9.4.1. Механика разрушения	276
9.4.2. Коэффициент интенсивности напряжения	279
9.4.3. Критическое значение коэффициента интенсивности напряжения K_{IC}	280
9.4.4. Текучесть в кончике трещины и модель Дагдейла	281
9.4.5. Разрушение толстых пластин в условиях плоской деформации	284
9.4.6. Разрушение тонких пленок в условиях плосконапряженного состояния	286
9.4.7. Влияние скорости растяжения	288
9.5. Ударные испытания	289
9.5.1. Ударные испытания по Изоду и Шарпи	290
9.5.2. Ударные испытания тонких пластин	291
9.5.3. Испытания на удар изделий	293
9.5.4. Инструментальные испытания на удар	294

Глава 10

ДЕСТРУКЦИЯ И ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	298
10.1. Введение	298
10.2. Деструкция при переработке	299
10.2.1. Полиолефины	299
10.2.2. Поливинилхлорид	300
10.2.3. Вода и полимеры, получаемые ступенчатой полимеризацией	302
10.3. Деструкция при повышенных температурах	302



10.3.1. Окисление полиолефинов	302
10.3.2. Гидролиз	305
10.3.3. Максимальная температура эксплуатации	307
10.4. Горение	308
10.4.1. Стадии горения	308
10.4.2. Испытания на огнестойкость	311
10.4.3. Антипирены и пламегасители	312
10.4.4. Огнестойкость кабелей и пенопластов	313
10.5. Атмосферное воздействие	313
10.5.1. Воздействие ультрафиолетового излучения	313
10.5.2. Влияние атмосферных условий	315
10.5.3. Защита от фотоокисления	316
10.5.4. Ускоренные испытания	319
10.6. Растрескивание под воздействием окружающей среды	321
10.6.1. Явление растрескивания	321
10.6.2. Набухание крейзов в жидкостях	322
10.6.3. Возникновение трещин и крейзов	323
10.6.4. Рост трещины в жидкой среде	325
10.6.5. Полное разрушение	326
Глава 11	
ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА	329
11.1. Газы	329
11.1.1. Растворимость	329
11.1.2. Равновесная диффузия газов	331
11.1.3. Нестационарная диффузия газов	333
11.1.4. Применение в упаковочных материалах	335
11.1.5. Металлические и керамические покрытия	338
11.1.6. Разделение газов	338
11.2. Жидкости	340
11.2.1. Бензобаки из полиэтилена высокой плотности	340
11.2.2. Экстракция добавок из полимеров пищевыми продуктами	342
11.2.3. Обратный осмос и мембраны для диализа	343
11.3. Твердые вещества	344
11.4. Оптические свойства	347



11.4.1. Преломление и отражение света	347
11.4.2. Рассеяние света	349
11.4.3. Волоконная оптика	351
11.5. Теплозащита	353

Глава 12

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	357
12.1. Объемное и поверхностное удельное сопротивление	357
12.2. Полимерные диэлектрики и полупроводники	360
12.2.1. Низковольтная изоляция	360
12.2.2. Высоковольтная изоляция	361
12.2.3. Статическая электризация	366
12.2.4. Пластиковые экраны электромагнитных волн	367
12.2.5. Полупроводящие полимеры для аккумуляторов и топливных элементов	370
12.3. Диэлектрические свойства	372
12.3.1. Диэлектрическая постоянная и диэлектрические потери	373
12.3.2. Потери при поляризации	374
12.3.3. Высокочастотная изоляция и конденсаторы	376
12.4. Гибкие переключатели и электреты	377
12.4.1. Пленочные переключатели	377
12.4.2. Электреты	378
12.4.3. Пьезоэлектрические пленки	379

Глава 13

КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ: ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ФОРМЫ	382
13.1. Введение	382
13.2. Выбор полимера	382
13.2.1. Системы автоматизированного выбора полимера	382
13.2.2. Сочетание свойств и выбор материалов	385
13.2.3. Обивка двери автомобиля	385
13.2.4. Трубчатая рама кузова автомобиля	386



13.3. Форма и жесткость изделия	387
13.3.1. Рифление	387
13.3.2. Ребра на литевых изделиях	388
13.3.3. Продольный изгиб ребер жесткости	392
13.3.4. Кручение балок постоянного поперечного сечения	392
13.3.5. Кручение балок непостоянного сечения	397
13.4. Формы литевых изделий	400
13.4.1. Постоянная толщина деталей	401
13.4.2. Уменьшение толщины детали при удалении от литника	402
13.4.3. Корпус инструмента	403
13.4.4. Пружинные выступы и защелки	403
13.4.5. Встроенные петли	404
13.5. Приборная панель автомобиля	405
13.5.1. Форма приборной панели	405
13.5.2. Испытания на удар с помощью модели головы	406
13.5.3. Совершенствование марок полимеров	406
13.5.4. Переработка	408

Глава 14

РАЗРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИКОВ	409
14.1. Введение	409
14.2. Трубопроводы для газа	409
14.2.1. Введение	409
14.2.2. Испытание на разрушение при ползучести	410
14.2.3. Выбор полимера	412
14.2.4. Расчет толщины стенки трубы	416
14.2.5. Заключение по конструкторским требованиям	422
14.2.6. Монтаж и соединение труб	423
14.3. Велосипедные шлемы	426
14.3.1. Введение	426
14.3.2. Биомеханические критерии травм головы	427
14.3.3. Геометрия шлема в месте удара	427
14.3.4. Конструкция подкладки шлема	430

14.3.5. Выбор пенопласта	432
14.3.6. Заключение	433
14.4. Носители информации на поликарбонатных дисках	433
14.4.1. Сохранение информации на полимерных дисках	433
14.4.2. Оптическая система хранения информации	434
14.4.3. Диски DVD	436
14.4.4. Требования к пластику и выбор полимера	437
14.4.5. Переработка поликарбоната	437
14.4.6. Контроль двулучепреломления	438
14.5. Заключение	441

Глава 15

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРОВ В СПОРТИВНЫХ
И МЕДИЦИНСКИХ ТОВАРАХ**

15.1. Введение	442
15.2. Альпинистские веревки	442
15.2.1. Введение	442
15.2.2. Гибкость веревки	443
15.2.3. Динамические нагрузки при падении	443
15.2.4. Конструкция и производство веревки	446
15.2.5. Выбор полимера	448
15.2.6. Оптимизация прочности и жесткости веревки	449
15.2.7. Влияние окружающей среды на долговечность веревки	450
15.2.8. Испытания веревки	451
15.2.9. Другие источники информации	452
15.3. Разработка контейнеров для крови	452
15.3.1. Введение	452
15.3.2. Выбор полимера для контейнеров крови	454
15.3.3. Пластификаторы ПВХ	454
15.3.4. Прозрачность контейнера	455
15.3.5. Требования к эластичности контейнера	456
15.3.6. Теплостойкость контейнера для проведения стерилизации	456
15.3.7. Прочность материала контейнера	456



15.3.8. Проницаемость	458
15.3.9. Переработка и сварка	459
15.3.10. Биосовместимость	459
15.3.11. Заключение	460
15.4. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен для суставных протезов	460
15.4.1. Введение	460
15.4.2. Марки СВМПЭ	461
15.4.3. Конструкция колпачка вертлюжной чашки	462
15.4.4. Стерилизация СВМПЭ перед имплантацией	463
15.4.5. Структура СВМПЭ и механические свойства	464
15.4.6. Биомеханика движения	465
15.4.7. Физиология смазки суставов	465
15.4.8. Механизм износа ПЭ	466
15.4.9. Реакция организма на продукты износа СВМПЭ	467
15.4.10. Повышение износостойкости ПЭ	468
15.4.11. Заключение	470
Список литературы	471
Приложение А	
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСЕЙ	477
А.1. Молекулярные модели диффузии	477
А.2. Дифференциальные уравнения диффузии	478
А.3. Решение дифференциальных уравнений	480
А.3.1. Постоянная поверхностная концентрация C_0 в полубесконечном теле	480
А.3.2. Постоянная поверхностная концентрация в плоском листе	482
Литература	484
Приложение Б	
АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ	485
Б.1. Скорость течения в каналах	485
Б.2. Сдвиговое течение на выходе из щелевой или цилиндрической насадки	486
Б.3. Представление данных о течении расплавов	489



Приложение В

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИКЕ НАГРУЖЕНИЯ	490
В.1. Изгиб балки	490
В.1.1. Напряжения и деформации при изгибе	490
В.1.2. Момент инерции и жесткость балки при изгибе	492
В.1.3. Момент инерции балок различного сечения	493
В.1.4. Прогиб балки	493
В.1.5. Потеря устойчивости стержня при осевом сжатии	494
В.1.6. Большие упругие прогибы балки	495
В.2. Двуосные напряжения и упругость при плоской деформации	495
В.3. Трубы под давлением	496

Приложение Г

ВОПРОСЫ	498
Глава 2	498
Глава 3	498
Глава 4	499
Глава 5	500
Глава 6	500
Глава 7	501
Глава 8	502
Глава 9	502
Глава 10	503
Глава 11	504
Глава 12	504
Глава 13	505

Приложение Д

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ К ГЛАВЕ 14	507
---------------------------------------	-----