

РОБЕРТ А. МЭЛЛОЙ

**КОНСТРУИРОВАНИЕ
ПЛАСТМАССОВЫХ ИЗДЕЛИЙ
ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Перевод с англ. под редакцией

канд. техн. наук, доц. **В. А. Брагинского**,
д-ра техн. наук, проф. **Е. С. Цобкалло**,
д-ра техн. наук, проф. **Г. В. Комарова**

Санкт-Петербург
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПРОФЕССИЯ
2006

УДК 678.06
ББК 34.42Англ
М97

М97

Мэллой Р. А.

Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / пер. с англ. яз. под. ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова — СПб.: Профессия, 2006. — 512 стр., ил.

ISBN 5-93913-081-X

ISBN 3-446-15956-8 (*Munich*)

ISBN 1-56990-129-5 (*New York*)

Книга является введением в конструирование изделий и посвящена основным вопросам и проблемам, возникающим в процессе проектирования и разработки. Цель издания — помочь конструктору в усовершенствовании функциональных элементов изделий, повысить их надежность и технологичность, улучшить внешний вид, увеличить рентабельность всего производства в целом. Рассмотрены вопросы выбора материалов, особенности процесса литья под давлением, быстрого прототипирования, экспериментального анализа напряжений и сборки изделий.

Книга адресована конструкторам, инженерам и технологам, занимающимся переработкой пластмасс.

УДК 678.06
ББК 34.42Англ

All right reserved. Carl Hanser Verlag, Munich/FRG.
Authorized translation from the original English language edition published by
Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

Все права защищены.

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

ISBN 5-93913-081-X

ISBN 3-446-15956-8 (*Munich*)

ISBN 1-56990-129-5 (*New York*)

© *Carl Hanser Verlag, Munich, 1994*

© Брагинский В.А., гл. 1, 2, 5, 2005

© Цобкалло Е.С., гл. 3, 4, 2005

© Комаров Г.В., гл. 6, 2005

© Изд-во «Профессия», 2006

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Обращение к читателю | 9 |
| Предисловие | 10 |
| 1. Введение | 11 |
| 1.1. Термопластичные материалы (термопласты) | 11 |
| 1.2. Терморезистивные материалы (реактопласты) | 13 |
| 1.3. Соотношение структуры и свойств | 14 |
| 1.4. Добавки для полимерных материалов | 18 |
| 1.5. Основные характеристики полимерных материалов | 18 |
| 1.6. Литература | 23 |
| 2. Особенности литья под давлением изделий из пластмасс (краткий очерк) | 24 |
| 2.1. Общие положения | 24 |
| 2.2. Заполнение формующей полости | 25 |
| 2.2.1. Факторы, связанные с литниковой системой | 25 |
| 2.2.2. Ориентация расплава при заполнении формующей полости | 32 |
| 2.2.3. Потери давления на стадии заполнения формующей полости | 40 |
| 2.2.4. Конструктивные способы регулирования (ускорения, ограничения) течения расплава в формующей полости | 55 |
| 2.3. Линии спая | 65 |
| 2.3.1. Общие положения | 65 |
| 2.3.2. Типы линий спая | 70 |
| 2.3.3. Учет особенностей термопластов при конструировании изделий со спаями | 73 |
| 2.3.4. Возможности улучшения эксплуатационных характеристик спая и внешнего вида поверхности изделия в области линий спая | 76 |
| 2.4. Усадка и коробление изделий, изготовленных литьем под давлением | 85 |
| 2.4.1. Общие положения | 85 |
| 2.4.2. Влияние толщины и разнотолщинности | 86 |
| 2.4.3. Диаграмма состояния пластмассы: давление–объем–температура (PVT-диаграмма) | 90 |
| 2.4.4. Линейная усадка отливки в форме | 94 |
| 2.4.5. Анизотропная усадка и деформация/коробление изделий | 98 |
| 2.5. Охлаждение и затвердевание | 109 |
| 2.6. Выталкивание изделия из формы | 113 |
| 2.6.1. Общие положения | 113 |
| 2.6.2. Углы уклона | 114 |
| 2.6.3. Влияние качества поверхностей матрицы и пуансона | 120 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 2.6.4. | Факторы, относящиеся к внешнему виду изделия | 125 |
| 2.6.5. | Поднутрения и отверстия | 126 |
| 2.6.6. | Предварительная оценка усилия выталкивания изделия | 133 |
| 2.7. | Некоторые специальные технологии литья под давлением изделий из термопластов | 136 |
| 2.7.1. | Литье под давлением с газом | 136 |
| 2.7.2. | Литье под давлением термопластов со вспениванием | 145 |
| 2.7.3. | Многокомпонентное литье под давлением | 152 |
| 2.7.4. | Литьевое прессование (компрессионное литье) | 155 |
| 2.8. | Литература | 157 |
| 3. | Конструирование и выбор материала | 161 |
| 3.1. | Общие положения | 161 |
| 3.2. | Процесс конструирования изделия из пластмассы | 165 |
| 3.3. | Стандартные тесты для проверки свойств полимерных материалов | 174 |
| 3.4. | Механические свойства полимерных материалов | 175 |
| 3.4.1. | Общие положения | 175 |
| 3.4.2. | Кратковременные зависимости напряжения от деформации | 176 |
| 3.4.3. | Механические свойства, зависящие от времени. Ползучесть | 185 |
| 3.4.4. | Механические свойства, зависящие от времени. Релаксация напряжений | 197 |
| 3.5. | Ударная прочность полимерных материалов | 200 |
| 3.6. | Усталостные свойства | 204 |
| 3.7. | Температурные свойства полимерных материалов | 205 |
| 3.7.1. | Термомеханические свойства материалов | 205 |
| 3.7.2. | Деформационная термостойкость под нагрузкой и температура размягчения по методу Вика | 209 |
| 3.7.3. | Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) | 210 |
| 3.7.4. | Старение при повышенных температурах | 211 |
| 3.7.5. | Горючесть | 212 |
| 3.8. | Свойства текучести расплава | 213 |
| 3.9. | Источники информации о свойствах пластмасс | 215 |
| 3.10. | Оценка материалов с использованием готовых отлитых образцов | 219 |
| 3.11. | Стандартные обозначения пластмасс | 220 |
| 3.12. | Литература | 222 |
| 4. | Структурное проектирование | 223 |
| 4.1. | Общие положения | 223 |
| 4.2. | Методология проектирования | 223 |
| 4.2.1. | Проектирование с использованием предшествующего опыта | 224 |
| 4.2.2. | Проектирование с помощью экспериментального подхода | 224 |
| 4.2.3. | Проектирование с использованием аналитического подхода | 225 |
| 4.3. | Задачи количественной оценки при проектировании | 229 |
| 4.3.1. | Упрощение геометрической формы изделия | 229 |
| 4.3.2. | Концентрация напряжений | 230 |
| 4.3.3. | Тип опоры | 234 |
| 4.3.4. | Условия приложения нагрузки | 236 |
| 4.3.5. | Свойства полимерных материалов | 240 |
| 4.3.6. | Коэффициент запаса прочности | 247 |
| 4.4. | Балки | 252 |
| 4.4.1. | Общие положения | 252 |
| 4.4.2. | Свойства плоской фигуры (поперечного сечения балок) | 254 |
| 4.4.3. | Использование усиливающих ребер для увеличения жесткости | 261 |
| 4.4.4. | Осевой момент инерции неоднородных материалов/структур | 268 |

| | |
|--|------------|
| 4.4.5. Пример расчета балки | 270 |
| 4.5. Плиты (пластины) | 285 |
| 4.5.1. Общие положения | 285 |
| 4.5.2. Задачи, возникающие в пластинах | 286 |
| 4.5.3. Пластины неравномерной толщины | 296 |
| 4.6. Оболочки. Сосуды давления | 297 |
| 4.6.1. Общие положения | 297 |
| 4.6.2. Тонкостенные сосуды, работающие под давлением | 299 |
| 4.6.3. Толстостенные сосуды, работающие под давлением | 302 |
| 4.7. Кручение | 302 |
| 4.7.1. Общие положения | 302 |
| 4.7.2. Кручение круглых стержней | 303 |
| 4.7.3. Деформация при кручении некруглых стержней | 307 |
| 4.8. Колонны (гибкие стержни) | 309 |
| 4.9. Динамические нагрузки | 311 |
| 4.9.1. Общие положения | 311 |
| 4.9.2. Усталостное нагружение | 311 |
| 4.9.3. Ударная нагрузка | 317 |
| 4.10. Литература | 320 |
| 5. Прототипирование: изготовление и использование прототипов пластмассовых изделий | 322 |
| 5.1. Прототипирование | 322 |
| 5.1.1. Технологии прототипирования | 322 |
| 5.1.2. Изготовление прототипов механической обработкой | 324 |
| 5.1.3. Некоторые технологии быстрого прототипирования | 330 |
| 5.1.3.1. Прототипирование методом фотополимеризации | 331 |
| 5.1.3.2. Лазерное спекание порошковых материалов | 336 |
| 5.1.3.3. Послойное наложение расплавленной полимерной нити | 338 |
| 5.1.3.4. Прототипирование склеиванием (ламинированием) слоев | 339 |
| 5.1.4. Имитация поверхности готового литьевого изделия на прототипе | 339 |
| 5.1.4.1. Цвет и качество поверхности готового литьевого изделия | 339 |
| 5.1.4.2. Технологии имитации поверхности готового литьевого изделия на прототипе | 341 |
| 5.1.5. Литье под низким давлением | 342 |
| 5.1.6. Формы для изготовления прототипов | 347 |
| 5.1.6.1. Опытные формы из эпоксидной смолы | 351 |
| 5.1.6.2. Корпусно-металлические формы | 352 |
| 5.1.6.3. Опытные литьевые формы, полученные механической обработкой | 354 |
| 5.1.6.4. Опыт изготовления прототипов пластмассовых изделий в оснастке для литья металлических сплавов | 355 |
| 5.1.7. Прототипы из вспененных пластмасс | 356 |
| 5.1.7.1. Точные копии изделий | 356 |
| 5.1.7.2. Прототипирование | 356 |
| 5.1.8. Координатно-измерительные машины | 358 |
| 5.1.8.1. Контактные системы измерения | 358 |
| 5.1.8.2. Бесконтактные системы измерения | 358 |
| 5.2. Использование прототипов для экспериментального анализа напряжений в изделиях | 359 |
| 5.2.1. Общие положения | 359 |
| 5.2.2. Метод хрупких (лаковых) покрытий | 360 |
| 5.2.3. Датчики деформации (тензодатчики) | 361 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.4. Испытания с помощью химических растворителей | 366 |
| 5.2.5. Фотоупругие испытания | 367 |
| 5.2.6. Оптические методы измерения напряжения | 370 |
| 5.3. Литература | 370 |
| 6. Сборка изделий, изготовленных литьем под давлением | 373 |
| 6.1. Общие положения | 373 |
| 6.2. Сборка с помощью прессового соединения | 376 |
| 6.2.1. Общие положения | 376 |
| 6.2.2. Параметры, связанные с выбором материала | 378 |
| 6.2.3. Проектирование прессовых соединений | 380 |
| 6.3. Сборочные узлы с замковыми соединениями | 384 |
| 6.3.1. Общие положения | 384 |
| 6.3.2. Типы замковых соединений | 385 |
| 6.3.3. Крючки, отлитые под давлением | 394 |
| 6.3.4. Проектирование замковых соединений | 398 |
| 6.4. Механические крепежные элементы | 404 |
| 6.4.1. Общие положения | 404 |
| 6.4.2. Винты | 405 |
| 6.4.2.1. Машинные винты и гайки | 406 |
| 6.4.2.2. Создающие резьбу винты | 410 |
| 6.4.2.3. Сборка с использованием вставок | 432 |
| 6.5. Сварка деталей из термопластов | 446 |
| 6.5.1. Общие положения | 446 |
| 6.5.2. Ультразвуковая сварка | 447 |
| 6.5.3. Вибрационная сварка трением | 466 |
| 6.5.4. Ротационная сварка | 469 |
| 6.5.5. Электромагнитная (индукционная) сварка | 472 |
| 6.5.6. Резисторная сварка | 474 |
| 6.5.7. Сварка нагретым инструментом | 474 |
| 6.5.8. Сварка нагретым газом | 477 |
| 6.5.9. Экструзионная сварка | 479 |
| 6.6. Клеевые соединения | 480 |
| 6.6.1. Общие положения | 480 |
| 6.6.2. Теория клеевых соединений | 483 |
| 6.6.3. Выбор клея | 492 |
| 6.7. Соединение с помощью растворителей | 495 |
| 6.8. Литература | 496 |
| Алфавитно-предметный указатель | 499 |

Обращение к читателю

Международное общество инженеров по производству, переработке и применению пластмасс (*SPE*) представляет книгу доктора Роберта А. Мэллоя «Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением». Во время работы в Массачусетском университете и в ходе многолетнего сотрудничества с подразделением литья под давлением ассоциации *SPE* доктор Мэллой проявил себя высококвалифицированным специалистом. Стиль изложения и понимание сущности предмета делает эту книгу полезной для инженеров-практиков, а также для студентов старших курсов и аспирантов.

Комитет издания технической литературы *SPE* долгое время финансирует книги, посвященные различным проблемам полимерных материалов. Участие комитета распространяется на различные аспекты: от выбора тем для обсуждения до подбора авторов. Однако постоянной составляющей этой работы является рецензирование окончательного варианта публикаций, чтобы гарантировать точность их технического содержания.

Техническая компетентность характеризует все аспекты деятельности *SPE*, а не только те, которые связаны с публикацией технической литературы, в частности, это относится к проведению научно-технических конференций и выполнению образовательных программ. Кроме того, ассоциация выпускает четыре периодических издания — *Plastics Engineering*, *Polymer Engineering and Science*, *Journal of Vinyl Technology* и *Polymer Composites*. Кроме того, публикуются труды конференций и другие избранные материалы. Все эти публикации также подвергаются процедуре тщательного редактирования.

Интеллектуальный ресурс, включающий 25 000 инженеров-практиков и технологов, делает *SPE* самой большой организацией в мире, специализирующейся в области пластмасс.

За дополнительной информацией можно обращаться по адресу: 14 *Fairfield Drive*, *Brookfield Center, Connecticut 06805*.

Исполнительный директор *Юджин Де Мишель*

Предисловие

Литье под давлением относится к одному из наиболее распространенных технологических процессов, которые используются для производства изделий из полимерных материалов (пластмасс). Данный способ изготовления обладает настолько высокой гибкостью, что его можно использовать как для получения очень небольших по размеру изделий, применяемых в электронике и медицине, до больших изделий, используемых в автомобилестроении и строительной отрасли. Рост в индустрии литья под давлением в значительной степени обеспечен появлением новых технологий литья под давлением и новых полимерных материалов.

К сожалению, конструирование изделий для литья под давлением может оказаться крайне трудной задачей из-за сложной геометрической формы изделий и трудностей, связанных с технологическим процессом литья. С большими трудностями сталкиваются даже опытные конструкторы, когда им приходится работать с новыми марками полимерных материалов, переработка которых отличается от традиционной технологии. Очень трудно сконструировать изделие, которое удовлетворяло бы заказчика со всех точек зрения: функциональности, перерабатываемости и внешнего вида. Процесс конструирования изделий включает в себя серию допущений и компромиссов, каждый из которых должен соответствовать основным производственным требованиям. Идеально, когда литые под давлением изделия разрабатываются в ходе параллельного проектирования, основные принципы которого рассматриваются в данной книге.

В книге описан комплексный подход к конструированию изделий из пластмасс, а также к выбору материалов. Такие проблемы общего характера, как прочность линии спая, коробление или трудности выталкивания изделий из литейной формы обсуждаются с точки зрения потенциально возможных конструкций изделия. Кроме того, описываются фундаментальные свойства полимерных материалов, структурное проектирование и проблемы получения прототипов изделий. В последнем разделе книги рассматриваются различные методы сборки деталей в изделия.

Книгу можно использовать в качестве иллюстрированного руководства и начального курса для конструкторов изделий из пластмасс. Автор надеется, что книга содержит полный обзор основных факторов, которые следует принимать во внимание при конструировании изделий из пластмасс, которые будут изготавливаться литьем под давлением.

1. Введение

Самой важной особенностью пластмасс является их универсальность. Большинство пластмасс — это синтетические высокомолекулярные материалы с высокой молекулярной массой. Все полимерные материалы можно разделить на термопластичные и термореактивные [1–6].

1.1. Термопластичные материалы (термопласты)

Термопласты, как правило, перерабатываются литьем под давлением. В настоящее время производится большое количество типов и марок термопластов, обладающих различными свойствами. Они могут быть и твердыми, и эластичными. Теоретически переработка термопластов подразумевает только физические фазовые изменения, поэтому они должны легко перерабатываться повторно.

Однако в процессе переработки в термопластах наблюдаются определенные химические изменения, например, возможны окисление и термическая деструкция, поэтому свойства повторно переработанного полимера не будут полностью эквивалентны свойствам исходного.

Существует несколько классификаций термопластов. Один из вариантов основан на особенностях макромолекулярной морфологии полимерных цепочек. В рамках этой классификации возможно термопласты разделить на аморфные, частично кристаллические и жидкокристаллические.

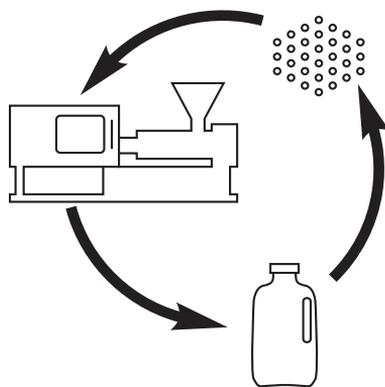


Рис. 1.1. Принцип повторной переработки (рециклинга) термопластов

Аморфные термопласты

В аморфных полимерах молекулы находятся в неупорядоченном состоянии в виде клубка (рис. 1.2). Когда аморфные полимеры нагреваются (например, в процессе пластикации в материальном цилиндре литейной машины), переплетенные молекулярные цепочки становятся более мобильными/активными. Затем происходит их постепенное «распутывание» и между ними увеличиваются межмолекулярные расстояния, что приводит к постепенному размягчению и расплавлению материала. Уровень активности макромолекул возрастает, материал размягчается, а силы притяжения между цепями молекул полимера (силы межмолекулярного взаимодействия) уменьшаются, так как расстояния между ними возрастают. После расплавления аморфному полимеру придают требуемую конфигурацию, заполняя им литевую форму, затем полимер охлаждается, и, как только макромолекулы полимера теряют свою подвижность, материал затвердевает, отливка становится твердой и прочной. К аморфным относятся такие термопласты, как полистирол (ПС), поликарбонат (ПК) и полиметилметакрилат (ПММА).

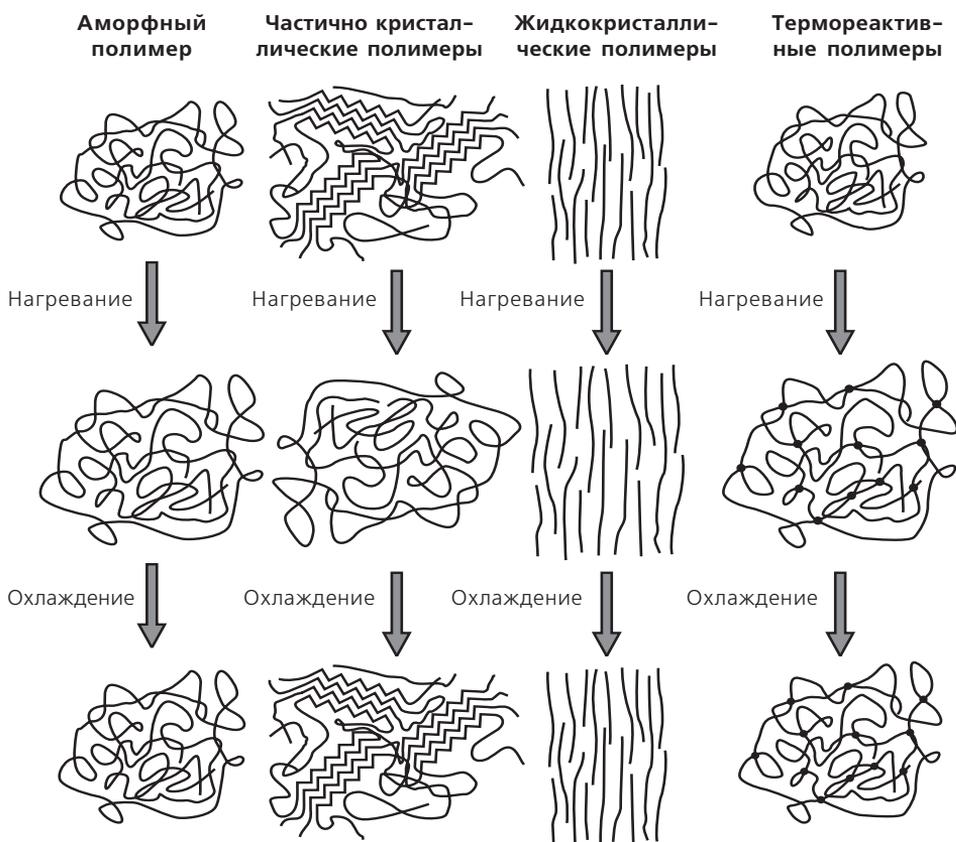


Рис. 1.2. Полимерные материалы могут быть термопластичными (аморфными, частично кристаллическими, жидкокристаллическими) и термореактивными [2]

Частично кристаллические термопласты

Некоторые макромолекулы полимеров имеют достаточно большое количество повторяющихся фрагментов. Такие упорядоченные зоны представляют собой кристаллы, которые формируются в процессе охлаждения находящегося в расплавленном состоянии термопласта. При повторном нагревании кристаллы сохраняют свою форму до тех пор, пока полимер не достигнет температуры (или температурного диапазона) расплавления кристаллов, при которой будет наблюдаться полное расплавление материала. В расплаве, или расплавленном состоянии, эти материалы имеют неупорядоченную структуру распределения молекул. Подобные термопласты называют частично кристаллическими, так как они содержат зоны как аморфного, так и кристаллизованного материала (рис. 1.2).

«Степень кристалличности» (процентное соотношение между объемами зон кристаллизованного и аморфного материалов) зависит как от химической структуры полимера, так и условий переработки (фактически от скорости, при которой расплавленный полимер охлаждается). Переменные параметры процесса, которые уменьшают скорость охлаждения, будут в общем случае определять степень кристалличности. К частично кристаллическим полимерам относятся полиэтилены (ПЭ), полипропилены (ПП) и полиамиды (ПА).

Жидкокристаллические термопласты

Как и частично кристаллические термопласты, жидкокристаллические термопласты в твердом состоянии имеют упорядоченную структуру. Однако, в отличие от обычных кристаллизующихся полимеров, жидкокристаллические полимеры представляют собой упорядоченную (отличающуюся от хаотической) макромолекулярную структуру в расплавленном состоянии. Эти уникальные материалы характеризуются наличием жестких молекул в виде стержней, которые формируют массивы или домены, где они располагаются параллельно друг другу. Жидкокристаллические термопласты имеют значительные преимущества при обработке и в применении: низкую вязкость расплава, малую усадку отлитого изделия, высокую стойкость к химическому воздействию, жесткость, сопротивление ползучести и стабильность всех размеров [2].

1.2. Термореактивные материалы (реактопласты)

Реактопласты относятся к типу полимеров, у которых в процессе переработки происходит химическая реакция «сшивки» полимерных цепочек (рис. 1.2). Эта химическая реакция является необратимой. В отличие от термопластов термореактивные материалы не могут быть повторно переработаны напрямую. Реактопласты всех типов и марок менее технологичны при переработке и требуют специального оборудования для литья под давлением, а также соответствующих практических навыков у технолога, однако эти материалы обладают рядом преимуществ, обусловленных их «сшитой» структурой. К ним относятся: отличное сопротивление ползучести, стабильность размеров и стойкость к химическому воздействию. И все же трудности, связанные с литьем под давлением реактопластов, и невозможность их рециклинга, ограничивают использование этих материалов. К реактопластам относятся фенопласты, аминопласты, эпоксидные смолы, сложные ненасыщенные полиэфирсы и различные эластомерные материалы.

1.3. Соотношение структуры и свойств

Композиционные полимерные материалы могут быть составлены с учетом самых высоких требований к готовому изделию. Свойства композиций (или марок) полимерных материалов варьируются благодаря: 1) различиям в химическом составе и 2) различиям в добавках, которые входят в состав данной композиции.

Химический состав полимерных материалов может отличаться по многим характеристиками, к которым относятся:

- структура повторяющихся фрагментов;
- тип структуры — гомополимер или сополимер;
- средняя молекулярная масса;
- молекулярно-массовое распределение (ММР);
- геометрическая форма макромолекул — линейные/ветвистые, «сшитые» полимерные цепочки

Изменения любой из приведенных выше химической характеристики будет оказывать влияние на свойства полимерного материала. ПК сильно отличается от ПС, поскольку повторяющиеся фрагменты, которые составляют полимерную цепочку, у них разные. Повторяющиеся фрагменты можно представить, по аналогии, как звенья обычной (металлической) цепи (табл. 1.1). Свойства полимеров, которые имеют различные повторяющиеся фрагменты, будут отличаться точно так же, как прочность цепей будет отличаться при наличии различных звеньев.

Таблица 1.1. Повторяющиеся фрагменты, которые формируют макромолекулярную цепочку полимера, оказывают сильное воздействие на свойства и возможность переработки материала

| Полимер | Структура | Цепь (механический аналог) |
|-----------------------------|--|--|
| Гомополимер ПП | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$ |  |
| Гомополимер линейного ПЭ | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ |  |
| Сополимер этилена/пропилена | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{---C---C---C---C---} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$ |  |

Многие полимерные материалы называют сополимерами, поскольку у них структура цепочек составлена из мономеров (фрагментов) более чем одного типа. Такой материал, как сополимер стирола и акрилонитрила (САН), имеет свойства, отличные

от ПС, поскольку он является сополимером. Свойства САН будут меняться в соответствии с его точным сополимерным составом и молекулярной массой.

Существует бесконечное число вариантов составления химических композиций, с помощью которых можно получить материалы самых разнообразных свойств. Как тип звеньев цепочки, так и длина полимерных молекул будут существенно влиять на эксплуатационные характеристики готового изделия, а также на свойства расплава в процессе литья под давлением.

Производители пластмасс, управляя процессом полимеризации, могут получить полимер с заранее заданной определенной средней молекулярной массой и заданным ММР.

Средняя молекулярная масса полимера обычно выражается как среднечисловая молекулярная масса — M_n (общая масса материала, деленная на число молекул); или среднемассовая молекулярная масса — M_w (смещена в сторону более высоких значений — чем больше величина смещения, тем больше молекул с высокой молекулярной массой) [1].

Среднечисловая и среднемассовая молекулярные массы полимеров могут быть определены с помощью уравнений (1.1) и (1.2) соответственно:

$$M_n = \Sigma(N_i \cdot M_i) / \Sigma N_i; \quad (1.1)$$

$$M_w = \Sigma(N_i \cdot M_i^2) / \Sigma(N_i \cdot M_i), \quad (1.2)$$

где M_i — молекулярная масса отдельной фракции; N_i — количество молекул в каждой фракции.

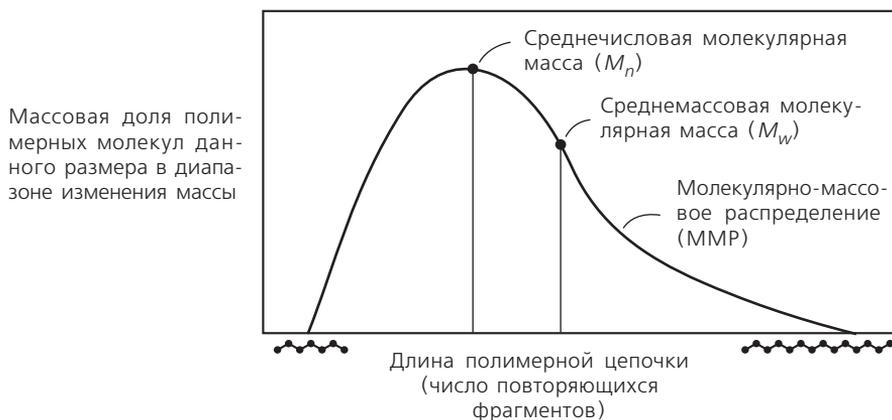


Рис. 1.3. Как средняя масса макромолекул, так и молекулярно-массовое распределение оказывают сильное влияние на переработку и конечные свойства готового изделия

Размах кривой ММР обычно характеризуется с помощью индекса полидисперсности, который определяется по уравнению (1.3):

$$PDI = M_w / M_n. \quad (1.3)$$

Средний размер молекул и их распределение по размерам влияют на возможность переработки и свойства готового изделия (механические свойства, термостойкость, стойкость к воздействию химических веществ и т. п.). Изменение молекулярной массы полимера будет приводить к изменению степени «переплетения» макромолекул. В качестве примера рассмотрим ПЭ (с одним и тем же повторяющимся фрагментом структуры), приведенные в табл. 1.2 [1]. Материалы имеют различные средние молекулярные массы, а следовательно, различные свойства. К ПЭ с очень низкой молекулярной массой относятся смазочные или воскоподобные материалы, которые теоретически могут быть переработаны литьем под давлением, однако не обладают свойствами, необходимыми для изделий длительного пользования. Как только средняя молекулярная масса ПЭ достигает определенного значения, свойства становятся

Таблица 1.2. Влияние молекулярной массы на свойства ПЭ

| Количество $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)-$ фрагментов (звеньев) | Молекулярная масса, г/мол | Температура размягчения, °С | Характеристики состояния материалов при 25 °С |
|---|---------------------------|-----------------------------|---|
| 1 | 30 | -169* | Газ |
| 6 | 170 | -12* | Жидкость |
| 35 | 1 000 | 37 | Консистентная смазка |
| 140 | 4 000 | 93 | Воск |
| 250 | 7 000 | 98 | Твердый воск |
| 430 | 12 000 | 104 | Твердый полимер |
| 750 | 21 000 | 110 | Твердый полимер |
| 1 350 | 38 000 | 112 | Твердый полимер |

* Точка плавления.

приемлемыми для того, чтобы его можно было причислить к «пластмассам». Не существует точно определенного значения средней молекулярной массы, при котором происходит резкий переход воскоподобных свойств в свойства, характерные для полимерного материала. Наблюдается постепенное улучшение эксплуатационных характеристик по мере увеличения средней молекулярной массы (рис. 1.4).

На рис. 1.4 показано, что увеличение механической прочности наблюдается до определенной точки, после которой рост больше не происходит. Кроме того, наблюдается непрерывный рост вязкости расплава по мере увеличения средней молекулярной массы. Использование полимеров с очень высокой молекулярной массой может привести к проблемам в процессе переработки. В качестве примера рассмотрим ПЭ со сверхвысокой молекулярной массой. Материал имеет прекрасные характеристики, включая стойкость к воздействию химических веществ и истиранию, однако его почти невозможно переработать, используя обычные технологии литья под давлением. Термопласты с большой молекулярной массой сложнее перерабатывать литьем под давлением, поскольку они имеют большую вязкость расплава, чем у низкомолекулярных марок.