

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
ББК34.42Англ
М97

М97 МэллойР.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
ББК34.42Англ

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. Термореактивные 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 пику 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 иод давлением	299
4.6.3. Толстостенные сосуды, работающие иод 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 иагружение	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 (тепзодатчики)	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

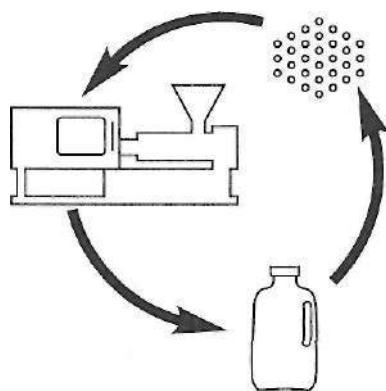
Самой важной особенностью пластмасс является их универсальность. Большинство пластмасс — это синтетические высокомолекулярные материалы с высокой молекулярной массой. Все полимерные материалы можно разделить на термопластичные и термореактивные [1-6].

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.



p_{ис}, 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 пластичности 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 литейную 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).

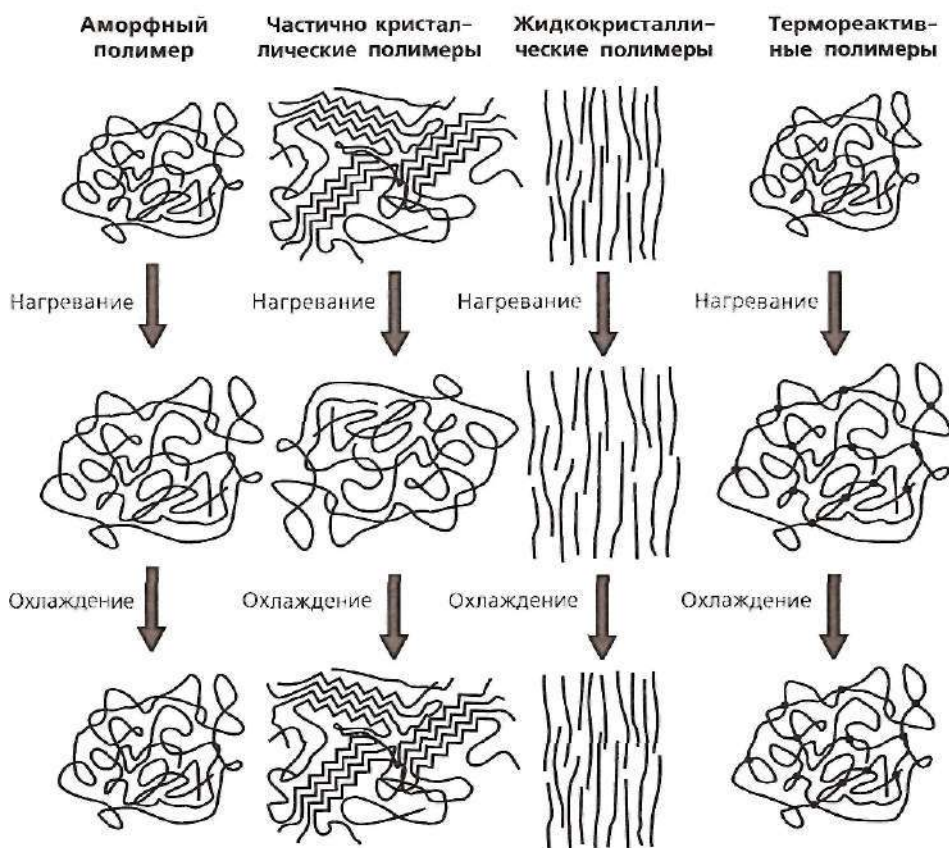


Рис. 1.2. Полимерные материалы могут быть термопластичными (аморфными, частично кристаллическими, жидкокристаллическими) и термореактивными [2]

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 полиэфиры и различные эластомерные материалы.

1.3. Соотношение структуры и свойств

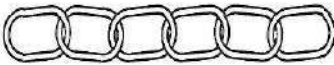
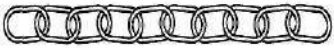
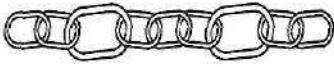
Композиционные полимерные материалы могут быть составлены с учетом самых высоких требований к готовому изделию. Свойства композиций (или марок) полимерных материалов варьируются благодаря: 1) различиям в химическом составе и 2) различиям в добавках, которые входят в состав данной композиции.

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	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$	
Гомополимер линейного ПЭ	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	
Сополимер этилена/пропилена	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{---} \text{C} \text{---} \text{CH} \text{---} \text{C} \text{---} \text{C} \text{---} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$	

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

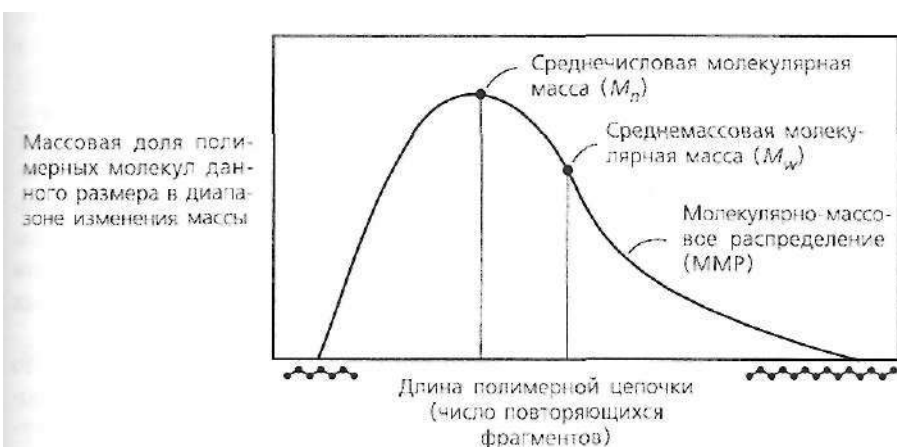


Рис. 1.3. Как средняя масса макромолекул, так и молекулярно-массовое распределение оказывают сильное влияние на переработку и конечные свойства готового изделия

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 —(CH ₂ —CH ₂)— фрагментов (звеньев)	Молекулярная масса, г/мол	Температура размягчения, °C	Характеристики состояния материалов при 25 °C
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.

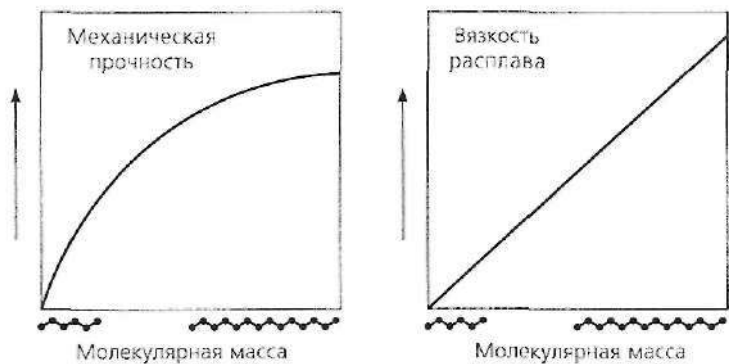


Рис. 1.4. Как окончательные свойства материала, так и возможность его переработки зависят от массовых характеристик макромолекул. Полимеры с более высокой средней молекулярной массой имеют улучшенные эксплуатационные характеристики, но их сложнее перерабатывать, так как у них выше вязкость расплава

Баланс между «возможностью переработки» и «свойствами» можно оценить с помощью табл. 1.3 [6]. Там приведены некоторые механические свойства и параметры течения расплава двух марок ПК (двух полимеров без наполнителей, которые имеют различную среднюю молекулярную массу). Марка ПК, которая имеет показатель текучести расплава (ПТР), равный 4,0 г/10 мин (см. раздел 3.8), имеет более высокую среднюю молекулярную массу, чем материал, у которого ПТР составляет 15 г/10 мин. ПК с более высокой средней молекулярной массой имеет лучшие механические свойства, кроме того, у такого материала на 2,3 % выше предел текучести при растяжении, на 3,0 % возрастают удлинения вблизи предела текучести и на 11 % повышается ударная вязкость. При этом максимальная длина спирали потока расплава (величина, которая характеризует перерабатываемость материала, см. раздел 2.2.2) для более вязких высокомолекулярных марок ПК на 35 % меньше. Преимущества, обусловленные высокой молекулярной массой полимера, однако, «сбалансированы» значительным ухудшением такого показателя, как перерабатываемость материала (здесь имеются в виду потери давления, неудовлетворительное качество поверхности, остаточные напряжения и уменьшение длины потока).

Таблица 1.3. Механические свойства и параметры течения расплава двух марок ПК, отличающиеся значениями средней молекулярной массы (большой для меньшего ПТР)

Показатель текучести расплава (ПТР), г/10 мин	σ_y , МПа	ϵ_y , %	E_t , МПа	Ударная вязкость (по Изоду), Дж/м	Длина спирали потока, м
4	61,4	6,7	2280	928	0,495
15	60,0	6,5	2280	827	0,668
	-2,3 %	-3,0 %	0,0 %	-11 %	+35 %

Пояснения к табл. 1.3:

длина спирали потока при эквивалентных условиях ($T_m = 316^\circ\text{C}$, постоянная глубина формирующей полости);

a — предел прочности при растяжении;

s — относительное удлинение в области предела текучести;

E_t — модуль упругости при растяжении.

1.4. Добавки для полимерных материалов

Как правило, у конструктора нет возможности и времени для совместной работы с поставщиками материала, чтобы разрабатывать совершенно новый полимер (с неизвестным ранее химическим составом или иной молекулярной массой). В большинстве случаев конструкторы должны выбирать материал, соответствующий необходимым требованиям, из тысяч марок, которые представлены на рынке. Свойства почти всех промышленных марок полимерных материалов модифицируются с помощью добавок. В результате конструктор выбирает не гомогенный материал, а полимерную композицию. Добавки обычно используются для улучшения определенных специальных свойств (например, стойкости к ультрафиолетовому облучению, жесткости, цвета и т. п.), которые у базового полимера для конкретного случая использования оказываются недостаточными.

К добавкам относятся стабилизаторы (для эффективной переработки), антиоксиданты, УФ-стабилизаторы, смазочные материалы внутреннего или наружного назначения, окрашивающие добавки/пигменты, пластификаторы, наполнители или армирующие добавки, антипирены, другие полимеры. Следует отметить, что подобно медицинским препаратам, добавки имеют побочные эффекты, если их концентрация слишком высока. К примеру, добавление в термопласт стекловолокон повышает его модуль упругости, прочность и удельную теплопроводность, однако армированные материалы сложнее перерабатывать из-за проблем, связанных со значительным их абразивным воздействием на оборудование и формирующий инструмент, с негативным влиянием на прочность спаев потоков расплава при формовании геометрически сложной отливки. Побочные эффекты от таких добавок, как антиоксиданты или агенты, препятствующие образованию центров кристаллизации, которые используются в очень небольших концентрациях (как правило, условно несколько частиц на миллион), обычно отсутствуют, но и этого вполне достаточно, чтобы повлиять на цвет и общее качество изделия.

В любом случае, конструкторы должны учитывать, что промышленные марки полимерных материалов содержат добавки, и знать об их влиянии на все аспекты рабочих характеристик материалов (включая и возможность их переработки).

1.5. Основные характеристики полимерных материалов

При разработке конкретного изделия конструкторы имеют для выбора широкий ассортимент различных материалов. В зависимости от назначения изделия конкурентами пластмассы могут быть дерево, металлы, керамика или стекло, но во многих случаях пластмассы имеют заметные преимущества с точки зрения эксплуатационных характеристик

и в соотношении цена/качество. Эти конкурирующие материалы имеют определенные преимущества и ограничения. Конструктор должен стараться добиться баланса между требованиями, предъявляемыми к готовому изделию, и совокупностью свойств каждого из материалов. Поскольку на рынке представлено большое количество марок промышленных материалов, есть определенные универсальные требования для сравнения преимуществ и недостатков пластмасс по сравнению с другими материалами [7-11].

Универсальность

Как было отмечено выше, самой важной особенностью пластмасс является их универсальность. Композиции из полимерных материалов могут удовлетворять требованиям практически для любого применения. Требуемые свойства могут быть достигнуты за счет: изменения свойств базового материала (используя различные мономеры, сополимеры, условия полимеризации и т. п.), или за счет использования различных добавок, которые в расплаве вместе с полимерами улучшают те свойства конечной композиции, которые недостаточно были выражены у базового термопласта.

Относительно легкое получение изделий сложной формы

Литьем под давлением можно получить изделия из термопластов или реактопластов очень сложной геометрической формы. Такие изделия могут быть изготовлены в больших количествах и требуют незначительной дополнительной обработки. С развитием новых технологий литья под давлением геометрия изделий становится все более сложной.

Низкая плотность

Ненаполненные полимерные материалы имеют плотность ρ (измеряется от 0,8 г/см³ до 1,8 г/см³). Это намного меньше, чем у стали, плотность которой равна более 7 г/см³. Полимерные материалы имеют хорошие характеристики по прочности и жесткости при сравнительно небольшой плотности. Это дает им определенные преимущества, поскольку есть возможность получать легкие по массе изделия, имеющие высокую износостойкость и продолжительный срок службы. Низкая плотность дает полимерам заметное преимущество в автомобильной промышленности, где идет борьба за уменьшение массы деталей. Полимерные пены (например, структурные пены, отлитые под давлением) имеют еще меньшую плотность (обычно на 15-25 %), однако при этом в изделии необходимо предусматривать достаточно толстые стенки. Армированные полимерные материалы могут иметь плотность более 2,0 г/см³, зависящую от концентрации наполнителя и его плотности.

Низкая плотность пластмассы может оказаться «препятствием» при продаже изделия, поскольку рядовой покупатель скорее признает «прочным» более тяжелое изделие. Производители материалов в настоящее время разработали марки, в которых используются наполнители с большой плотностью. Это сделано намеренно, чтобы получать «тяжелые» литые изделия, которые внешне напоминают керамические.

Прозрачность

Некоторые аморфные термопласты — такие как ПС, ПММА или ПК, служат основой для создания марок полимерных материалов, из которых получают прозрачные изделия. В таких материалах, как ПК, прозрачность, сравнимая с прозрачностью стекла, сочетается с ударной прочностью, низкой плотностью и хорошей перерабатываемостью. Однако в отличие от настоящего стекла, пластмассовые материалы имеют тенденцию к «пожелтению» или «помутнению» со временем, под воздействием УФ-излучения.

Кроме того, пластмассы, в отличие от стекла, в большей мере подвержены царапинам. Чтобы увеличить срок службы прозрачных пластмассовых изделий, использующихся на улице, их иногда покрывают веществами, создающими защиту от ультрафиолетового излучения.

Большинство частично кристаллических материалов являются полупрозрачными или непрозрачными. Полупрозрачные частично кристаллические термопласты (например, ПП) обладают относительно высоким коэффициентом пропускания света в тонкостенных изделиях. Осветленные марки ПП или марки ПП с агентами, препятствующими образованию центров кристаллизации (которые уменьшают эффекты физического рассеяния света на кристаллах) улучшают характеристики пропускания света. Частично кристаллические термопласты обычно используют для изготовления изделий, в которых необходимо ограничить коэффициент пропускания света (например, медицинские шприцы).

Объемное окрашивание материала

Окрашивающие вещества (пигменты или красители) обычно смешивают непосредственно в расплаве полимерной композиции. Окрашивающие материалы поставляются производителями или поставщиками в виде «таблеток» (гранул) для предварительного смешения с перерабатываемым полимером; также красители могут быть добавлены в исходный полимер в литьевой машине (такие красители обычно поставляются в виде жидкостей, порошков или концентратов). Объемное окрашивание имеет заметные преимущества по сравнению с окраской поверхности. Использование красителей не требует применения вредных для здоровья очистителей и растворителей. Поскольку краситель растворен «на молекулярном» уровне, не возникают проблемы с шелушением краски. Однако может оказаться трудным или даже невозможным получить идеальную цветовую окрашенную поверхность у изделия, изготовленного из смеси полимера с красителем. Однородность цвета зависит от длительности пребывания расплава в материальном цилиндре, динамики изменения вязкости расплава и нагрева. После продолжительного времени воздействия УФ-лучей может наблюдаться выцветание материала и следует иметь в виду, что многие пластмассовые материалы могут быть покрыты металлом или на поверхность отлитых изделий может быть нанесено металлизированное покрытие.

Низкое потребление энергии при переработке

Процесс литья под давлением термопластов начинается с впрыска расплавленного полимера в относительно холодную литьевую форму. После попадания в формующую полость материал отливки охлаждается за счет теплопроводности, после чего затвердевает до такого состояния, когда изделие можно извлечь. После извлечения из формы изделие охлаждается до комнатной температуры. Потребление энергии определяется эффективностью литьевого оборудования (машины с электроприводом более эффективны, чем машины с гидравлическим приводом). Температура сушки, температура расплава, а также температура литьевой формы вносят свой вклад в потребление электроэнергии. Энергия Q , необходимая для охлаждения полимера до комнатной температуры T_0 от температуры переработки (расплава) T_m , определяется уравнением:

$$Q = M \cdot C_p \cdot [T_m - T_0], \quad (1.4)$$

где M — масса полимерного материала, а C — удельная теплопроводность полимера при постоянном давлении.

Энергия, необходимая для достижения полимером температуры переработки, складывается из потерь на теплопроводность (от нагреваемого материального цилиндра), а также потерь на вязкостную диссипацию/внутреннее трение (связанных с пластикацией и впрыском полимера). По сравнению с другими материалами (например, металлами) полимеры имеют существенно более низкую температуру переработки и низкое значение соотношения плотность/масса изделия. Значения удельной теплопроводности у полимеров выше, чем у других конкурирующих материалов, однако общие требования к энергии для переработки полимеров (имея в виду все три компонента уравнения 1.4) существенно ниже, чем у металлов, стекла или керамики.

Стойкость к химическому воздействию

Большинство полимерных материалов обладает хорошей коррозионной стойкостью. Однако многие термопласты растворимы или склонны к набуханию в среде органических растворителей, особенно при повышенных температурах. Термореактивные материалы, а также жидкокристаллические или частично кристаллические термопласты имеют повышенную стойкость к химическому воздействию по сравнению с аморфными полимерами. Стойкость к химическому воздействию выбираемых для конкретного изделия полимеров должна быть тщательно изучена с учетом условий предполагаемой эксплуатации. Например, при использовании в автомобильной промышленности должна быть тщательно проверена устойчивость пластмасс к топливу и другим видам жидкостей, которые там используются. Различные химические вещества по-разному воздействуют на полимерные материалы, например, есть такие химические вещества, которые могут вступать с полимером в реакцию, примером может служить гидролиз, наблюдаемый когда сложный полиэфир нагревается в воде. Вода может также вызывать эффект пластикации (эффект физического размягчения) у гигроскопичных полимеров (например, ПА). С другой стороны, органические вещества могут растворять полимер. Подобная проблема обычно учитывается, когда аморфные термопласты подвергаются воздействию растворов гидрокарбонатов. Химикаты и частично органические химикаты, могут вызывать разламывание и растрескивание в изделиях, находящихся под напряжением в обычных условиях окружающей среды. Напряжения могут возникать под действием внешних нагрузок или могут быть остаточными, возникающими в изделии в результате его формования. Поэтому очень важно, чтобы изделия были правильно сконструированы и отлиты с минимальным уровнем внутренних напряжений. Если пластмассовое изделие может контактировать во время эксплуатации с химикатами, следует особенно тщательно избегать появления трещин.

Механические эксплуатационные характеристики

Полимерные материалы могут быть как эластичными, так и твердыми, жесткими. Однако даже у очень твердых материалов значения модуля упругости по величине на порядок меньше, чем у стали. Если жесткость является базовой эксплуатационной характеристикой для изделия, следует использовать ребра и элементы жесткости на кромках изделия. Механические свойства пластмасс корректируют, применяя различные добавки — от упрочняющих «агентов» до армирующих волокон. Механические свойства различных армирующих материалов способствуют анизотропии свойств в объеме изделия (благодаря молекулярной структуре материала и ориентации

волокон). В отличие от металлов, механические свойства пластмасс могут быть очень чувствительны даже к небольшим изменениям температуры, скорости приложения нагрузки и, в некоторых случаях, к изменениям относительной влажности (очень важный фактор для гигроскопичных полимеров). Конструкторы должны учитывать механические эксплуатационные характеристики пластмасс во всем диапазоне температур и значений влажности, которые могут возникнуть при эксплуатации полимерного изделия. При низких температурах пластмассы могут стать очень хрупкими, при высоких — может возникнуть избыточная ползучесть.

Хорошие электроизоляционные свойства

Многие пластмассы обладают хорошими электроизоляционными свойствами и используются при изготовлении, например, выключателей и кожухов электронных устройств. С другой стороны, есть изделия, материал которых, напротив, должен обладать электропроводящими свойствами. Например, кожухи для компьютерных системных блоков должны обеспечивать достаточный уровень экранирования электромагнитных помех. Добавки из частиц проводящей нержавеющей стали или покрытых никелем волокон, повышают электропроводимость полимерных материалов. Кроме того, изделие может быть окрашено или покрыто специальным лаком (краской), чтобы достичь необходимого значения проводимости.

Хорошая термоизоляция

Пластмассы обладают хорошими теплоизолирующими свойствами. Такие свойства имеют большое значение для изделий, в которых требуется сохранение энергии. Низкая скорость передачи тепла делает изделия из пластмассы теплыми на ощупь даже тогда, когда оно фактически остается холодным. С другой стороны, низкая теплопроводность может стать проблемой в таких динамичных системах, как зубчатые передачи (где происходит выделение тепла за счет трения) или при использовании в качестве кожухов компьютеров (где применяют электрические источники, выделяющие тепло). Особенности теплоизолирующих свойств пластмасс используют, например, в системах принудительной вентиляции, когда естественный теплообмен и конвекция не достаточны, чтобы рассеивать выделяемое тепло. Армированные марки термопластов или марки термопластов с наполнителем (композитные материалы) могут обладать повышенной теплопроводностью.

Воспламеняемость

Почти все пластмассы будут подгорать до определенной степени или разлагаться под воздействием пламени. ПЭ легко загорается и горит, а термореактивные фенопласты только обугливаются. Стойкость к воспламеняемости у большинства полимерных материалов может быть повышена с помощью добавления антипиренов. Важно сосредоточить внимание конструктора на следующих аспектах воспламеняемости: горючести, каилепадении и золообразовании продуктов, включая побочные продукты, возникающие при сгорании добавок.

Неустойчивость под воздействием окружающей среды

Многие полимерные материалы имеют плохую устойчивость к атмосферному воздействию. Большинство материалов не реагируют на присутствие влаги при низких температурах (за исключением эффекта пластикации у гигроскопичных полимеров), но комбинированное воздействие ультрафиолета (при наличии солнечного света)

и кислорода с течением времени могут привести к деструкции окраски, потере прозрачности и другим дефектам. Это особенно актуально для изделий, предназначенных для наружного применения в течение длительного времени, например, автомобильных деталей, игрушек, спортивных товаров. Некоторые полимерные материалы (например, акрилы) изначально имеют отличную устойчивость к атмосферному воздействию, а другие (например, ПП) требуют дополнительной стабилизации. Долгосрочная устойчивость к атмосферному воздействию любого полимера может быть существенно улучшена за счет использования в качестве добавок ультрафиолетовых стабилизаторов и антиоксидантов. В некоторых случаях для устранения проблем, связанных с преждевременным старением, используются специальные покрытия.

Относительно высокие коэффициенты теплового расширения (КТР)

Пластмассы имеют относительно высокие КТР. Это следует учитывать, если пластмассовые детали используются для сборки изделий, содержащих металлические, стеклянные, керамические, либо из других материалов детали, из-за возможного несовпадения размеров благодаря разному тепловому расширению материалов. КТР у многих пластмасс сильно отличаются друг от друга. Жидкокристаллические полимеры с наполнителями или армирующими добавками имеют очень низкие КТР, а ПЭ без наполнителя имеет КТР на порядок выше, чем у стали. КТР могут значительно уменьшаться при добавлении неорганических наполнителей и армирующих добавок (например, стеклянных волокон, так как стекло имеет очень низкий КТР). Армированные волокнами материалы при тепловом расширении анизотропны из-за особенностей ориентации волокон и макромолекул. Гигроскопичные полимеры (например, полиформальдегиды ПФ и ПЛ) меняют свои размеры в зависимости от влажности и уровня абсорбции влаги полимером. По мере возрастания доли абсорбированной влаги гигроскопичные полимеры набухают.

1.6. Литература

1. Deanin, R., Polymer Structure, Properties, and Applications, Cahnners Publishing, Boston, MA (1972).
2. Technical Bulletin, Designing with Plastics, Hoechst Celanese, Chatham, NJ (1989).
3. Technical Bulletin, Engineering Materials Design Guide, General Electric Plastics, Pittsfield, MA (1989).
4. Moore, G. and Kline, D., Properties and Processing of Polymers for Engineers, Prentice-Hall, Inc., London (1984).
5. Clements, L., «Polymer Science for Engineers», Engineering Plastics I landbook, American Society of Metals, International, Metals Park, OH (1988).
6. Technical Bulletin, Engineering Thermoplastics Basic Design Manual, The Dow Chemical Co., Midland, MI (1988).
7. Dym, J., Product Design with Plastics, Industrial Press, Inc., NY (1983).
8. Powell, P., Plastics for Industrial Designers, The Plastics Institute, London (1973).
9. MacDermott, C, Selecting Thermoplastics for Engineering Applications, Marcel Dekker, Inc., NY (1984).
10. Ehrenstein, G. and Erhard, G., Designing with Plastics, Hanser Publishers, Munich (1984).

2. Особенности литья под давлением изделий из пластмасс (краткий очерк)¹

2.1. Общие положения

Литье под давлением относится к высокоскоростным автоматическим технологиям, которые могут быть использованы для изготовления пластмассовых изделий очень сложной формы. Этот технологический процесс позволяет получать изделия как очень больших, так и очень маленьких размеров практически из всех известных термопластов и специальных марок реактопластов. От работы конструктора зависит, в конечном счете, общая технологичность производства, эффективность технологического процесса, себестоимость и качество продукции. Конфигурация изделия может быть изменена для максимально полного соответствия требованиям, продиктованным пластмассами (их поведением при переработке и последующей эксплуатации). Современный подход к производству пластмассовых изделий методом литья под давлением требует от производителей выполнения так называемого «метода параллельного проектирования». Она подразумевает, что все участники производственного процесса: конструктор изделия, конструктор литейной формы, поставщик материалов и инженер-технолог должны работать вместе, согласовывая друг с другом все принимаемые решения.

В главе автор приводит первоочередные, самые необходимые для конструктора, представления об особенностях и сложностях процесса литья пластмасс под давлением, которые он должен усвоить, приступая к созданию, конструированию изделия. Следует только обратить особое внимание на фактическое расширение задач, стоящих в настоящее время перед конструктором изделия: они связаны с проработкой технологических проблем, полного учета влияния закономерностей формования будущего изделия, причем так, чтобы гарантировать оптимальное качество изделия при неперменной эффективности его производства и эксплуатации. — *Примеч. науч. ред.*

Литье под давлением представляет собой сложный процесс, состоящий из нескольких последовательных технологических стадий. К ним относят: заполнение формы расплавом, уплотнение расплава, выдержка его под давлением, охлаждение и выталкивание изделия.

Заполнение формы расплавом

После смыкания формы, расплав поступает из впрыска литьевой машины (термопласт-автомата) в относительно «холодную» форму-ющую полость по литниковой системе.

Уплотнение расплава

Под воздействием давления расплав уплотняется и, окончательно заполняя формующую полость, точно копирует ее внутреннюю поверхность.

Выдержка под давлением

Расплав выдерживается в форме под давлением, частично компенсируя усадку, которая происходит во время охлаждения изделия; давление обычно поддерживается до момента затвердевания расплава в наиболее тонких элементах литниковой системы. После их затвердевания полностью прерывается поступление расплава. Находящийся в формующей полости расплав продолжает охлаждаться и усаживаться, но уже без компенсации.

Охлаждение

Выталкивание изделия

Форма раскрывается, и охлажденное изделие выталкивается в большинстве случаев с помощью специальной системы выталкивания (съема).

Продолжительность цикла литья под давлением в значительной степени зависит от конструкции изделия. Несмотря на то что все стадии процесса литья под давлением взаимосвязаны, мы сосредоточим основное внимание на тех требованиях, которые предъявляются к каждой из них по отдельности. Ниже будут обсуждаться отдельно важные факторы всех стадий технологического процесса, которые оказывают влияние на решение конструктивных задач.

2.2. Заполнение формующей полости

2.2.1. Факторы, связанные с литниковой системой

Наиболее важным элементом литниковой системы являются впускные литники: от их типа, числа и расположения во многом зависят в дальнейшем эксплуатационные характеристики и внешний вид изделия. Впуском называют место, через которое расплав поступает в формующую полость. Впускные литники могут быть расположены либо в одной, либо в нескольких частях изделия и могут иметь различную конструкцию. Схема расположения мест впуска влияет на поведение расплава не только на стадии заполнения формующей полости, но также на стадии уплотнения и выдержки, вплоть до затвердевания пластмассы. Кратко перечислим

основные технологические факторы и параметры, на которые влияет схема расположения впускных литников:

- характер заполнения формы;
- распределение давления в формующей полости;
- расположение и прочность линий спаивания при слиянии потоков расплава в формующей полости;
- воздушные включения (ловушки) и недоливы;
- направление и степень ориентации макромолекул расплава;
- легкость удаления литников;
- точность размеров изделия;
- размеры впускных литников;
- остаточные напряжения;
- возможность управления величиной усадочных поверхностных утяжин;
- коробление и другие отклонения от правильной геометрической формы, плоскостности и т. п.

Сложившаяся с недавнего времени практика требует, чтобы конструктор изделия представлял конструктору литейной формы модель или копию, или прототип изделия. Раньше конструктор лишь указывал на изделия места, в которых можно было бы расположить впуски, не нанося вреда внешнему виду изделия. После этого конструктор литейной формы мог начинать работу. Но теперь эта практика изменилась; такое последовательное проектирование фактически вытеснено практикой параллельного проектирования. Если раньше конструкторы изделия и конструкторы форм практически мало влияли на решения друг друга, принимаемые на неконтролируемых ими этапах производства, то теперь положение изменилось. Современная технология производства пластмассовых изделий требует, чтобы конструктор литейной формы привлекался к работе уже на ранних стадиях процесса конструирования изделия, еще при выборе его геометрической формы. В этом случае конструкторы изделий и форм могут совместно принимать важные решения, связанные с определением схемы расположения впускных литников.

Рассмотрим отливку типа стакана (гильзы), которая изображена на рис. 2.1. На рисунке показано несколько предлагаемых схем расположения мест впуска.

Каждый вариант расположения впускных литников имеет свои специфические преимущества и недостатки. Конструктору рекомендуется рассмотреть как можно больше вариантов расположения мест впуска и выбрать ту конфигурацию, которая даст наилучший баланс между технологичностью изготовления литейной формы и конечными эксплуатационными характеристиками изделия. Например, для изделия, которое можно отлить под давлением, используя только один впуск, достаточно использовать относительно простую форму с одной плоскостью разреза (двухплитную). При этом необходимо считаться с опасностью возникновения деформаций в плите матрицы, с повышенным риском образования воздушных ловушек, пониженной прочностью в зоне спаивания потоков расплава, а также проблемами достижения относительно высокой и стабильной размерной точности. Вариант с использованием нескольких мест впуска имеет преимущества по сравнению с предыдущим, однако и здесь остаются затруднения, связанные с зонами спаивания потоков расплава, с удалением воздуха из формующей полости и возникает новая проблема — большее количество



Рис. 2.1. Стандартные варианты расположения впускных литников для изделия типа стакана (гильзы). К возможным вариантам относятся впуски на торцах, туннельные литники и точечные впускные литники со стороны дна отливки

отходов. При литье под давлением отливок типа стаканов (гильз) предпочтительнее располагать впуск в верхней части изделия, а не на его боковой поверхности. Например, впуск, расположенный в центре, дает более сбалансированный поток расплава, при этом создается естественная вентиляция формы по поверхности ее разреза, а также не образуются линии спая потоков расплава.

От литниковой системы, особенно от количества мест впуска в формующую полость в значительной степени зависит решение вопроса: возможно ли изготовить конкретное изделие заданных размеров. На рис. 2.2 показано изделие, которое имеет



Рис. 2.2. Варианты литниковых систем для изделия типа обода колеса; радиальные (лучевые) и дисковые литниковые системы с местами впуска на внутренней поверхности отливки; дисковая литниковая система гарантирует равномерное заполнение и уплотнение расплава без образования линий спая

форму обода колеса и изготавливается в одиогнездной форме. Возможные литниковые схемы для получения этого изделия — радиальная (лучевая) или дисковая (диафрагменная) схемы. Известно, что склонность отливок к усадке будет меньшей в областях, близких к месту впуска, из-за градиентов давления в формующей полости и из-за эффекта сжатия расплава. С точки зрения сохранения размеров обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик и общего качества изделия, дисковая литниковая схема (см. рис. 2.2) является наилучшим вариантом, поскольку она обеспечивает сбалансированный поток расплава, равномерное распределение давления, а также отсутствие линий спая. К сожалению, выбор такой схемы расположения впуска может приводить к образованию большого количества отходов (литников) и, соответственно, — к дополнительным операциям после завершения литья под давлением, например, механической обработке или штамповке для их удаления. Принимая решение о расположении мест впуска, необходимо находить баланс между рассмотренными «взаимоисключающими» друг друга факторами.

Расположение впусков в литьевых формах с двумя и тремя отрывными плитами

От решения о расположении мест впуска зависит выбор типа, а также стоимость литьевой формы. Например, для литья под давлением изделий, которые требуют расположения точечного впускного литника на торце, необходимы двух плитные формы с холодноканальной литниковой системой. Если один впускной литник будет расположен сверху в центре изделия или их будет несколько, то изделие может быть изготовлено в трехплитной форме. В некоторых случаях изделие типа стакана (гильзы) может быть изготовлено в одиогнездной двухплитной форме с центральным впускным литником (рис. 2.4).

Как правило, след от впускного литника имеет негативное значение только с точки зрения внешнего вида изделия. Кроме того, в зонах изделия, расположенных вблизи мест впуска, часто наблюдаются такие дефекты, как следы потока расплава

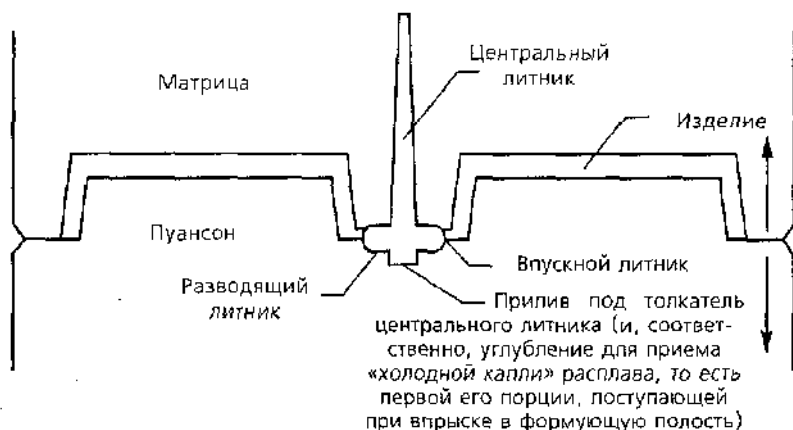


Рис. 2.3. Стандартная холодноканальная многонездная литьевая форма с одной плоскостью разреза между двумя полуформами (см. положение стрелок)

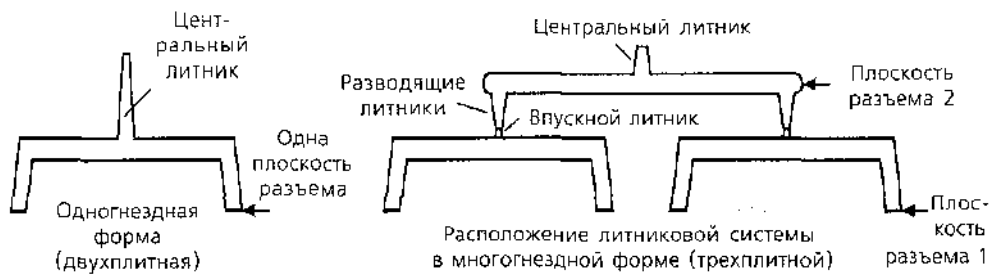


Рис. 2.4. Варианты расположения центральных литников. Слева — впуск сверху в центре формирующей полости одногнездной формы; справа — впуск и в центре каждого гнезда многогнездной формы с двумя плоскостями разъема (трехплитная)

на поверхности, помутнение, серебристость, а также обесцвеченность поверхности. Для изделия, изображенного на рис. 2.5, равномерное распределение потока расплава обеспечивается при расположении впускного литника вверх в центре.

Такой же вариант пригоден для литья под давлением крышек, корпусов бытовых приборов.

При использовании «стандартной» конфигурации расположения матрицы и пуансона (то есть при стационарной матрице и подвижном пуансоне) можно располагать впуск на верхней поверхности. К сожалению, при этом след от впускного литника будет находиться на лицевой поверхности изделия. С другой стороны, если расплав впрыскивается через пуансон, а не через матрицу, то след от впуска остается скрытым, поскольку находится не на лицевой, а на внутренней поверхности изделия. Но стоимость литейной формы для такой «перевернутой» схемы впрыска может оказаться

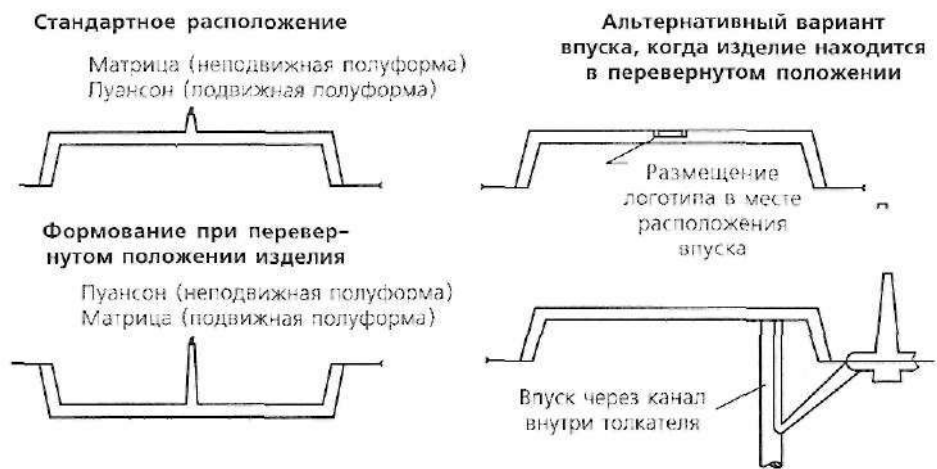


Рис. 2.5. Варианты различных схем расположения впускных литников (при необходимости не оставлять на поверхности изделия нежелательные следы от впускных литников — см. варианты справа)

довольно высокой, поскольку впрыск должен осуществлять через стационарную полуформу. Как и в случае с центральным литником, след от толкателя на поверхности отливки при таком варианте будет оставлять заметный дефект на поверхности изделия. Необходимо также предусмотреть в форме специальные приспособления для системы выталкивания, расположенной со стороны неподвижной полуформы, поскольку собственно система выталкивания, как правило, расположена перед подвижной плитой термопластавтомата. Однако существуют альтернативы «перевернутому» впрыску. Например, изделие может быть изготовлено при использовании стандартной конфигурации расположения матрицы и пуансона, если след от впуска можно скрыть с помощью помещенного на этом месте логотипа и т. п. С другой стороны, можно использовать впрыск с внутренней стороны изделия через капал, расположенный внутри толкателя, или в шпильку выталкивателя (см. рис. 2.5).

В некоторых случаях конструктор имеет возможность выбора конфигурации литьевой формы. Для изделия с большой полостью (см. рис. 2.6) следует использовать стандартную конструкцию — матрица в неподвижной полуформе, пуансон — в подвижной части, а форма будет с тремя отрывными плитами. Если использовать стандартную конфигурацию для изделия с большой полостью, то место впуска можно расположить в верхней части изделия.

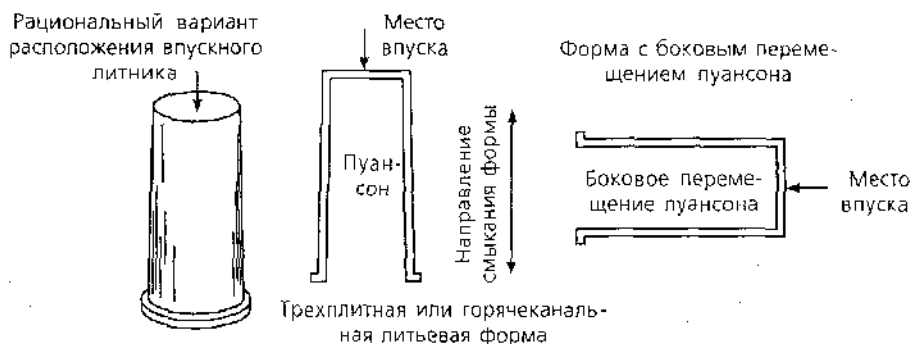


Рис. 2.6. Изделие типа стакана (гильзы) обычно изготавливается с помощью трехплитной формы (или с использованием горячеканалъных форм); другой вариант (справа) — форма с боковым перемещением пуансона

Изделие, которое при этом получается, будет иметь преимущество благодаря хорошо обработанной оформляющей поверхности пуансона, что обеспечивает более легкий съем изделия. Если в изделии имеются пояски на наружной поверхности цилиндрической части, то может возникнуть ситуация, когда его нельзя будет просто извлечь из матрицы. Изделия более сложной формы можно изготавливать с помощью разъемных матриц или в литьевых формах с боковым перемещением пуансона. Оба этих варианта относятся к решениям с использованием «специальных операций», связанных с выталкиванием изделия. Двухплитная форма с боковым перемещением пуансона обычно используется для изготовления изделий с глубокими полостями, когда бывает недостаточной «высотатолкателя» для извлечения изделия.

Горячеканальные литниковые системы

Горячеканальные литниковые системы можно использовать для изготовления изделий из любого термопласта и практически любой геометрической формы — от очень маленьких (таких, как колпачки для ручек) до крупногабаритных (бампера автомобилей и т. п.).

Горячеканальная литниковая система имеет очевидные преимущества, поскольку при ее использовании не образуется литниковый скрап, а также пропадают многие другие проблемы, связанные с использованием отходов. Кроме того, горячеканальные

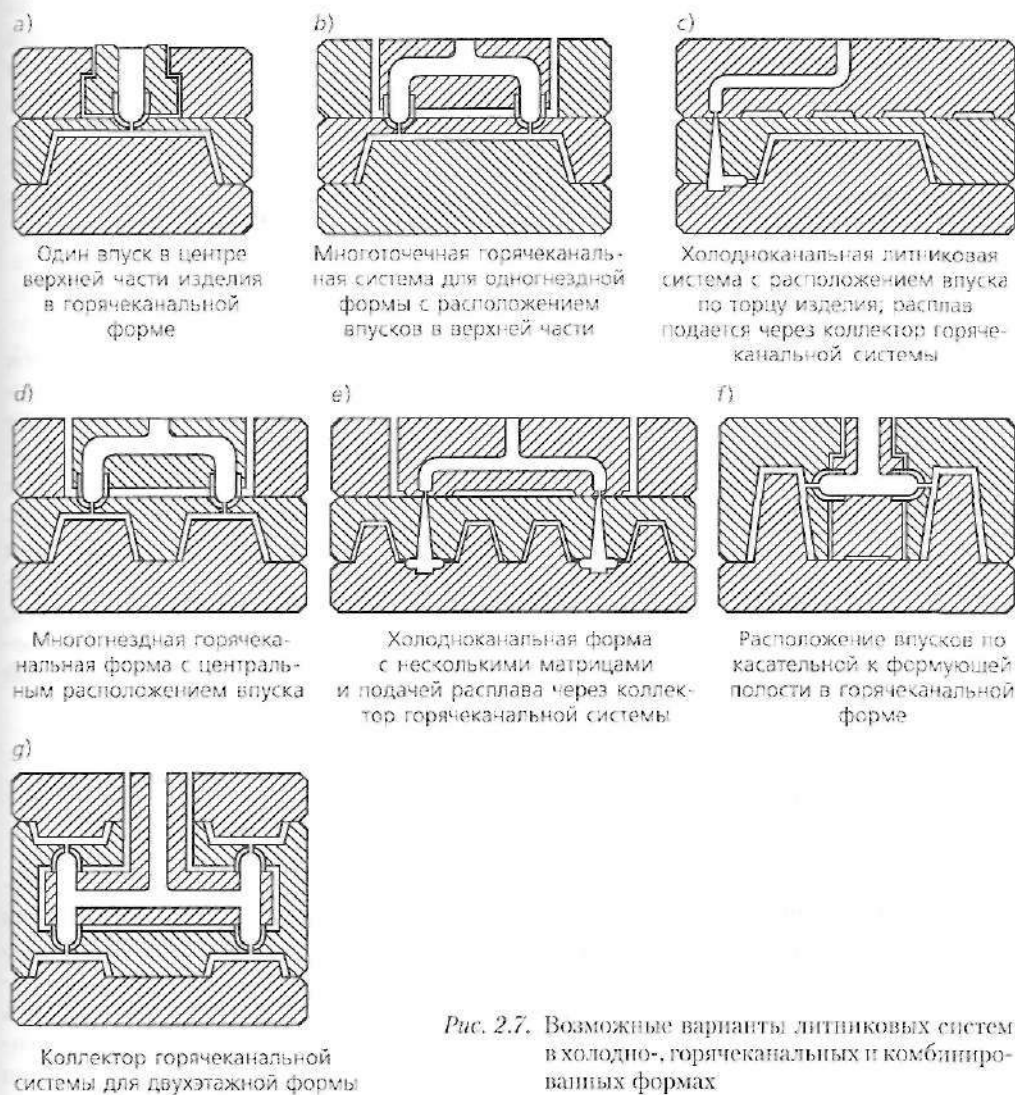


Рис. 2.7. Возможные варианты литниковых систем в холодно-, горячеканальных и комбинированных формах

системы обеспечивают конструктору большую степень свободы при выборе расположения места впуска, а также дают возможность получать изделия более высокого качества.

Горячеканальные системы можно рассматривать как продолжение сопла узла пластфикации термопластавтомата. Когда используются горячеканальные системы, то можно избежать нежелательного влияния на качество отливки оставшейся от предыдущего цикла затвердевшей «холодной капли», что имеет место в холодноканальных системах. В горячеканальных системах может быть уменьшена степень ориентации макромолекул, которая связана с технологическими параметрами процесса, что, в свою очередь, приводит к уменьшению уровня остаточных напряжений. Возможно использование различных конфигураций и типов горячеканальных систем, включая открытые круговые и замкнутые кольцевые. Когда нежелательно проявление следов от литников на изделии, можно использовать систему с запирающимися соплами. Такие горячеканальные сопла имеют штифты с механическим приводом, которые перекрывают впуск, как только штифт перемещается вперед, обеспечивая механическое уплотнение и оставляя малозаметный след в месте впуска [1,2].

2.2.2. Ориентация расплава при заполнении формующей полости

Следует учитывать, что почти все отлитые под давлением изделия из термопластов имеют некоторое количество «замороженных» в ориентированном состоянии макромолекул. Степень ориентации «замороженных» макромолекул в изделии зависит от молекулярной массы и релаксационных способностей термопласта, от технологических параметров процесса литья под давлением. Степень ориентации макромолекул в формующей полости тем меньше, чем более склонен термопласт к релаксации напряжений после формования из него изделия. Степень ориентации расплава, связанная с заполнением формующей полости, может быть минимизирована за счет рационального конструирования изделия и выбора параметров процесса литья под давлением, снижающих необходимый уровень давления при заполнении. Ориентация макромолекул в полимерном материале будет отличаться от степени ориентации, создаваемой условиями заполнения и уплотнения расплава и степенью релаксации макромолекул:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Остаточная} & & \text{Ориентация, связанная} & & \\ \text{«замороженная»} & = & \text{с особенностями} & - & \text{Степень} \\ \text{ориентация} & & \text{течения расплава} & & \text{релаксации} \end{array}$$

Высокая температура формы будут способствовать разупорядочиванию структуры (то есть молекулярной релаксации) за счет сохранения расплава в подогретом состоянии в течение длительного времени. Такое управление процессом с помощью повышения температуры формы, или температуры расплава, может быть использовано для уменьшения степени ориентации макромолекул, но эти меры будут приводить к увеличению длительности цикла изготовления изделия. Поэтому следует сбалансировать действие противоположных факторов. По этой причине проблема оценки

степени ориентации, вызванной заполнением и уплотнением расплава в формующей полости, заслуживает специального внимания.

Например, было установлено, что нанесение изоляционного (пассивного) слоя на формообразующую поверхность матрицы литевой формы сохраняет более высокие температуры этой поверхности при заполнении полости. Это приводит к сохранению более высокой температуры вблизи поверхностей матрицы/пуансона, создает условия для релаксации сдвиговых напряжений, индуцированных течением расплава, и способствует уменьшению степени макромолекулярной ориентации расплава после заполнения [3]. Следует учитывать, что изолирующие покрытия должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать жесткие технологические условия и не влиять на увеличение времени цикла (из-за самой изоляции). Скорость впрыска расплава также влияет на степень макромолекулярной ориентации при заполнении формующей полости. Высокая скорость впрыска приводит к высокой степени ориентации макромолекул в момент заполнения, но из-за высокой скорости одновременно повышается и температура расплава, поэтому большая часть приобретенной ориентации будет потеряна в процессе релаксации из-за высоких температур.

Ориентация макромолекул развивается на стадии заполнения, когда расплав проходит через сопло термопластавтомата, литниковую систему, включая, впускные литники и формующую полость. Из-за градиента скоростей течения, связанных с ламинарным характером течения потока расплава, полимерные цепочки вытягиваются. Профиль скоростей потока расплава большинства термопластов, как правило, получается «притуплённым» (связано с псевдопластичным поведением расплава). Это приводит к высокой степени ориентации макромолекул вблизи поверхности изделия, в то время как макромолекулы в центральной зоне остаются в разупорядоченном состоянии, как показано на рис. 2.8. Эта одна из проблем технологии литья под давлением термопластов, поскольку затвердевание расплава, соприкасающегося с относительно холодными стенками формующей полости, матрицы и пуансоном, приводит к высоким сдвиговым граничным напряжениям между затвердевшим слоем и расплавом,

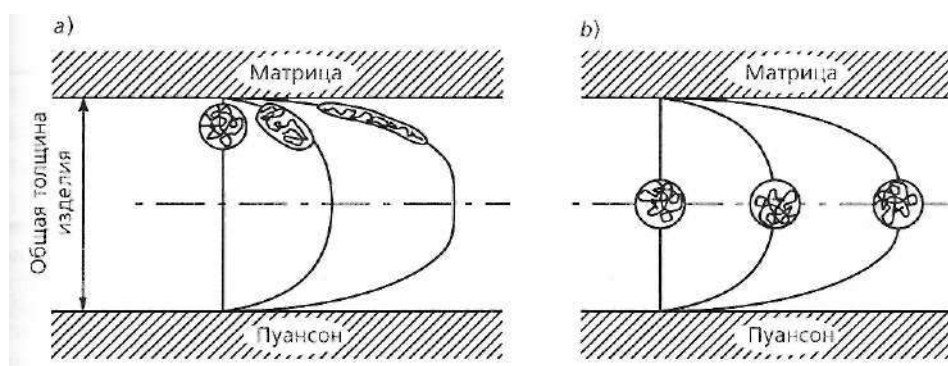


Рис. 2.8. Профиль скоростей псевдопластичного ламинарного течения расплава и формующей полости будет приводить к возникновению определенной ориентации макромолекул вблизи ее стенок (а), хотя при приближении к центральной части потока макромолекулы будут оставаться ориентированными случайным образом (б)

а также к возникновению «замороженной» ориентации макромолекул [4-7]. Ориентирование макромолекул в определенном направлении будет продолжаться и на стадии выдержки под давлением, когда расплав поступает в формующую полость и происходит компенсация объемной усадки. Это особенно характерно для той области изделия, которая находится вблизи места впуска. Уменьшение давления в период выдержки под давлением может быть использовано для снижения плотности расплава, что связано с ориентацией макромолекул [6]. Проблемы ориентации особенно остро проявляются при использовании термопластов, в которых высока доля макромолекул с высокой молекулярной массой (длинные цепи), а также в случае использования наполненных армированных термопластов. В отличие от полимерных макромолекул, волокна, которые используются для армирования, не могут релаксироваться, или разупорядочиваться, даже при наличии благоприятных условий.

Полимерные цепи проявляют тенденцию к ориентации вдоль направления течения потока расплава. Поскольку все расплавы, которые поступают в формующую полость проходят через впускной литник, то на выходе из него цепи ориентируются в радиальном от впуска направлении (см. рис. 2.9).

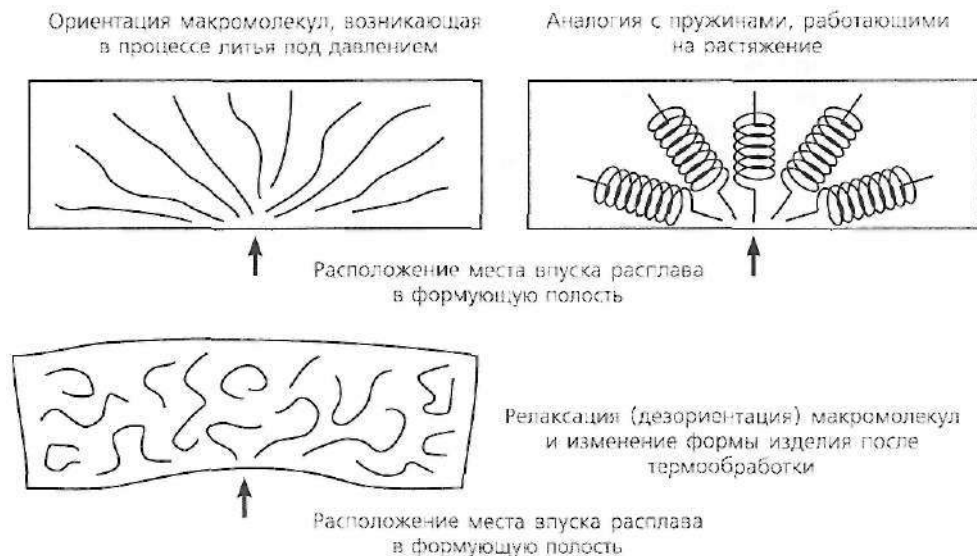


Рис. 2.9. Макромолекулы имеют тенденцию ориентироваться в радиальном направлении по отношению к месту впуска и в этой области возникают относительно высокие внутренние напряжения, поскольку макромолекула будет стремиться восстановить свою форму, что впоследствии приведет к деформации изделия, особенно при повышении температуры

Макромолекулы стремятся «выйти» из такого растянутого состояния, и в результате возникают значительные напряжения в области впуска. Такой эффект аналогичен воздействию пружин, работающих на растяжение, как показано на рис. 2.9. Внутренние напряжения, возникающие из-за ориентации макромолекул, приводят

∴ короблению отливки (когда напряжения достаточно велики, чтобы вызывать продольный изгиб); остаточные внутренние напряжения накладываются на напряжения, возникающие в процессе эксплуатации изделия, а это приводит к сокращению срока его службы, уменьшению трещиностойкости отливки.

Внутренние напряжения могут быть сняты при нормализации изделия после литья, однако, если изделие не будет правильно зафиксировано, велика вероятность изменения его размеров и конфигурации. Изделие может начинать деформироваться или коробиться при повышении температуры в процессе эксплуатации (например, в сушильной камере при окраске или при высокой температуре окружающей среды), если уровень остаточных напряжений в нем оказывается достаточно высоким. «Замороженная» ориентация макромолекул, как правило, приводит к анизотропии свойств отлитого изделия [5,8-10]. Анизотропное поведение расплава проявляется еще в формирующей полости и отражается в последующем на анизотропии усадки изделия.

Изделие, показанное на рис. 2.10, а было отлито под давлением через впускной литник, расположенный с торца плоского изделия (по всей ширине). Такая геометрия впуска приводит к большой степени ориентации макромолекул вдоль направления течения потока расплава. Поэтому свойства изделия оказываются различными. Например, показатели прочности на изгиб и на разрыв будут иметь тенденцию к увеличению вдоль направления течения потока расплава по сравнению с таким же показателем, определенном в направлении поперек течения расплава. При испытании образцов с надрезом, вырезанных из изделия, которое изображено на рис. 2.10 (толщина образца 3,2 мм), получены большие значения ударной вязкости в направлении вдоль течения потока расплава. В этом испытании по Изоду исследовались свойства ударопрочного ПС. Были получены следующие результаты [5].

Таблица 2.1. Изменение ударной вязкости (по Изоду) в изделии из ударопрочного ПС (рис. 2.10)

Место отбора образца	Направление течения потока расплава	Среднее значение ударной вязкости (по Изоду)	
		фунт силы/дюйм	Дж/м
В зоне впуска	Вдоль	2,53	137
В зоне впуска	Поперек	0,95	51
В конце течения потока расплава	Вдоль	2,21	119
В конце течения потока расплава	Поперек	0,66	36

Данные, приведенные в табл. 2.1, показывают характер изменения ударной вязкости по мере удаления от места впуска. Значения ударной вязкости у образцов, взятых непосредственно в месте впуска или вблизи от него, могут быть более низкими (из-за влияния остаточных напряжений). Анизотропия свойств будет более существенной у тонкостенных отливок и более вязких расплавов термопластов. Изделие, показанное на рис. 2.10, б, было получено с помощью впускного литника в центре, что обеспечивает радиальное течение потока расплава, вследствие чего происходит ориентация как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. Ориентация макромолекул

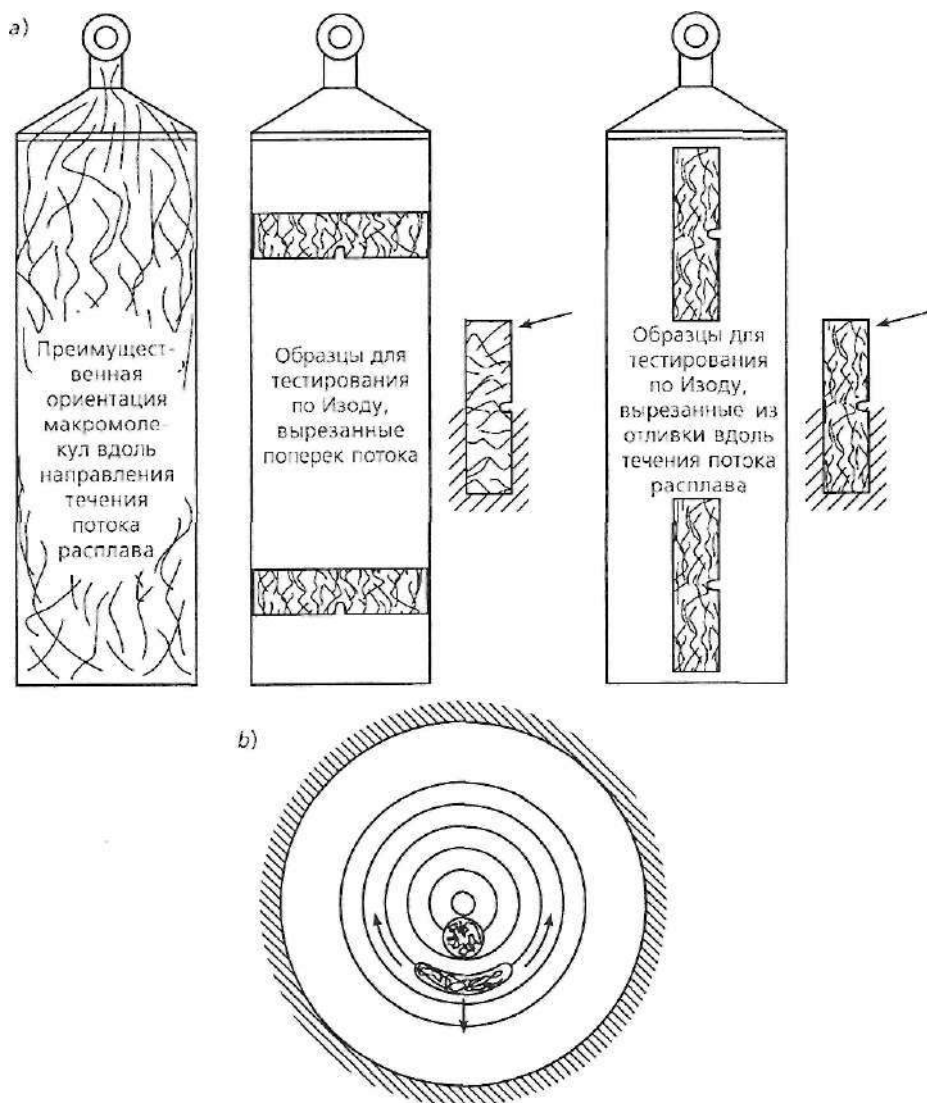
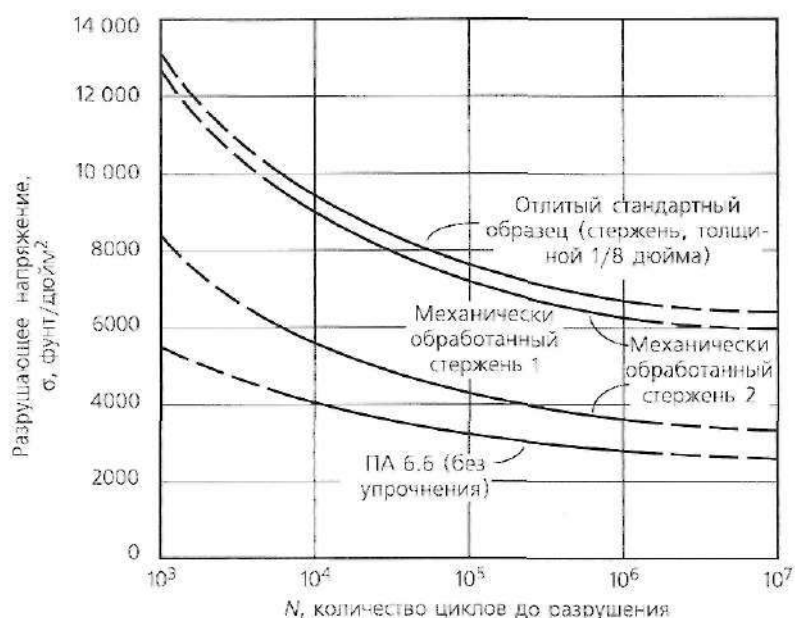
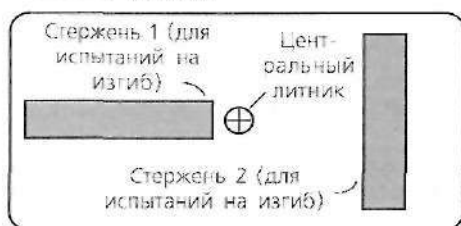


Рис. 2.10. а — расположение впускного литника с торца плоской отливки (по всей ширине) приводит к продольной ориентации макромолекул — вдоль длинной стороны стенки и анизотропии ее свойств в направлениях вдоль и поперек течения расплава. Степень «замороженной» (не зафиксированной) ориентации определяется такими факторами, как природа материала, конструкция изделия и условия переработки. б — расположение впускного литника в центре обеспечивает радиальное или дисковое течение потока расплава, и его ориентацию как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях (то есть перпендикулярно основному направлению течения расплава)

Диаграмма разрушающее напряжение–нагрузка кривая усталостной прочности ПА, армированного стекловолокном, ASTM D671, 1800 циклов/мин, 23°C, 50 %-ная относительная влажность



Отлитая пластина



Испытательные образцы, изготовленные механической обработкой из отлитой пластины

Рис. 2.11. Зависимость разрушающего напряжения σ от нагрузки N для ПА 6.6, армированного стекловолокном, в направлении, перпендикулярном ориентации потока расплава, существенно меньше, чем значения в направлении вдоль потока

является естественным следствием особенностей течения расплава. Чтобы приобретенную ориентацию макромолекул снизить, следует как бы сжать расплав. Это возможно осуществить за счет изменения параметров процесса литья под давлением.

Как было отмечено выше, ориентация макромолекул материала значительно усиливается в термопластах, армированных стекловолокнами. На рис. 2.11 показан результат испытаний образцов, вырезанных из изделия, изготовленного литьем под давлением из полиамида ПА 6.6, армированного стекловолокном [11]. Значения усталостной прочности, установленные на образцах, вырезанных в направлении поперек течения потока расплава, существенно более низкие, чем для образцов в направлении

вдоль потока. Показатели прочности образцов вдоль потока хорошо коррелируют с показателями, которые были определены по стандартной процедуре тестирования прочности на изгиб (это означает, что такие стандартные процедуры пригодны только для оценки соответствующих свойств вдоль потока расплава).

Показатели усталостной прочности в образцах, вырезанных в направлении поперек течения расплава, меньше аналогичных показателей, определенных на образцах, вырезанных в направлении течения, но эти значения все же больше, чем значения усталостной прочности в образцах из нормированного ПА.

Приведенные выше зависимости показывают, что «замороженная» ориентация макромолекул и армирующих волокон приводит к анизотропии свойств, и это должен учитывать конструктор. Место впуска расплава необходимо выбрать таким образом, чтобы создать необходимую ориентацию в направлении действия ожидаемого наибольшего напряжения в изделии. Стяжка для кабеля, которая показана на рис. 2.12, подвергается одноосному изгибу и растягивающему напряжению в процессе эксплуатации, поэтому ориентация макромолекул по длине изделия может улучшить его качество. С другой стороны, когда изделия подвергаются напряжению в различных направлениях, необходимо стремиться к тому, чтобы максимально снизить степень ориентации.

Степень ориентации макромолекул, которая возникает при заполнении и уплотнении расплава в формующей полости, зависит от условий переработки, свойств материала, конструкции формы, а также конструкции самого изделия. Например, уменьшения степени ориентации макромолекул можно достичь, применяя центральные и впускные литники относительно большого сечения, а также выбирая более короткие пути течения расплава.

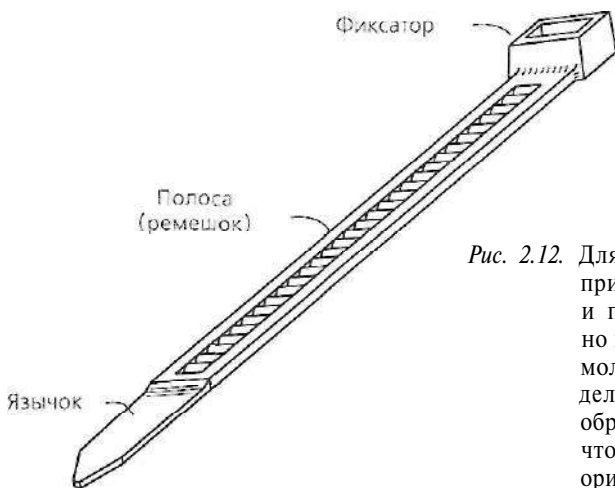


Рис. 2.12. Для определенного типа изделия, например, стяжек для крепления кабелей и проводов, предварительно правильно прогнозируемая ориентация макромолекул может улучшить качество изделия. Конструкторы должны таким образом размещать впускные литники, чтобы направление «замороженной» ориентации совпадало с направлением возникновения максимальных напряжений в процессе эксплуатации изделия

Высокие скорости впрыска и повышенные температуры расплава приводят к уменьшению начальной ориентации при затвердевании расплава, создавая лучшие условия для релаксации макромолекул. Использование горячеканальных систем (в большинстве случаев) также способствует релаксации. Изменение направления течения расплава является важным фактором, влияющим на ориентацию макромолекул и волокон. Углы, особенно внутренние, во всех элементах литниковой системы и в изделии должны, по-возможности, иметь большие закругления (рис. 2.13).

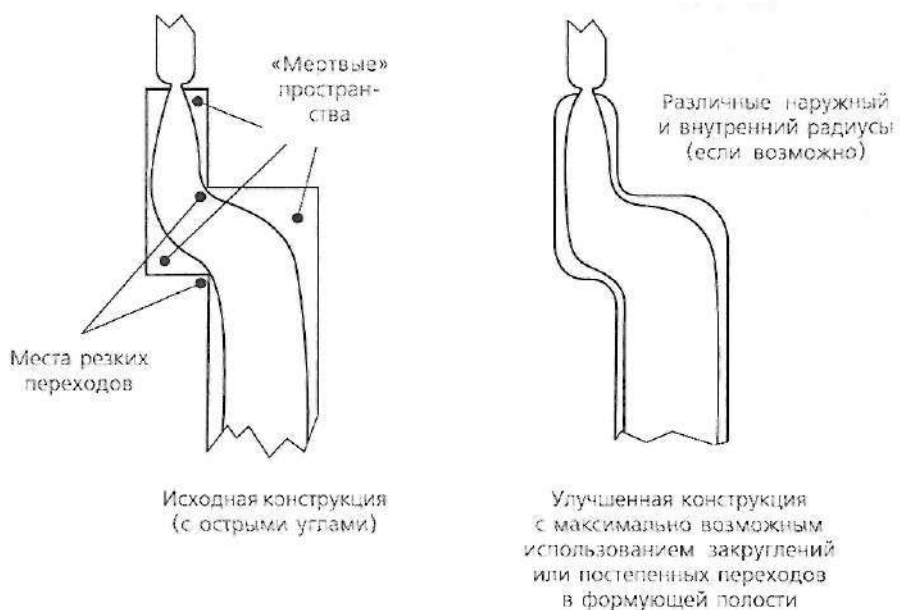


Рис. 2.13. В изделиях изгибы конфигурации или углы, особенно внутренние, должны иметь радиусы закруглений, чтобы максимально снизить анизотопию ориентации, связанной с особенностями заполнения формы расплавом

Острые внутренние углы способствуют ориентации, а также являются причиной возникновения сдвиговой деструкции расплава пластмассы при высоких скоростях его течения. Радиусы закруглений в углах также уменьшают степень концентрации остаточных напряжений в отливке и влияние нагрузок. Рекомендации по рациональному конструированию углов в изделиях из термопластов приведены на рис. 2.14. Если используются большие радиусы закруглений внутренних углов (т. е. углы у пунсона) и выдерживается равномерная толщина изделия, то, соответственно, правильная конструкция углов возникает «автоматически». Такая конструкция угла дает возможность относительно равномерно распределять напряжения в процессе эксплуатации, обеспечивает хорошие характеристики потока расплава, а также придает изделию эстетически привлекательный вид.



Рис. 2.14. Идеальные закругления должны быть одинаковыми как на внутренних, так и на наружных поверхностях и углах изделия. Равномерная толщина стенок может поддерживаться за счет выбора наружного радиуса, равным внутреннему, с учетом толщины стенки. Большая толщина стенок в углах будет приводить к образованию утяжин, пустот, усадочных напряжений и потенциальной возможности возникновения турбулентных завихрений при течении расплава

2.2.3. Потери давления на стадии заполнения формующей полости

При выборе расположения мест впуска конструктор должен учесть все факторы, связанные с особенностями заполнения формующей полости. Заполнение начинается от места впуска, продолжается по мерс течения расплава в формующей полости, распространяясь по пути наименьшего сопротивления. Впуск должен быть расположен таким образом, чтобы вся полость заполнялась равномерно, а падение давления в ней не было бы избыточным. Для конструктора очень важно оценить падение давления, когда он рассматривает принципиальную возможность литья под давлением изделия при использовании выбранного варианта расположения впускных литников. Перепад давления и характер заполнения лучше всего можно оценивать с помощью методов компьютерного анализа [12-15, 134-136]. Эти методы помогают конструктору оценить возможность изготовления изделия, а также проанализировать конструкцию формы задолго до того, как она изготовлена.

Проблемы, связанные с неправильным расположением мест впуска: кратковременные остановки потока расплава, образование воздушных ловушек, видимые линии спая и другие явления — могут быть изучены на стадии компьютерного анализа, что приведет к сокращению общего времени проектирования и будет способствовать улучшению качества изделия.

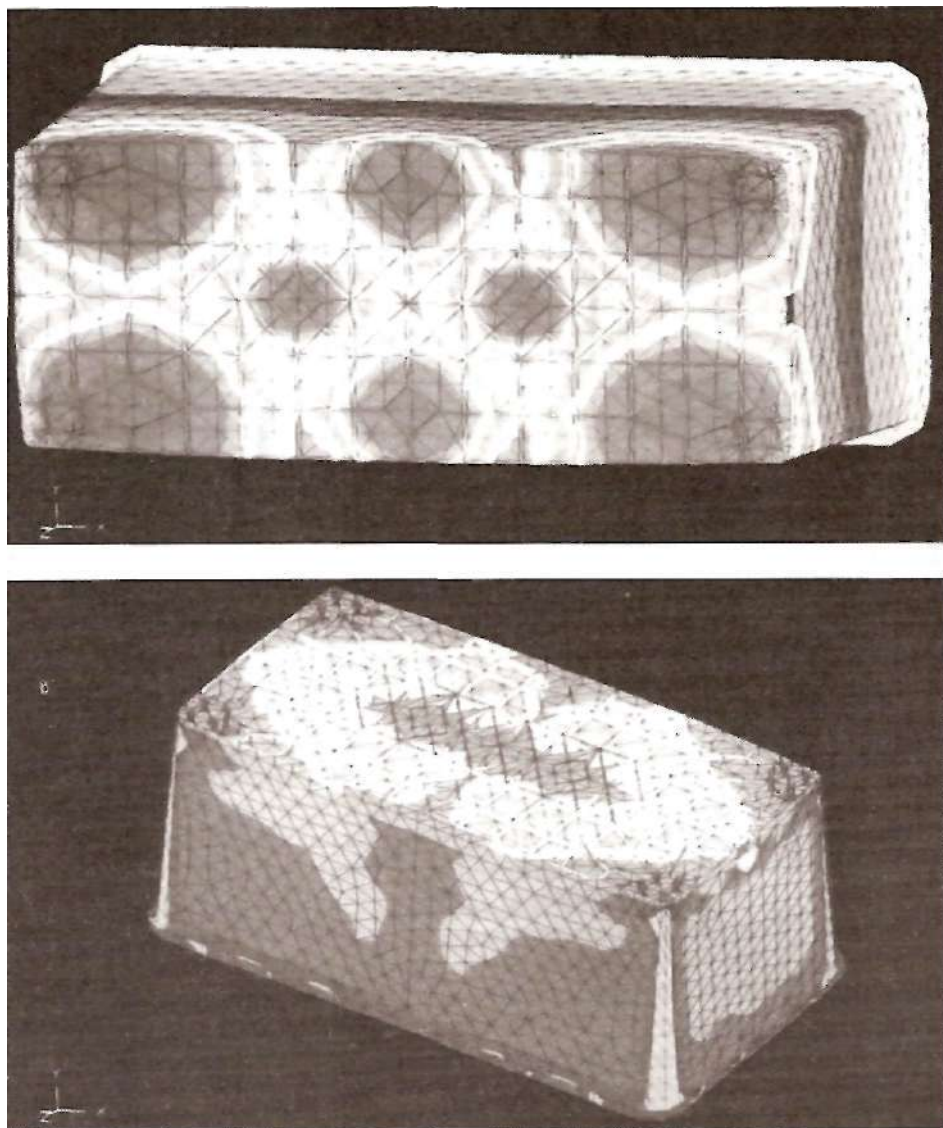


Рис. 2.15. Средства компьютерного анализа используются для определения возможных проблем производства изделия задолго до того, как будет изготовлена литьевая форма. На этих фотографиях показаны результаты компьютерного анализа заполнения формы и охлаждения изделия, который был проведен для одного из самых больших литых под давлением изделий — мусорного бака весом 50 фунтов (50 кг). Конструкция формы была оптимизирована с использованием компьютерной модели, изделия хорошего качества реально могут быть получены при небольших ее (модели) модификациях (с разрешения *Moldflow Pty. Ltd., 2 Corporate Dr., Sheldon, 6T06484*)

Величина перепада (или потери) давления расплава при заполнении формующей полости влияет на основные параметры расплава на всех стадиях процесса формования изделия собственно в литьевой форме (прежде всего на сдвиговые реологические и термические свойства).

Эта величина динамично взаимосвязана (влияет и зависит) от:

1) температуры расплава и равномерности ее распределения, температуры литьевой формы и равномерности ее распределения в зоне формования, скорости впрыска, скорости заполнения и характеру образующегося профиля скоростей;

2) максимально возможного давления впрыска, потерь на трение в паре шнек/плунжер, потерь в узле впрыска и в сопле термопластавтомата;

3) выбора типа литниковой системы — горячеканальной или холодноканальной, конфигурации литниковой системы, оценки возможностей охлаждения/подогрева и вентилирования формы.

Конечно, давление заполнения расплавом формующей полости зависит от большого числа факторов, включая и те, на которые конструктор повлиять не может. Это обстоятельство еще раз подчеркивает важность и необходимость параллельной технологической разработки изделия, для чего полезно использовать компьютерный анализ. Ориентироваться надо не только на геометрические особенности формующей полости, но и учитывать заполнение ее расплавом (то есть расположение мест впуска). Такой подход позволит получить более реалистичную картину, поскольку все перечисленные компоненты влияют на перепад давления расплава и распределение его температуры (рис. 2.16). Рассмотрим как пример стяжку для фиксации кабеля, которая показана на рис. 2.17. Предлагаемые варианты расположения мест впуска для формования этого изделия (см. рис. 2.12, 2.17) показывают, что в случае нескольких впускных литников возможно действительно снизить эффективный путь течения расплава, и, следовательно, перепад давления. Однако в этом случае надо обязательно принимать во внимание, что линии спая потоков расплава будут располагаться перпендикулярно направлению действия напряжений, которые возникают при эксплуатации стяжки. Такое расположение зон ослабленной прочности (участок линии спая) уменьшает срок службы изделия. Использование одного впуска там, где находится тонкий язычок, может привести к проблемам, связанным с пониженным уплотнением и образованием линий спая в области фиксатора, находящегося в противоположном от впуска конце формующей полости, у которого большая толщина стенок. При такой системе расположения впуска очень трудно производить эффективное уплотнение расплава и обеспечивать жесткие требования точности размеров. Расположение впуска со стороны фиксатора даст возможность полностью управлять заполнением формующей полости, поскольку течение потока расплава будет происходить от большей толщины изделия к меньшей. Вероятно, точно также будет формироваться линия спая, но она будет располагаться по всей длине изделия и, можно ожидать, что на прочность она не будет влиять неблагоприятно, поскольку направлена вдоль действующего при эксплуатации изделия напряжения. Если будет выбрано расположение места впуска в зоне фиксатора, то конструктор должен определить, достаточно ли использование только одного впускного литника. Наиболее точно на этот вопрос можно ответить, применяя методы компьютерного анализа или опираясь на данные

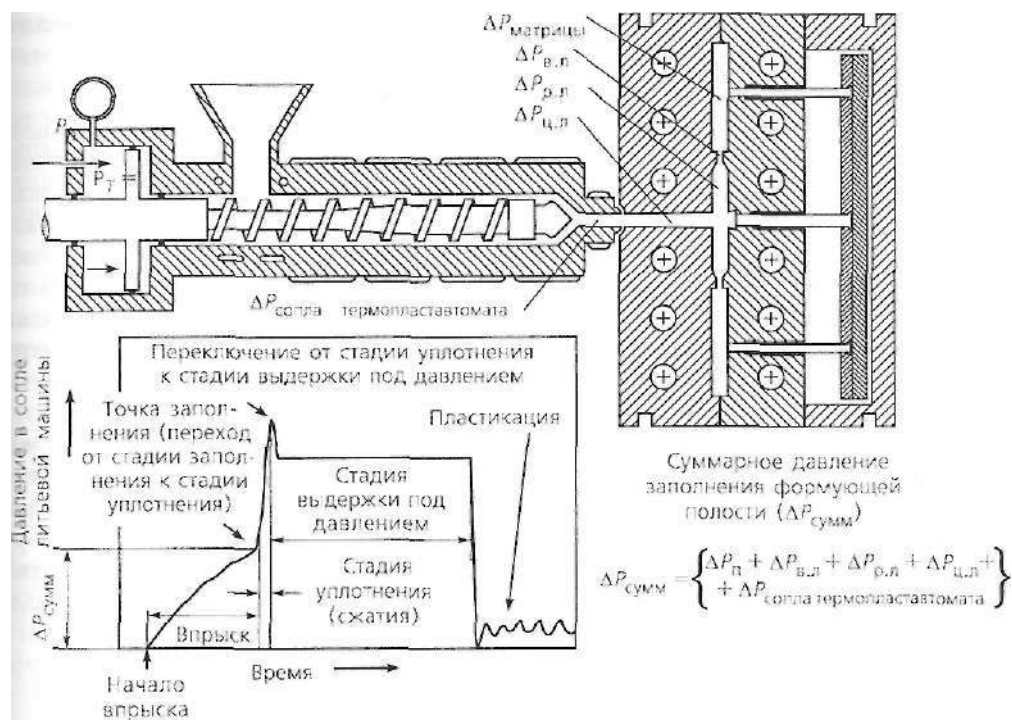


Рис. 2.16. Диаграмма изменения давления при заполнении формующей полости (зависит от параметров термопластавтомата и формы)



Рис. 2.17. Конструкторы должны определить наиболее предпочтительные места расположения впусков и сравнить относительные преимущества и недостатки каждого варианта литниковой системы

о реологических свойствах расплава термопласта, предоставляемые поставщиками материала.

Тестирование расплава в спиральной формующей полости

Такое тестирование часто применяют для сравнительной технологической оценки термопластов. Чтобы получить необходимые данные о возможности заполнения формующей полости — по длине пути расплава при затекании его в спиральный канал (рис. 2.18) — расплав впрыскивается в него при различных режимах переработки. Максимальная длина пути течения расплава, которая может быть достигнута экспериментально, измеряется как функция толщины (глубины) канала в форме (различная глубина обычно создается с помощью сменных вставок). К переменным технологическим параметрам процесса обычно относят: температуру расплава, температуру формы, максимальное давление впрыска и скорость впрыска. Экспериментальные данные чаще всего представляют в виде, аналогичном приведенному на рис. 2.18.

Результаты тестирования расплава по длине течения могут быть использованы для сравнения реологических свойств потока или для определения «формуемости» иначе — возможности использования различных типов и марок термопластов для литья под давлением конкретных изделий; они могут также помочь конструктору изделия принять решение о выборе расположения мест впуска, особенно для изделий

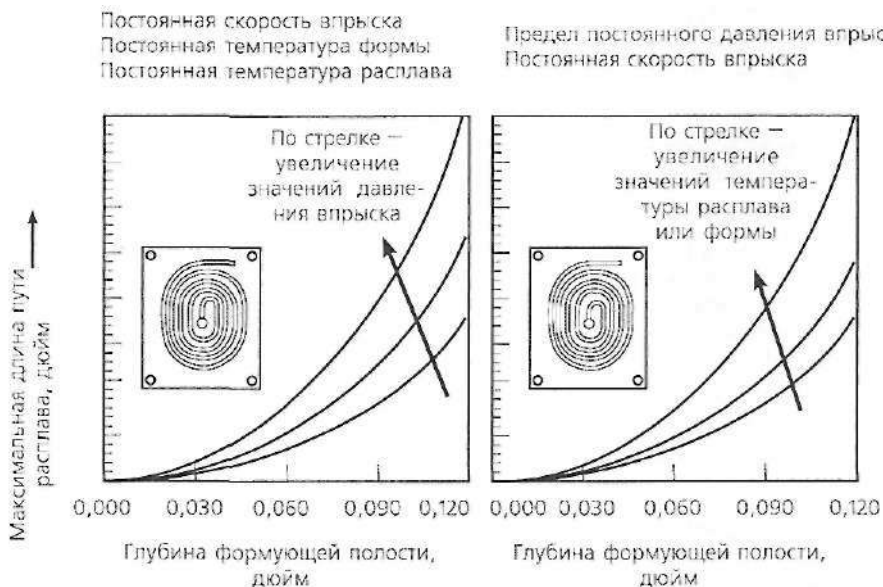


Рис. 2.18. Эмпирические кривые течения расплава в спиральной форме (определяется максимальная длина затекания расплава) дают сравнительную оценку возможности использования конкретной марки материала для заданного изделия. Представлены зависимости максимальной длины пути потока расплава от толщины изделия при различных условиях литья под давлением; слева — от давления впрыска; справа — от температуры расплава или температуры формы

с одинаковой толщиной стенок; однако затруднительно использовать их в случае изделий, подобных стяжке для фиксации кабелей (см. рис. 2.17), поскольку формирующая полость имеет разную толщину. Ситуация усложняется тем обстоятельством, **что** конфигурация литниковых систем в значительной мере влияет на величину перепада давления в формирующей полости. Тем не менее кривые, аналогичные приведенным на рис. 2.18, которые можно получить у поставщиков материалов, содержат для конструктора изделия ценную информацию о свойствах расплава полимера.

Оценка падения давления в формирующей полости

В настоящее время нет альтернативы компьютерному анализу процессов течения и заполнения формирующей полости, но бывают ситуации, когда можно использовать традиционные инженерные методы оценки, принимая решения, учитывающие особенности течения расплава и заполнения расплавом формирующей полости. Этот процесс является сложным (рис. 2.19). Расплав с высокой скоростью впрыскивается в «относительно» холодную форму. Несмотря на то что большинство термопластов являются достаточно хорошими термоизоляторами, по мере поступления в полость формы расплава затвердевающие слои начинают нарастать на ее поверхностях. Фронт потока ведет себя подобно фонтану, за ним следует ламинарный поток расплава — в туннеле между твердыми слоями. Сердцевина потока расплава остается относительно горячей, температура промежуточного слоя между затвердевшими слоями и текучим расплавом определяется эффектами вязкостного нагревания и тепловыми потерями, которые возникают при контакте.

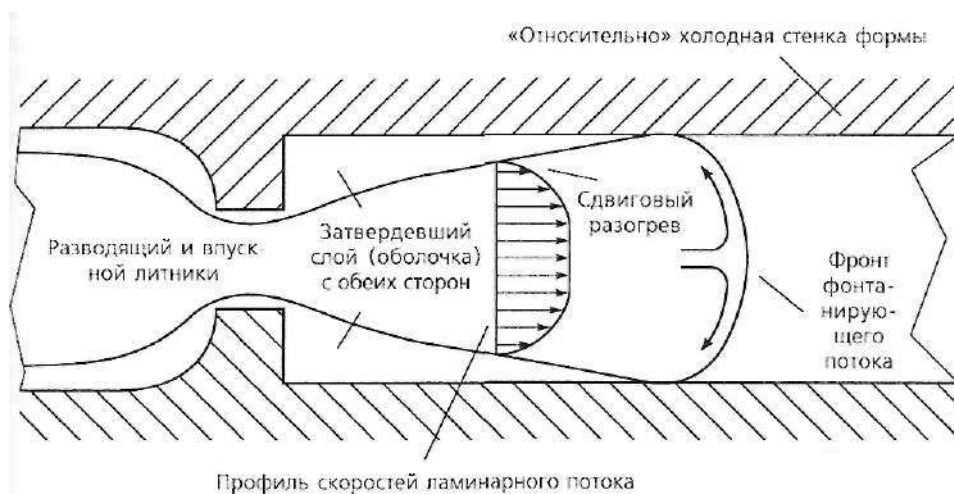


Рис. 2.19. Заполнение формы расплавом под давлением фактически является изотермическим процессом, в котором возникают одновременно ламинарный и фонтанирующий потоки, на поверхностях матрицы и пуансона происходит образование затвердевшего слоя материала благодаря контакту расплава со значительно более «холодными» стенками. Скорость образования затвердевшего слоя зависит от многих факторов и определяется вязкостью массы

Напряжения сдвига и скорости сдвига в плоскости соприкосновения затвердевшего слоя с расплавом в центральной части потока приводят, как правило, к высокой степени ориентации макромолекул, а также создают потенциальную возможность сдвигового разрушения (сдвиговой деструкции). Напряжение сдвига χ в конкретном слое по сечению изделия — есть результат умножения сдвиговой вязкости χ' на скорость сдвига этого слоя $\dot{\gamma}$.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}. \quad (2.1)$$

Напряжения сдвига в пограничной зоне между затвердевшим слоем и расплавом могут быть высокими, так как псевдопластическое поведение потока приводит к возникновению высоких скоростей сдвига на границе зон, а также к высоким значениям вязкости расплава, особенно в зоне, непосредственно примыкающей к охлажденному затвердевшему слою. Напряжения сдвига способствуют ориентации макромолекул расплава, которая как бы «привязывается» к ориентации затвердевшего слоя (по мере его увеличения). С другой стороны, формирование затвердевшего слоя будет затруднено из-за выделения теплоты, возникающей благодаря вязкостному нагреванию при течении расплава. Туннельный поток (или поток уменьшенного сечения) показан на рис. 2.20 при литье под давлением опытного изделия через веерный впуск. Сначала в полость формы впрыскивается порция прозрачного термопласта (что видно по наличию этого материала в углублении для «холодной» капли), а затем — порция окрашенной пластмассы в центральной зоне изделия. Процесс впрыска под давлением является настолько сложным, что невозможно совместно решить две задачи — течения

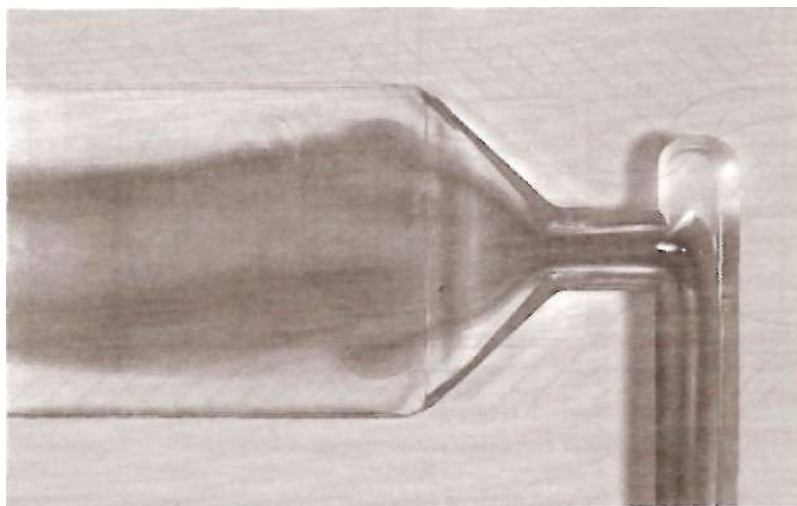


Рис. 2.20. Изделие, изготовленное с помощью веерного впускного литника. Начальная порция впрыска состоит из прозрачного материала, последующая порция из окрашенного материала распространяется в туннеле между затвердевшими поверхностными слоями из прозрачного материала

расплава и теплопередачи — расчетными методами конечных разностей или конечных элементов. Однако если при подсчетах пренебречь эффектами теплопередачи в процессе заполнения формующей полости, то задача значительно упрощается (для изделий, имеющих симметричную форму). Если становится очевидным, что принятое упрощение приводит к ошибочным результатам, то это может быть связано с одним из следующих факторов (или их комплексом):

- время заполнения расплавом формующей полости являются относительно короткими (секунды);
- расплав термопласта отличается относительно низкой теплопроводностью (в принципе, это характерно для большинства пластмасс);
- контактное охлаждение и вязкостное нагревание оказывают взаимоисключающее воздействие.

Ошибка, которая возникает при подсчетах, будет изменяться в каждом конкретном случае. Например, при подсчетах для тонкостенных матриц она будет выше, чем у толстостенных, поскольку толщина затвердевших слоев (со стороны матрицы и пуансона) в процентном отношении от общей толщины стенок будет большей.

Точно также ошибка при подсчетах для литья под давлением термопластов с минеральным наполнителем будет выше, чем для пластмассы без наполнителя — из-за разности теплопроводностей ингредиентов. Инженерный анализ перепадов давления, который будет приведен ниже, представляет довольно грубое описание механизма потерь давления в формующей полости. Но такой упрощенный подход может быть полезен для установления определенных тенденций, помогает в понимании более сложных моделей течения расплава при заполнении, выполненных с использованием компьютерного анализа.

Например, конструктору изделия (рис. 2.21) важно узнать, каким образом изменение толщины изделия (линейки) будет влиять на давление при заполнении формующей полости. Предположим, что процесс проходит изотермически (то есть при постоянной температуре расплава), а режим течения расплава характеризуется постоянной скоростью впрыска в ходе всего цикла. В реальности же температура расплава меняется,

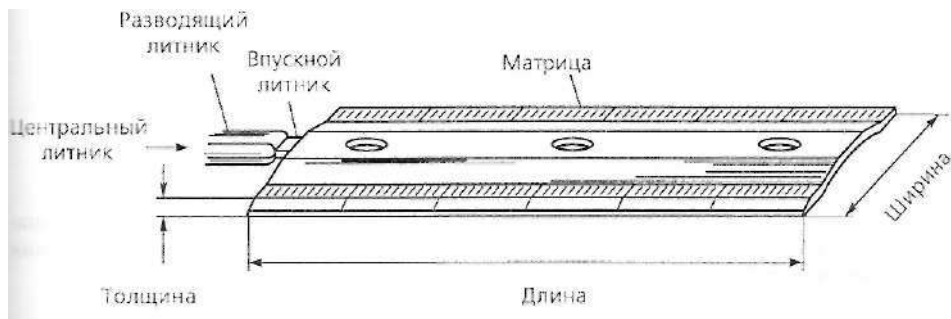


Рис. 2.21. Когда конструкторы изменяют геометрию или толщину изделия, например, линейки, показанной на этом рисунке, то они должны определить, повлияют ли эти изменения на возможность и/или эффективность процесса литья под давлением качественного изделия

а скорость впрыска повышается и понижается. Могут быть сделаны дополнительные уточнения исходя из предположения о симметрии конфигурации изделия и литниковой системы. В этом случае предполагается, что будет использоваться одnogнездная литьевая форма с одной плоскостью разъема (двухплитная).

Поскольку реальное изделие имеет отверстия, особый микрорельеф поверхности, конструктивную кривизну и т. п. (см. рис. 2.21) для расчетов оно представляется упрощенно в виде тела прямоугольного сечения длиной l , шириной W и толщиной H . Мы будем предполагать, что такие особенности, как кривизна изделия или размеры маленьких штырей в матрице, которые используются для формования отверстий в изделии, не оказывают серьезного влияния на величину давления заполнения формирующей полости. Для проведения упрощенного изотермического анализа течения расплава можно условно принять цилиндрической или прямоугольной геометрическую форму поперечного сечения различных элементов изделия и литниковой системы¹.

Изделие будет отливаться под давлением из ударопрочного полистирола. Чтобы оценить перепад (падение) давления в процессе заполнения формирующей полости, должна быть известна сдвиговая вязкость термопласта. Данные о сдвиговой вязкости конкретной марки термопласта обычно предоставляются поставщиком материала — в большинстве случаев в виде таблицы или графика, где приводится зависимость сдвиговой вязкости вблизи стенок от кажущейся скорости сдвига у стенок и от температуры (так называемые «кривые течения»). Если данные о вязкости, которые предоставляет поставщик материала, описываются им как «кажущиеся», то это означает, что они не скорректированы с учетом неньютоновского псевдопластического поведения расплава, которое характерно для большинства термопластов. Влиянием давления на сдвиговую вязкость термопласта часто пренебрегают.

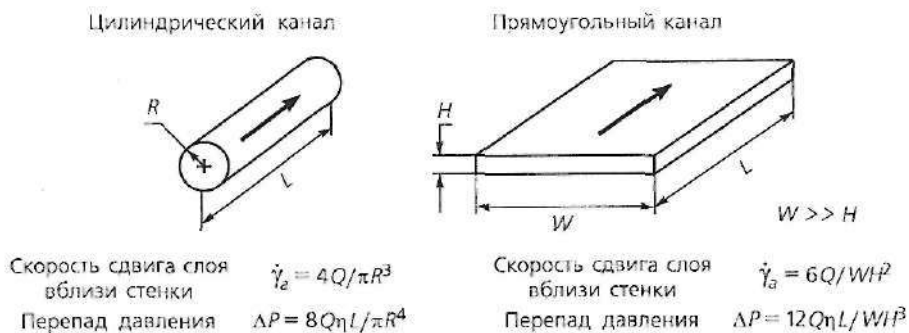


Рис. 2.22. Уравнения для оценки кажущейся скорости сдвига и перепада давления для каналов различного поперечного сечения. Уравнения получены из предположения о том, что поток является изотермическим, ламинарным и ньютоновским

¹ Пример и анализ, приведенный автором, несмотря на заявленное стремление к упрощению, может оказаться сложным для восприятия (именно из-за слишком очевидного несоответствия геометрии изделия и литниковой системы (рис. 2.21) и принятых для расчета геометрических характеристик (табл. 2.2). На практике желательно избегать чрезмерных упрощений. — Примеч. науч. ред.

Таблица 2.2. Условное представление геометрической конфигурации литниковой системы и формующей полости (см. рис. 2.21) для проведения упрощенного изотермического анализа течения расплава при заполнении

Элемент литьевой формы	Основные геометрические характеристики условно принятой формы поперечного сечения канала, дюйм
Цел пральны и Л] гл гик	Цилиндрической канал 0 0,313 x 2,000 (длина), (среднее значение)
Разводящий литник	Цилиндрической канал 0 0,250 x 2,250 (длина)
Впускной литник в торце изделия	Прямоугольный канал 0,080 (глубина) x 0,400, (ширина) x 0,120 (длина)
Формующая полость матрица	Прямоугольный канал 0,100 (глубина) x 1,500 (ширина) x 6,030 (длина)

Для расплава, подчиняющегося степенному закону, истинное или скорректированное (по Рабиновичу) значение сдвиговой вязкости $r\backslash_v$ может быть определено с помощью следующих уравнений:

цилиндрический канал

$$\eta_T = [4n / (3n + 1)] \eta_a;$$

(2.2)

прямоугольный

$$\eta_T = [3n / (2n + 1)] \eta_a;$$

(2.3)

где n — показатель степени (для ньютоновских жидкостей $n = 1$, для нсевдопластических — $n < 1$).

Обычно в практике проведения инженерных расчетов используют скорректированные значения вязкости. В этом случае предполагается, что перепад давления будет очень низким, что позволяет не учитывать влияния затвердевшего слоя. Здесь будут

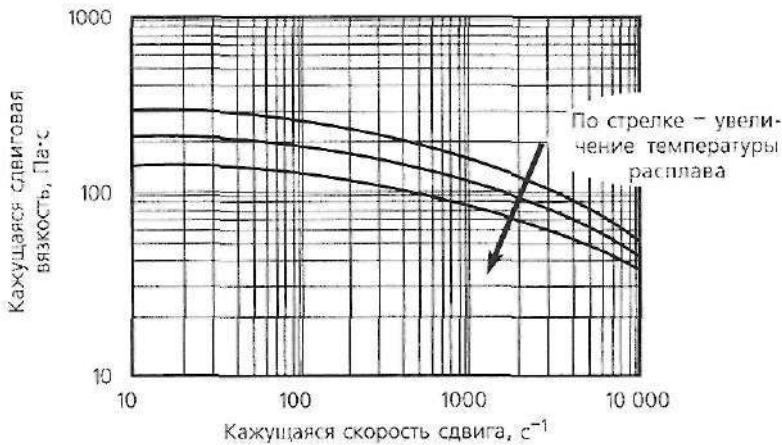


Рис. 2.23- Обобщенные кривые зависимости кажущейся сдвиговой вязкости термопластов от температуры и кажущейся скорости сдвига; влиянием давления па сдвиговую вязкость часто пренебрегают; течение расплавов большинства термопластов принимается как псевдоиластическое

использоваться значения кажущейся вязкости и скорости сдвига расплава, поскольку расчет производится только для определения тенденции, а не точного предсказания значений падения давления.

Очень важно знать, были ли учтены в представленных данных о сдвиговой вязкости расплава «конечные ошибки». Данные о сдвиговой вязкости обычно получают с помощью капиллярного вискозиметра или шелевого реометра (рис. 2.24). «Конечные ошибки» представляют собой ошибки экспериментального характера, которые возникают, в основном, из-за потерь давления на входе капилляра при перемещении потока расплава из цилиндра реометра, имеющего относительно большой диаметр, в капиллярную фильеру с относительно маленьким диаметром. Когда данные о сдвиговой вязкости получают с помощью шелевого реометра, как показано на рис. 2.24, *Б*, то «конечные ошибки» будут отсутствовать, поскольку падение давления измеряется напрямую в выделенной зоне потока. Когда данные о сдвиговой вязкости получают с использованием реометра с круглым капилляром (рис. 2.24, *а*), то «конечные ошибки» повлияют на результат тестирования. «Конечные ошибки» могут быть минимизированы (в процентном отношении) за счет использования длинных капилляров, или их можно скорректировать с помощью какого-либо метода коррекции, например, с помощью алгоритма Бэгли [16]. Поскольку скорректированные значения вязкости более точно описывают поведение установившегося сдвигового потока пластмассы, то значения вязкости без окончательной коррекции могут быть более подходящими для оценки (при данном давлении) процесса заполнения формующей полости, так как потери давления в местах перехода канала от сечения к сечению не учтены в данном случае. Расчет будет точнее, если в нескорректированные значения вязкости «внесены» потери в местах соединения каналов разной конфигурации и размеров.

Похожие потери в местах соединений каналов могут быть рассчитаны в процессе заполнения формы, когда расплав меняет направление перемещения или находится в переходной зоне (например, переходит из разводящего литника во впускной).

Закономерности изменения сдвиговой вязкости для ударопрочного ПС показаны на рис. 2.25. Условное представление конструктивных элементов, особенности ведения технологического процесса, температура расплава и время заполнения формующей полости приведены ниже.

Определение условий процесса

Конструктор заранее должен оценить условия переработки термопласта литьем под давлением для конкретного изделия. Для этого следует знать температуру расплава и время заполнения формующей полости. Для проведения компьютерного анализа необходимо задать и температуру формы. Конструктор может принять решение на основе предыдущего опыта или выбрать более рискованные условия с точки зрения уменьшения неблагоприятных рисков (например, минимальную температуру/максимальную вязкость). Конструктор выполняет серию расчетов, необходимых для того, чтобы конструкция изделия и литьевой формы обеспечивала максимально широкий диапазон параметров процесса переработки. Предположим, что расплав будет впрыскиваться при минимальной (рекомендуемой) температуре переработки, равной 200 °С, с общим временем заполнения 1,5 с.

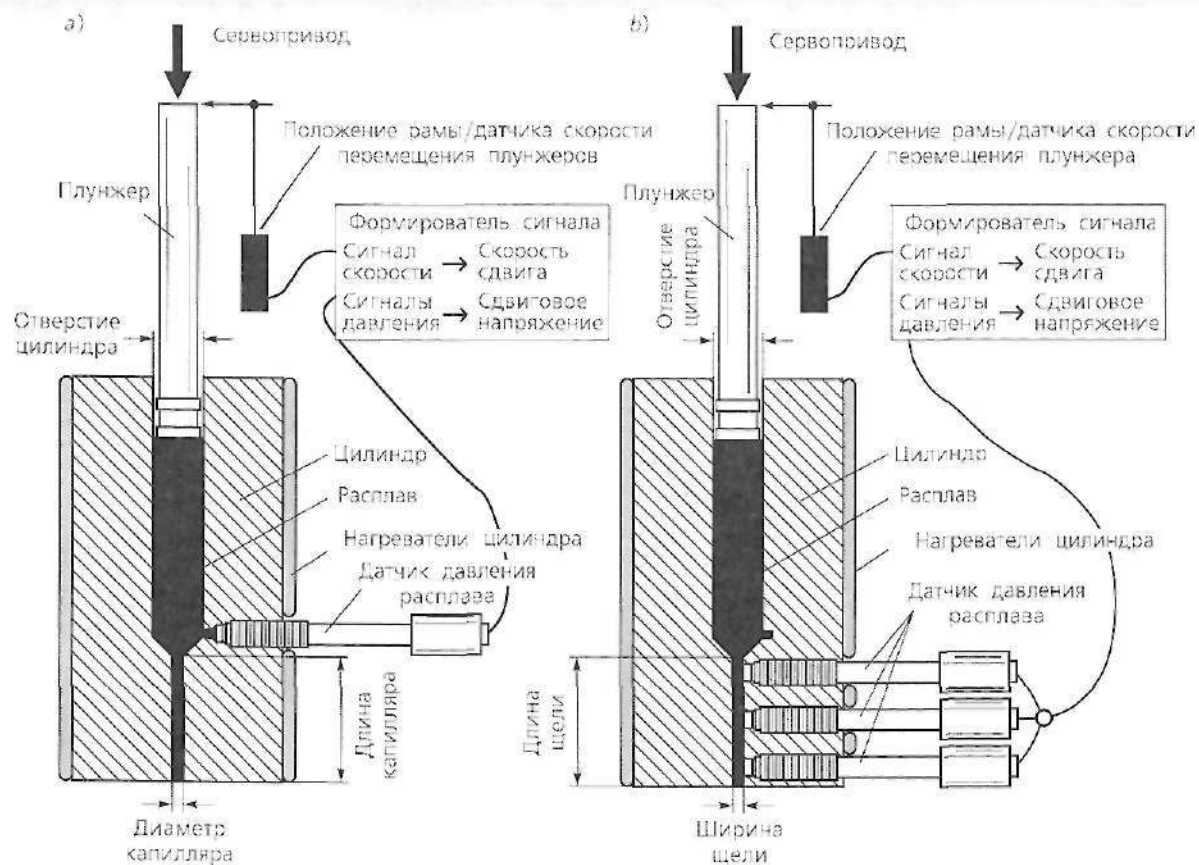


Рис. 2.24. Принципиальные схемы капиллярных и щелевых реометров, используемых для получения данных о сдвиговой вязкости расплавов полимеров (при различных температурах и скоростях сдвига)

Определение объема пластмассы, необходимого для получения изделия

Общий объем изделия может быть определен суммированием объемов расплава, необходимого для создания литниковой системы и изделия. Для этого, учитывая принятые условные упрощения, используются следующие формулы:

$$\text{цилиндрический канал} \quad V = \pi \cdot R^2 \cdot L; \quad (2.4)$$

$$\text{прямоугольный канал} \quad V = L \cdot W \cdot H. \quad (2.5)$$

Определение скорости объемного течения расплава

Скорость объемного течения расплава связана с характером заполнения формующей полости; она должна быть рассчитана до определения падения давления. В данном случае (см. рис. 2.21) имеется одnogнездная литьевая форма для изготовления линейки, скорость объемного течения расплава через каждое сечение полости будет одинаковой, поскольку в ней только один поток (если предположить, что расплав является несжимаемой жидкостью).

Скорость объемного течения расплава для центрального литника Q_v будет равной скорости объемного течения в разводящем литнике Q_d и во всех последующих элементах литниковой системы и формующей полости Q :

$$Q_{ц.л} = Q_{р.л} = Q_{в.л} = Q_{л} = Q_{сумм} \quad (2.6)$$

Следовательно, суммарная скорость объемного течения расплава $Q_{сумм}$ равна общему его объему (объем изделия плюс объем расплава в литниковой системе) сумм, деленному на время заполнения формующей полости t_f .

$$Q_{сумм} = V_{сумм} / t_f \quad (2.7)$$

Если, например, линейка изготовлена в сбалансированной двухгнездной литьевой форме, то скорость объемного течения расплава через центральный литник будет равна суммарному объему отливки, деленному на скорость заполнения. Скорость объемного течения потока для каждого разводящего и впускного литника, а также для полости будет наполовину меньше скорости объемного течения через центральный литник, поскольку в данном случае поток разделяется на две части.

Определение кажущейся скорости сдвига

Сдвиговая вязкость расплава термопласта является функцией его температуры и скорости сдвига. Температура расплава ударопрочного ПС ранее была определена равной 200 °С, кажущаяся скорость сдвига в каждом сечении потока должна быть определена до расчета сдвиговой вязкости в каждом сечении с помощью набора кривых изменения кажущейся вязкости, приведенных на рис. 2.25.

Ламинарный поток расплава может быть представлен как поток с нулевой скоростью у стенок и максимальной скоростью вблизи его центральной оси. Относительная скорость прилегающих друг к другу слоев приводит к сдвиговому напряжению и ориентации макромолекул или деформации. Градиент относительной скорости (или скорости сдвига) является максимальным вблизи стенки и минимальным в центре потока. Кажущаяся вероятная скорость сдвига вблизи стенки может быть определена с использованием следующих уравнений (принятых для упрощенных условий):

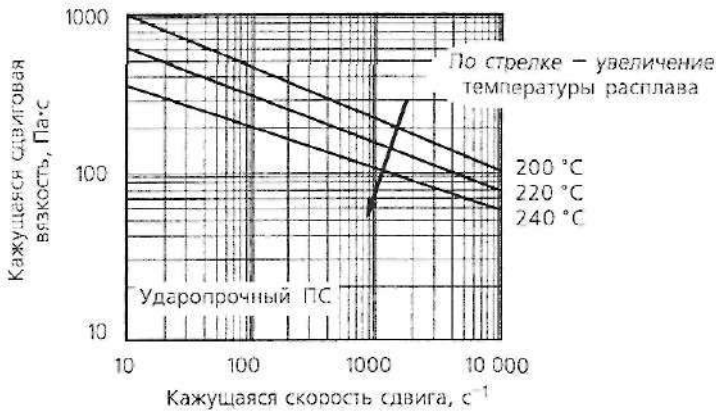


Рис. 2.25. Кажущаяся сдвиговая вязкость ударопрочного ПС, из которого отлито под давлением изделие (по рис. 2.21)

цилиндрический канал $\dot{\gamma}_a = [4 \cdot Q] / [\pi \cdot R^3];$ (2.8)

прямоугольный канал $\dot{\gamma}_a = [6 \cdot Q] / [W \cdot H^2].$ (2.9)

Значения кажущейся скорости изменяются вместе с изменением скорости потока и изменением геометрической формы сечения потока. Например, скорости сдвига во впускном литнике, через который расплав поступает непосредственно в формующую полость, будет выше скорости в разводящем литнике — из-за разницы в поперечном сечении канала (рис. 2.26).

У большинства термопластов вязкость расплава повышается с возрастанием скорости сдвига из эффекта макромолекулярного выстраивания (то есть поведение большинства расплавов пластмасс псевдопластическое). Уравнения (2.8) и (2.9) были получены в предположении наличия ньютоновского (параболического) профиля скоростей. В реальных условиях псевдопластичные пластмассы имеют тенденцию «завихряться»,

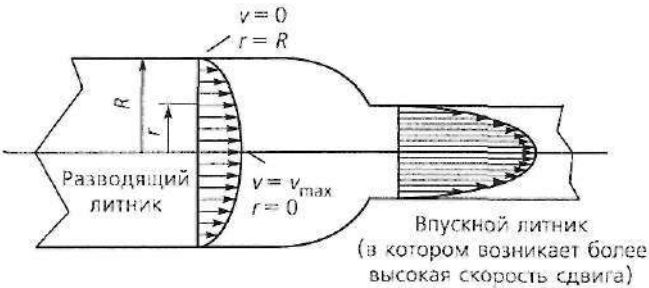


Рис. 2.26. Значения кажущейся скорости сдвига изменяются вместе с изменением скорости потока расплава и геометрией поперечного сечения потока; на рисунке показано, что кажущаяся скорость сдвига вблизи стенок во впускном литнике значительно больше значения, которое наблюдается в литниковой системе из-за изменения профиля скоростей, вызванного уменьшением величины поперечного сечения

что будет приводить к более высоким скоростям сдвига вблизи стенок и более низким скоростям сдвига в центре потока по сравнению с ньютоновскими жидкостями.

Определение кажущейся вязкости расплава

Кажущаяся вязкость расплава термопласта может быть определена, когда известны значения температуры расплава и кажущихся скоростей сдвига. В этом случае для высокопрочного полистирола значения кажущейся вязкости могут быть получены непосредственно из зависимостей вязкости, приведенных на рис. 2.25. Даже если мы сделаем предположения о постоянной температуре расплава (200 °C), вязкость расплава в сечении формирующей полости и в литниковой системе будет различной, поскольку кажущаяся скорость сдвига вблизи стенок будет также различной.

Определение величины перепада давления в форме

Общая величина падения давления $\Delta P_{\text{сумм}}$ при заполнении формирующей полости будет равна сумме перепадов давления вдоль каждого участка течения расплава:

$$\Delta P_{\text{сумм}} = \sum \Delta P_i = \Delta P_{\text{ц.л}} + \Delta P_{\text{р.л}} + \Delta P_{\text{в.л}} + \Delta P_{\text{ф.л}} \quad (2.10)$$

Перепады давления па отдельных участках могут быть вычислены, поскольку известна их геометрическая форма, скорость потока и значения вязкости:

$$\text{цилиндрический капал} \quad \Delta P = [8 \cdot Q \cdot \eta \cdot L] / [\pi \cdot R^4]; \quad (2.11)$$

$$\text{прямоугольный канал} \quad \Delta P = [12 \cdot Q \cdot \eta \cdot L] / [W \cdot H^3]. \quad (2.12)$$

Результаты упрощенного изотермического анализа приведены в табл. 2.3. Перепад давления заполнения формирующей полости, вычисленный по уравнению (2.10), может оценить мгновенное значение давления при заполнении, как показано на рис. 2.16. Хотя абсолютное значение давления, которое было определено таким образом, будет приблизительным (ошибка связана с большим числом сделанных допущений), эта процедура помогает конструктору при выборе решений, связанных с получением сбалансированного потока расплава, а также в других случаях. Если есть возможность, то при расчетах всегда следует использовать методы компьютерного анализа.

Таблица 2.3. Результаты упрощенного изотермического анализа заполнения формирующей полости (см. рис. 2.21)

Элемент формы	Объем расплава в соответствующем элементе, дюйм ³	Скорость объемного течения потока, дюйм ³ /с	Кажущаяся скорость сдвига, с ⁻¹	Кажущаяся вязкость		Перепад давления	
				Па · с	фунт · с / дюйм ²	МПа	фунт / дюйм ²
Центральный литник	0,154	0,782	259	320	0,046	2,1	306
Разводящий литник	0,110	0,782	510	270	0,039	4,9	716
Впускной литник	0,004	0,782	1830	180	0,026	1,0	149
Формирующая полость—матрица	0,905	0,782	312	305	0,044	11,4	1650
Итого:	1,173	—	—	—	—	19,4	2820

2.2.4. Конструктивные способы регулирования (ускорения, ограничения) течения расплава в формующей полости

Направляющие/ограничители потока

Обычно считается, что надо добиваться наиболее равномерного распространения расплава по формующей полости. Идеально, если поток, распространяющийся из области впуска, достигает всех крайних точек на периферии формующей полости одновременно. Рассмотрим изделие, которое отливается под давлением через центральный литник (рис. 2.27). В начальной стадии заполнения наблюдается радиальное или дисковое течение потока расплава.

Фронт потока расплава достигает левой и правой сторон полости задолго до того, как верхняя и нижняя ее части оказываются полностью заполненными. Это приводит к ситуации, когда одна область отливки «переполнена», а другие еще недостаточно заполнены. Фактически это приводит к неравномерной усадке изделия, остаточным напряжениям в нем и короблению. Другие варианты литниковой системы с несколькими

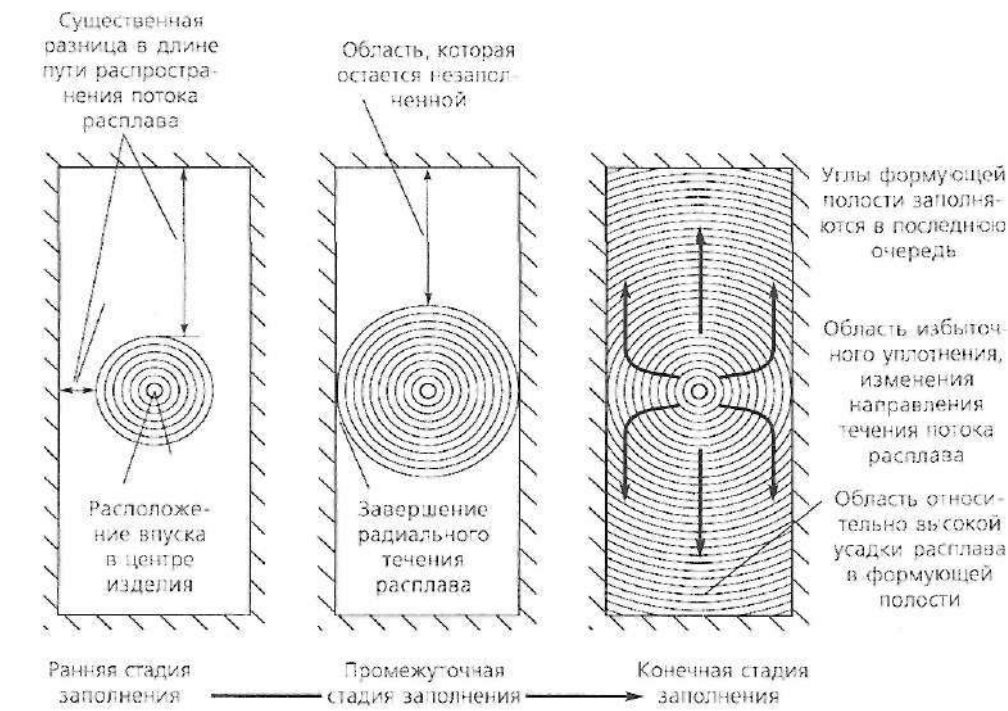


Рис. 2.27. Заполнение формующей полости для прямоугольного изделия через центральный литник может привести к переуплотнению массы в месте впуска, а также к изменениям направления течения расплава, когда он начинает течь между затвердевшими слоями (в «канале» между ними)

впусками для прямоугольной отливки показаны на рис. 2.28. Такие конфигурации могут быть реализованы с помощью горячеканальной литниковой системы или в трехплитной литьевой форме.

Как и в варианте с центральным литником (см. рис. 2.27), при двух впусках не удастся избежать переуплотнения массы и изменения направления течения потока расплава, однако такие эффекты наблюдаются в гораздо меньшей степени. Следует заметить, что при двух впусках при слиянии двух фронтов потока образуется зона спая. На рис. 2.28 показано, что при трех впускных литниках заполнение становится более равномерным, однако углы отливки и удаленные области, где сливаются потоки и образуются спай, заполняются в последнюю очередь.

Из рассмотренных литниковых систем, вариант с тремя впусками оказывается наилучшим с точки зрения выбора пути (то есть наиболее короткого) течения расплава и равномерного уплотнения. Именно этим вариантом расположения мест впуска следует пользоваться, если линии спая и следы от литников не будут ухудшать внешний вид пластмассовых изделий.

Хотя использование системы с тремя впусками (рис. 2.28) приводит к общему улучшению ситуации с заполнением, зоны углов изделия прямоугольной или квадратной формы все же остаются участками, которые заполняются в последнюю очередь, и это невозможно изменить при радиальном распространении потока. Однако заполнение может быть изменено таким образом, чтобы фронт потока расплава

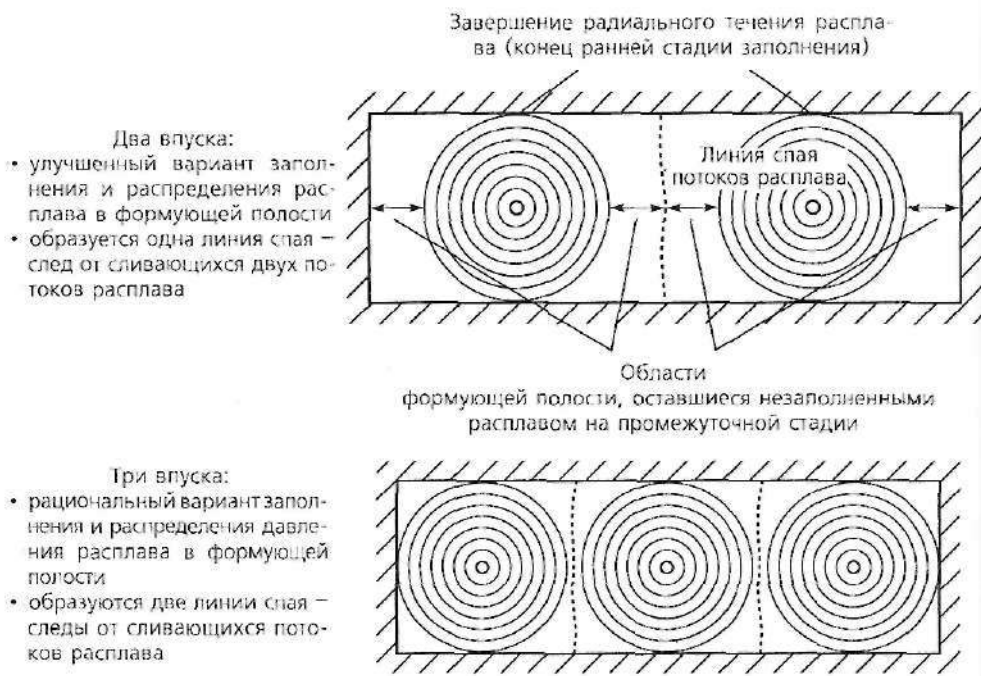


Рис. 2.28. Увеличение количества впусков ускоряет заполнение формирующей полости, однако это приводит к образованию линий спая

достигал самых удаленных зон в формующей полости одновременно со всеми другими участками. Чтобы добиться такого сбалансированного заполнения, перепады давления расплава вдоль каждого потока — от впуска до конечной точки — должны быть одинаковыми (например, перепад давления от впускного литника до угла изделия должен быть равен перепаду давления на пути от впускного литника до крайней стенки полости). Перепад давления расплава может быть сбалансирован за счет локальных изменений толщины изделия. Локальное (конкретное по месту и размеру) увеличение толщины стенки (для улучшения условий течения потока расплава) играет роль своего рода подпитывающих, ускоряющих поток внутренних литников (это «направляющие» потоков); локальное уменьшение толщины стенки может способствовать ограничению течения потока расплава, создавая большее сопротивление заполнению более тонких участков отливки (это «ограничители» потоков). В отливках типа коробки (см. рис. 2.29) можно увеличивать толщину стенок в областях, находящихся по диагоналям вблизи углов изделия, чтобы улучшить течение, продвижение потока расплава в этих максимально удаленных от мест впуска участках. Это один из тех немногих случаев, когда конструктору приходится сознательно нарушать важное правило — сохранять в изделии, по-возможности, одинаковые толщины стенок. На практике неравномерность толщины стенок при таких решениях оказывается очень

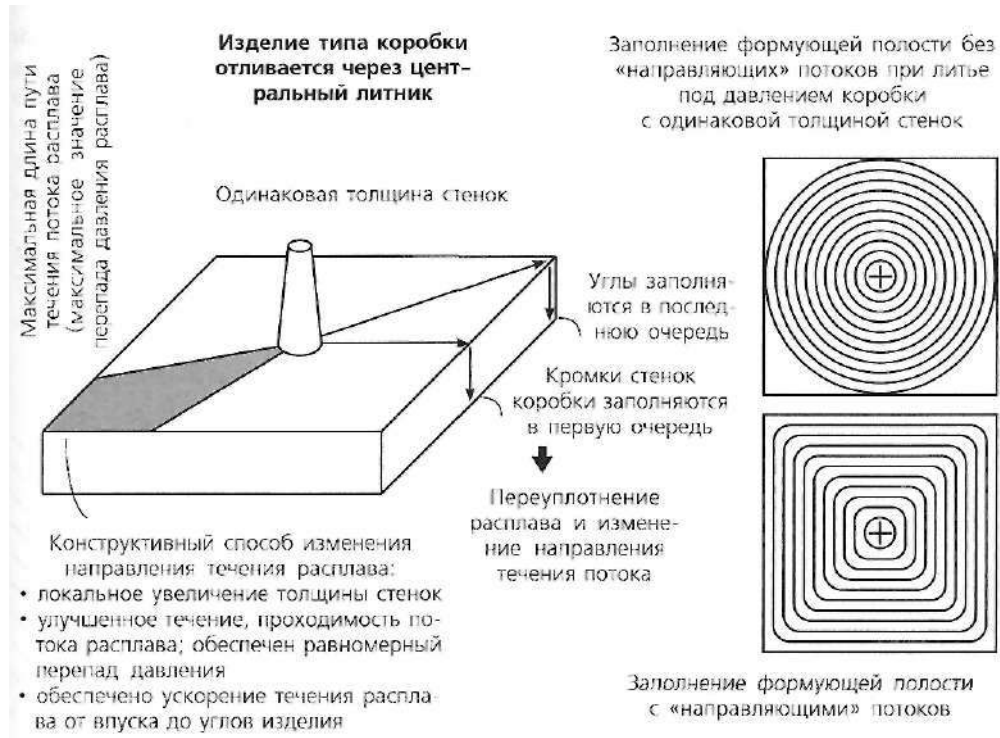


Рис. 2.29. Конструктивные способы регулирования течения расплава могут быть использованы для более сбалансированного заполнения формующей полости

незначительной. Компьютерный анализ даст полезные и важные рекомендации при конструировании изделий с «направляющими» и «ограничителями» потока расплава. При этом важно рассчитывать варианты путей течения потока расплава как отдельных потоков конечной ширины с тем, чтобы получить сбалансированный перепад давления. «Направляющие» потока располагают локально и только на пути от места впуска по направлению к самым удаленным областям отливки, а «ограничители» (например, более толстые стенки или перегородки) могут быть установлены в тех зонах формирующей полости, которые без них легче всего заполнить. Такие конструктивные изменения обычно делают в тех областях, поверхность которых не будет видна или будет малозаметна в готовом изделии.

Конструктивно «направляющие» или «ограничители» потока должны быть так умело расположены в изделии, чтобы заранее предусмотреть риски, возникающие из-за получающейся разнотолщинности стенок (например, концентрация напряжений, неравномерное охлаждение и усадка). Ребра, которые обычно используются для повышения прочности изделий, могут также применяться в качестве «направляющих» потока в тех случаях, когда точно рассчитан их размер и место расположения. Распределение потока расплава в формирующей полости будет также зависеть от конструкции системы охлаждения формы. При более высоких температурах литевой формы течение потока расплава будет более интенсивным.

Процесс заполнения формирующей полости изделия, представленный на рис. 2.28, также может быть изменен при трех впускных литниках и расположенных в углах коробки, на диагоналях ускорителей течения, «направляющие» потока, локально увеличенные по толщине стенки изделия (см. рис. 2.28 и 2.30). Правильно сконструированные «направляющие» потока практически полностью устраняют недоливы и гарантируют равномерное уплотнение расплава, что способствует получению изделий более высокого качества.

Например, очень трудно сбалансировать поток расплава в формирующей полости при литье под давлением через центральный литник изделия (при показанных на рис. 2.27 соотношениях размеров), так как конструкция и вариант впрыска создают высокую степень несбалансированности.

Три впуска и направляющие потока:

- наиболее равномерное заполнение расплавом и распределение давления в формирующей полости
- образование двух линий спая
- для ускорения течения расплава требуется изменять толщину стенок, либо добавлять ребра в диагональных направлениях

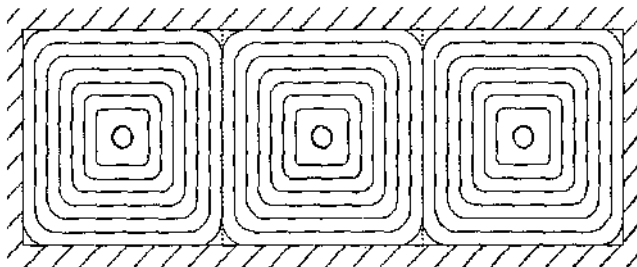


Рис. 230. Варианты равномерного заполнения расплавом формирующей полости через три впуска и расположения направляющих потока вдоль диагоналей изделия

Перетекание и завихрение потока расплава

Многие изделия функционально должны иметь переменную толщину стенок, хотя, в принципе, этого следует избегать. Переменная толщина стенок — источник неравномерной усадки (что уже обсуждалось в данной главе), а также затруднений при заполнении формующей полости [17].

Изделие, которое изображено на рис. 2.31, в центральной части относительно тонкое, а вокруг нее выполнен обод большей толщины. Конструктор расположил впуск со стороны обода, видимо, с тем расчетом, чтобы расплав в толстых стенках хорошо уплотнялся даже после затвердевания топкой центральной части. К сожалению, при таком варианте заполнение формующей полости начинается с утолщенной части изделия — обода, возле которого образуются «завихрения» расплава, поскольку он будет перетекать в область с минимальным сопротивлением. Расплав будет перетекать в центральную часть до тех пор, пока не заполнятся толстостенные зоны, после чего основной поток будет продолжать течение до полного заполнения. Подобные особенности заполнения (перетекание и завихрения) могут приводить к возникновению воздушных ловушек и недоливов. В случае, изображенном на рис. 2.31, тонкая центральная часть изделия будет действовать как нежелательный «ограничитель» потока. Самый простой способ исправления данной ситуации заключался бы в обеспечении равнотолщинности изделия. Вообще, любые, даже необходимые изменения толщин изделия следует сводить к минимуму. Рациональное расположение впусков в тонкостенных областях может упрощать их (областей) заполнение, но одновременно будут возникать проблемы, связанные с заполнением толстостенных областей. Для изделий с переменной толщиной особенно настоятельно рекомендуется проводить компьютерный анализ заполнения формующей полости, чтобы предупреждать или минимизировать негативные влияния перетекания потоков расплава и образования завихрений. На практике достигают сбалансированного распределения потока за счет изменения литниковой системы или регулирования толщин изделия.

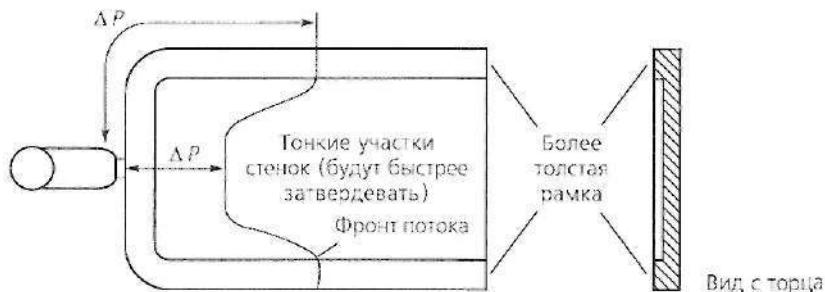


Рис. 2.31. Когда изделия из термопластов имеют как толстые, так и тонкие стенки, при заполнении формующей полости расплав будет первоначально затекать и в зоны, соответствующие толстым стенкам, поскольку в этих местах сопротивление течению будет наименьшим

Сравнение многогнездных и «семейных» литевых форм

Многие пластмассовые изделия состоят из нескольких компонентов — деталей, полученных литем под давлением, для сборки которых надо применять дополнительные технологические операции, или предоставлять сборку потребителю. Когда изделие состоит из нескольких деталей, тем более изготовленных из различных пластмасс, **надо** сконструировать их и изготовить комплект литевых форм (или набор сменных вставок к одной форме), чтобы затем получить каждую из деталей (компонентов) такого изделия в отдельности. Альтернативой могут служить (если исключить ситуации, связанные с изготовлением прототипов или небольших партий изделий) многогнездные «семейные» формы с самозапирающимися впускными литниками (соплами), в которых отливают под давлением все необходимые детали одновременно, за один цикл (если детали, из которых собирается изделие, из одного и того же термопласта).

Выбор варианта — комплект одногнездных форм или сбалансированная многогнездовая литевая форма высокой производительности — более предпочтителен, чем вариант «семейной» формы. Однако при небольшом объеме производства «семейная» форма (например, показанная на рис. 2.32) часто может рассматриваться как более экономичный вариант. Очень важно при этом подобные формы конструировать таким образом, чтобы каждое гнездо заполнялось одновременно, в один и тот же момент (как естественно сбалансированная многогнездовая форма). Сбалансированного потока расплава в «семейных» формах можно добиться за счет правильного расположения гнезд, а также за счет подбора размеров (длины и диаметра) литников с таким расчетом, чтобы выровнять перепад давления в каждой «ветви» потока. Нерационально

Впрыск в сбалансированную многогнездную форму (слева):

- естественно сбалансированный поток
- сбалансированное расположение гнезд в форме буквы «Н»
- идентичные наборы матриц/пуансонов

Четырехгнездовая «семейная» форма (справа):

- искусственно сбалансированный поток
- отдельные контуры охлаждения для каждого гнезда
- отдельные запирающиеся впускные литники в каждом гнезде

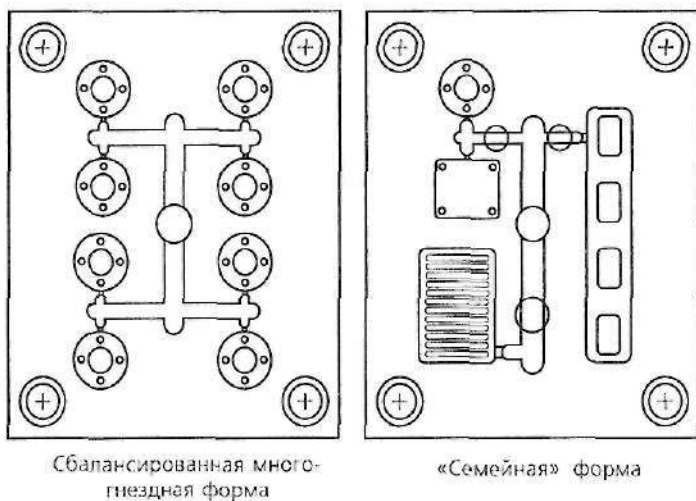


Рис. 2.32. Многогнездовая и «семейная» литевые формы должны обеспечивать сбалансированный поток расплава, чтобы избежать возникновения перетекания или переуплотнения расплава. Впускные литники с самозапирающимися соплами и применение отдельных контуров охлаждения помогают технологам при запуске серийного производства пластмассовых изделий

сконструированную, несбалансированную форму затруднительно эксплуатировать, поскольку, например, одна из деталей может оказаться переуплотненной, с увеличенными размерами, а другая, наоборот, с уменьшенными размерами. Изменение условий литья под давлением в целях достижения заданной точности размеров одной детали в «семейных» формах может автоматически привести к возникновению проблем с другими деталями. Когда необходимо изготавливать детали в «семейной» форме, важно так ее сконструировать, чтобы каждое гнездо имело отдельный контур охлаждения. В этом случае возможно производить регулировку температуры для каждой формирующей полости, что дает технологам дополнительные «рычаги» управления процессом. Дополнительным «преимуществом» применения самозапирающихся впускных литников (сопел) является возможность — в качестве последнего средства — производить деталь индивидуально. Самозапирающиеся сопла устанавливаются в таких местах, где легче разместить «ограничители» потока. Хотя эксплуатация «семейных» форм вызывает определенные неудобства, они имеют и очевидные преимущества. Например, практически устраняется проблема совпадения цвета отдельных деталей, поскольку все детали отливаются в одинаковых условиях и за один впрыск.

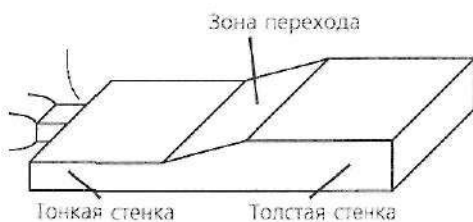
Производственные затраты на подготовку к сборке и транспортировку могут быть минимизированы, поскольку в результате одного впрыска получают необходимый для сборки изделия комплект, поставляемый покупателю.

Расположение мест впуска для литья под давлением разнотолщинных отливок

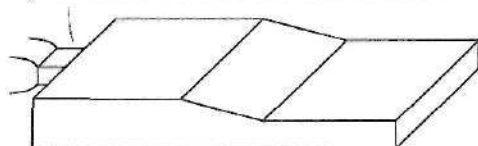
Когда в изделии из пластмассы, получаемом литьем под давлением, имеются области различной толщины, следует отдавать предпочтение расположению впусков в более толстых местах отливки, как показано на рис. 2.31 и 2.33. Более толстая область отливки требует большего количества материала при заполнении формирующей полости и большей компенсации усадки, поэтому место впуска должно располагаться как можно ближе именно к ней. Если это не сделано, то тонкие участки, расположенные между впуском и толстостенной областью, будут затвердевать раньше, а из-за этого будет утрачена возможность достаточно плотно заполнить расплавом утолщение в этой области, а также обеспечить хорошее качество поверхности изделия. Слишком далекое от толстостенных участков расположение мест впуска будет приводить к внешним дефектам. Если по какой-либо причине впускной литник должен быть установлен в тонкостенной области, то можно создать «направляющий» поток — внутренний литник или модифицированное ребро — чтобы сохранить открытым канал для течения расплава на стадиях уплотнения и выдержки под давлением, как показано на рис. 2.33 [18].

Расположение впусков в толстостенных областях пластмассового изделия дает возможность управлять процессом заполнения формирующей полости. При этом возможно создать условия для получения не всегда желательного так называемого «струйного» заполнения [19]. Струйное заполнение возникает, когда впрыск осуществляется в глубокую открытую полость. При струйном заполнении расплав не распространяется фонтанирующим фронтом. Если происходит струйное заполнение, то нельзя получить качественную поверхность, хороший внешний вид изделия. Струи расплава (которые похожи на переплетенные веревки), будут затвердевать еще на ранних стадиях заполнения формы, что не позволяет им нормально смешиваться (и свариваются) друг с другом. При этом будут снижены уровни механических и химических свойств изделий.

Изделие, в котором есть конструктивный переход от толстостенной области в тонкостенную, создает проблемы при заполнении полости и обеспечении требований качества (не рекомендуется)



Возможность расположения впуска в толстостенной области приводит к улучшению течения потока и позволяет добиваться уплотненного заполнения этих областей



Внутренние литники («ускорители») улучшают возможность уплотнения толстостенной области (когда это необходимо), если приходится располагать впуск в тонкостенной области

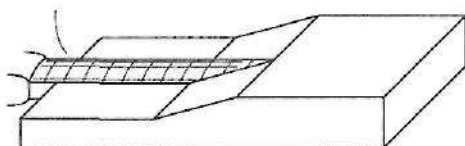


Рис. 2.33. Изделия с различной толщиной стенок надо отливать под давлением, располагая места впуска, по-возможности, в зонах формирования толстых элементов изделия, чтобы уменьшать риски образования усадочных утяжин или пустот. При необходимости располагать впуск в тонкостенной зоне могут быть добавлены внутренние литники («ускорители») потока расплава, для чего можно использовать технологические или специальные конструктивные ребра, обеспечивающие уплотнение расплава

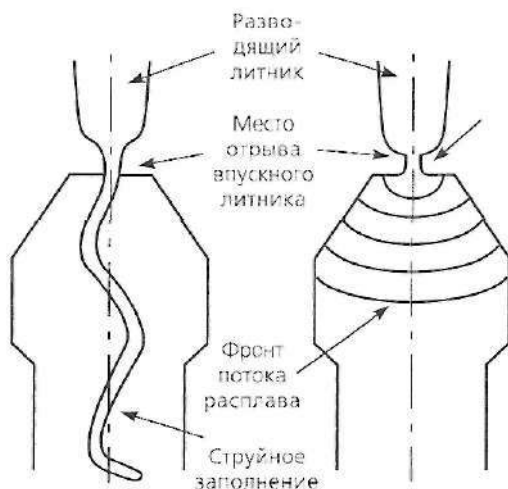


Рис. 2.34. Струйное заполнение может возникать при впрыске расплава в глубокую открытую полость. Вероятность образования струйного заполнения может быть уменьшена за счет правильной конструкции впускного литника или благодаря применению какого-либо конструктивного препятствия: происходит изменение профиля скоростей потока расплава и улучшение условий формирования фронта расплава при его поступлении в полость



Рис. 2.35. Когда наблюдается эффект струйного заполнения, изделие, как правило, имеет дефекты поверхности, отличается плохим внешним видом. Струйное заполнение может также приводить к ухудшению механических свойств изделия

Эффекты струйного заполнения могут быть минимизированы при конструировании литейной формы. Например, короткая длина впускного литника дает возможность потоку расплава расширяться при поступлении в полость благодаря упругим свойствам расплава и «эффекту памяти» материала. Конструктор экструзионной головки должен поступать наоборот, то есть использовать длинные формующие щели, что даст возможность минимизировать эффект «расширения» расплава, который наблюдается, когда экструдат выдавливается, выходит из головки экструдера. Для минимизации возможных дефектов изделий при струйном заполнении могут быть использованы сопла большого диаметра и особенно сопла в форме обратного конуса. При осуществлении впрыска в глубокую полость специально создают препятствия течению, распространению потока (например, с помощью вставок-шпилек в форме и т. п.), уменьшающие вероятность возникновения эффекта струйного заполнения.

В заключение рассмотрим отливку в виде диска (рис. 2.36, *a-e*). Отливка имеет тонкий центральный диск, по краю которого расположен относительно толстый обод. Существуют определенные схемы расположения впусков, которые могут быть использованы для получения подобных изделий из термопластов. Каждая из этих схем имеет некоторые преимущества и недостатки.

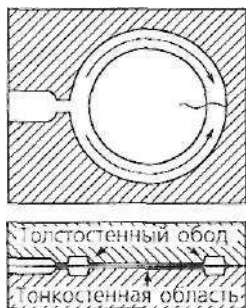
Расположение места впуска в центре в верхней части изделия

Центральное расположение впуска имеет следующие преимущества: сбалансированный поток расплава, равномерная вентиляция вдоль линии разреза формы и отсутствие /п ний спая. Однако за) олнение формующей і юлости происходит из тонкостенной зоны в толстостенную, что способствует образованию усадочных утяжин или пустот.

Расположение места впуска в торце изделия

Расположение впуска в торце изделия будет улучшать уплотнение толстостенной зоны, однако расплав будет создавать кольцевые завихрения вдоль обода, при этом из-за перетекания потока расплава могут образовываться линии спая и возрастать вероятность образования воздушных пузырей или неполного впрыска. В изделии из-за этого может возникнуть дефект, заключающийся в искажении его правильной геометрической формы.

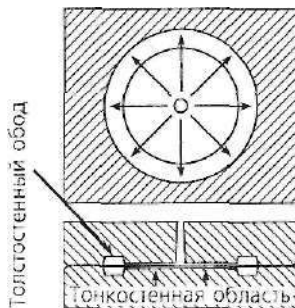
а) Один впуск в торце изделия



Дает возможность осуществить уплотнение толстого обода
Поступление расплава происходит через толстостенные зоны в тонкостенные

Возможное возникновение кольцевых завихрений расплава **вдоль** обода и образование линии спая
Возможны проблемы с обеспечением точности размеров изделия

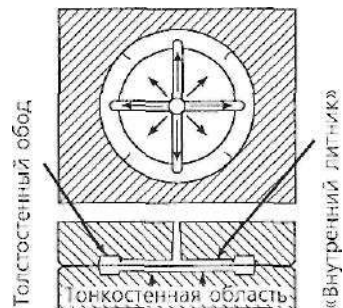
б) Впуск в центре изделия



Трудности при заполнении толстостенного обода
Поступление расплава происходит через тонкостенные зоны в толстостенные

Отсутствие линии спая
Равномерная вентиляция вдоль линии разреза формы

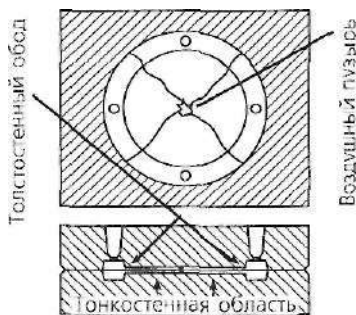
с) Впуск с добавлением «внутренних литников»



Дает возможность добиваться уплотнения толстого обода

Возможное возникновение кольцевых завихрений расплава вдоль обода и образование линии спая
Требуется изменения конфигурации изделия из-за включения в конструкцию «внутренних литников»

d) Многоточечная система впусков расположенных сверху

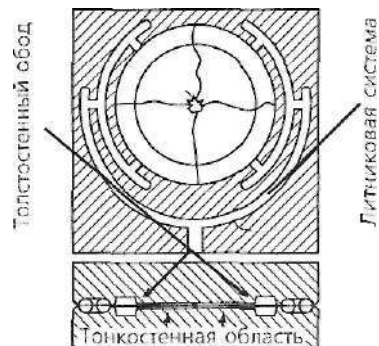


Горячеканальная литниковая система или трехплитная форма с двумя плоскостями разреза

Поступление расплава происходит через толстостенные зоны в тонкостенные
Образования линий спая

Воздушный пузырь (требуется использование знаков для создания вентиляционных отверстий)

Многоточечная система с расположением впусков в торце (по краю) изделия



Двухплитная холодноканальная литниковая система (приводит к образованию скрапа)

Поступление расплава происходит через толстостенные зоны в тонкостенные
Образования линий спая

Воздушная ловушка (требуется использование знаков для создания вентиляционных отверстий)

Рис. 236. Изделие в виде диска с относительно толстым ободом по краю и тонкой центральной областью. Выбор литниковой системы затруднен из-за разнотолщинности отливки. Каждый из пяти предложенных вариантов имеет как преимущества, так и недостатки

Многоточечная система с расположением мест впуска по торцу изделия

При использовании такой схемы расположения впусков эффект появления кольцевых завихрений будет минимизирован. Этот эффект проявляется, когда при течи расплава происходит его перетекание из толстостенных зон в тонкостенные, расплав более равномерно уплотняется (по сравнению со схемой с одним впуском), но образуется несколько линий спая. Одним из наиболее важных следствий такой схемы является то, что центральная зона изделия будет заполнена последней. Вентиляционные отверстия вдоль линии разъема формы оказываются неэффективными, и необходимо предпринимать специальные меры для обеспечения вентиляции, например, предусматривать использование вентиляционных шпилек. При этом будет образовываться большое количество литникового скрапа.

Многоточечная система с расположением впуска в верхней части обода изделия

Такой вариант имеет определенные преимущества, но и ограничения, присущие рассмотренным выше многоточечным вариантам. Расположение впусков в верхней части обода дает дополнительные преимущества: заполнение прекращается автоматически, при использовании формы с двумя плоскостями разъема (трехплитной) • горячеканальной литниковой системы не образуется литниковый скрап.

Система с расположением впуска вверх в центре изделия и добавлением «внутренних литников»

Такая система применима только тогда, когда функциональные требования и требования к внешнему виду изделия не противостоят ее выбору. В этом случае «внутренние литники» как ускорители потока улучшают уплотнение толстостенной зоны. Использование внутренних литников может привести к кольцевым завихрениям и проблемам, связанным с перетеканием потока. Несмотря на понятные преимущества, требуются обязательные расчетные оценки с помощью компьютерного анализа процесса заполнения формы, поскольку «внутренние литники» всегда оказывают активное воздействие на переполнение формирующей полости.

2.3. Линии спая

2.3.1. Общие положения

Линии спая (или плоскости спая, в общем — область) образуются при слиянии нескольких потоков расплава в процессе заполнения формирующей полости, когда общий поток расплава разделяется на два или несколько, а затем снова встречается и сливается в каком-либо удаленном от места впуска участке. Разделения фронта потока расплава могут быть связаны с конструктивными особенностями изделия, требующими размещения в формирующей полости пуансонов, знаков, любых препятствий течению, в том числе и с разнотолщиной изделия в литевой форме с многоточечной литниковой системы. Струйное заполнение также может приводить к формированию линий спая в отлитом изделии. Линии спая заметны на поверхности изделия, а область спая в объеме изделия, как правило, менее прочная, чем все другие.



Рис. 2.37. Типичная схема последовательности формирования линии спая. Линии спая возникают, когда фронт расплава разделяется и затем снова соединяется в более удаленном от места впуска участке. Линия спая возникает также, когда используется система с многоточечными впусками или при обходе расплавом пуансонов, знаков и при возникновении эффекта струйного заполнения формирующей полости

Линии спая на поверхности отлитого изделия часто выглядят как неглубокие трещины, они видны невооруженным взглядом и считаются неприемлемыми с точки зрения качества поверхности, внешнего вида многих изделий.

Механические напряжения локального характера в области спая должны быть существенно ниже, чем в других областях изделия. Это главное условие для изделий, которые будут использоваться под воздействием динамических нагрузок [20,21]. Необходимо считаться с возможностью преимущественного разрушения изделия (из-за разницы в структурных свойствах термопласта в области спая и в монообластях). Наличие линий спая создает одну из очень важных проблем для конструктора изделия.

Большое количество работ было посвящено исследованию прочности и внешнего вида изделий в области линий спая [20-42], и существует несколько простых и четких правил, которые могут быть использованы конструкторами. Конструктор должен учитывать, что прочность, химическая стойкость и внешний вид изделия в области спая, соответственно и линии спая, зависят от следующих общих факторов:

- выбора материала;
- конструкции изделия;
- конструкции литевой формы;
- условий переработки.

В распоряжении конструктора недостаточно данных для предварительной оценки прочности изделий в области спая, тем более что от условий переработки существенно зависит и качество изделия, включая его внешний вид. К сожалению, эксплуатационные характеристики изделия в области линии спая предсказать и рассчитать достаточно сложно. Линии спая должны прогнозироваться, «размещаться» конструктором таким образом, чтобы они не были заметны на лицевой стороне изделия и не сказывались бы на его эксплуатационных характеристиках. Конструктор изделия может варьировать элементы конфигурации изделия, его толщину и расположение впускных литников, чтобы расположить линии спая необходимым образом.

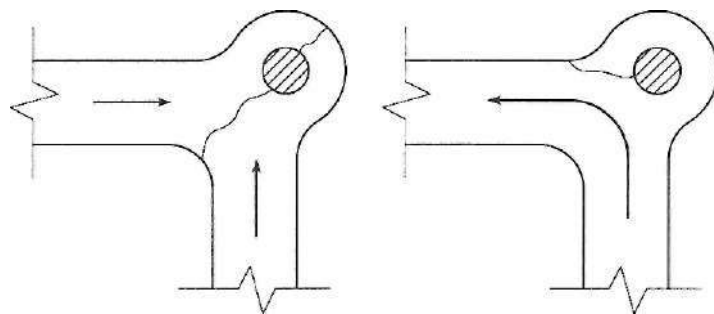


Рис. 2.38. В области спая, соответственно по линии спая, нарушается механическая целостность изделия; обычно это создаст особо сложную проблему, если линии спая располагаются вблизи отверстий, используемых для сборки. Чтобы избежать этого, нужно стрелками показать направления потоков расплава при заполнении формирующей полости. Линии спая всегда должны быть объектом особого внимания, когда необходимо предусматривать в изделии отверстия для последующей сборки

Когда отверстия предназначены для присоединения, например, механических фиксаторов, то вокруг них (отверстий) возникают значительные локальные напряжения. Выбирая расположение мест впуска, конструктор должен гарантировать наиболее рациональное решение проблемы, связанной с линиями спая. Например, возможно оказывать воздействие на прочность области спая, меняя длину потоков расплава перед их слиянием (рис. 2.39).

В конкретных случаях может оказаться целесообразным конструировать литниковую систему с большим количеством линий спая, чем в альтернативном варианте литья под давлением того же изделия, допускающем заполнение формирующей полости с образованием меньшего числа таких линий (рис. 2.48).

Практически невозможно заранее точно определить, какова будет прочность в области линии спая. «Предсказание» внешнего вида поверхности представляет собой еще более сложную задачу. Большинство текстурированных поверхностей в сочетании с использованием слабоокрашенных пластмасс позволяет скрывать недостатки поверхности, связанные с видимыми линиями спая, что дает возможность отказаться от дополнительного окрашивания изделия в большинстве (но не во всех) случаях.

Компьютерный анализ с использованием С./Ш-систем оказывает неоценимую помощь конструктору при расчете заполнения формирующей полости и при рассмотрении проблем, связанных с образованием линий спая; он используется для предсказания места расположения линий спая даже для изделий с очень сложной геометрической формой. После проведения предварительного анализа, до изготовления литейной формы, конструктор может изменить предлагаемую конфигурацию изделия или расположение литниковой системы, чтобы линии спая образовались в наименее критичных зонах. Некоторые компьютерные программы, используемые для моделирования поведения потока, автоматически определяют расположение линий спая [22,23]. Однако никакая из них не позволяет однозначно определять прочность изделия в области спая и внешний вид поверхности изделия в соответствующем месте. Но если

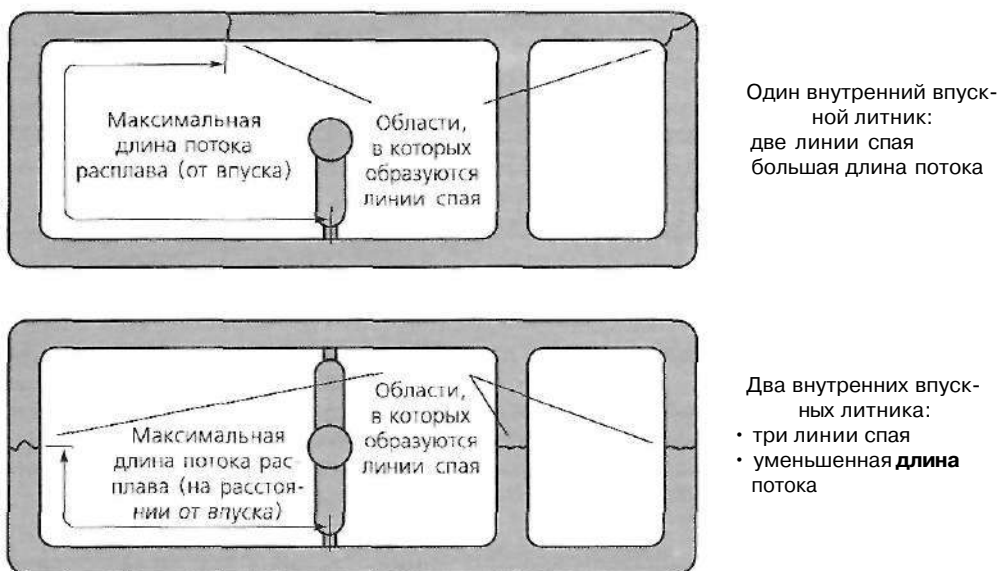


Рис. 2.39. Варианты литниковых систем, которые могут быть использованы для представленного изделия: с различным числом и области образования линий спая. Компьютерный анализ процесса заполнения формующей полости позволяет определять подходящие варианты области образования линий спая, но не позволяет при этом давать оценку уровня механических (прочностных) свойств или качества поверхности изделия

конструктор определит такие параметры моделируемого процесса, как температура расплава или распределение температуры по толщине изделия в зоне линии спая, и учтет, что «горячие» расплавы создают более прочный спай, возможно сделать точные предположения о прочности и внешнем виде изделия. Это с большей вероятностью приводит к успеху, чем если конструктор производит необходимые сравнения, основываясь только на предыдущем опыте.

Пониженная (по сравнению со всем объемом изделия) или невысокая прочность в зоне линии спая может быть вызвана целым рядом факторов, каждый из которых играет решающую роль. «Вклад» каждого фактора определяется типом материала, конструкцией изделия, конструкцией литейной формы и параметрами технологического процесса литья под давлением.

К этим факторам относятся [22, 24]:

- незавершенность структуры слившихся потоков в области спая и недостаточная диффузия макромолекул;
- неблагоприятная ориентация макромолекул и/или армирующих волокон при затвердевании;
- образование V-образных канавок на поверхности изделия в зоне линий спая;
- появление частиц посторонних включений типа геликов и/или микропор на поверхности изделия в зоне линий спая.

На рис. 2.40 показано, что для достижения более однородной прочности изделия в зоне спая («сварки») необходимы полная диффузия макромолекул и соответствующее их «переплетение». Любые параметры процесса, увеличивающие температуру расплава в области спая, будут увеличивать его прочность. Соответственно, и температура расплава в формующей полости на участках, близких к поверхности, аналогично влияет на прочность изделия в зоне линии спая. Подобные рассуждения справедливы и для давления расплава. Температуру формы, давление выдержки и длительность выдержки под давлением тоже следует учитывать, но эти параметры в большой мере зависят от конкретной марки термопласта. Температура расплава в области спая является наиболее важным параметром процесса, влияющим на подвижность макромолекул. «Подогретые» (в допустимых пределах) расплавы интенсивнее заполняют формующую полость, что способствует быстрому и интенсивному «переплетению», смешению потоков расплава, следовательно, и большей прочности материала. Но при этом появляется опасность деструкции материала и трудности, связанные с удалением летучих газов. Прочность линии спая можно улучшить за счет уменьшения длины течения потока расплава, поскольку это приводит к обеспечению более благоприятной температуры и давления в области спая.

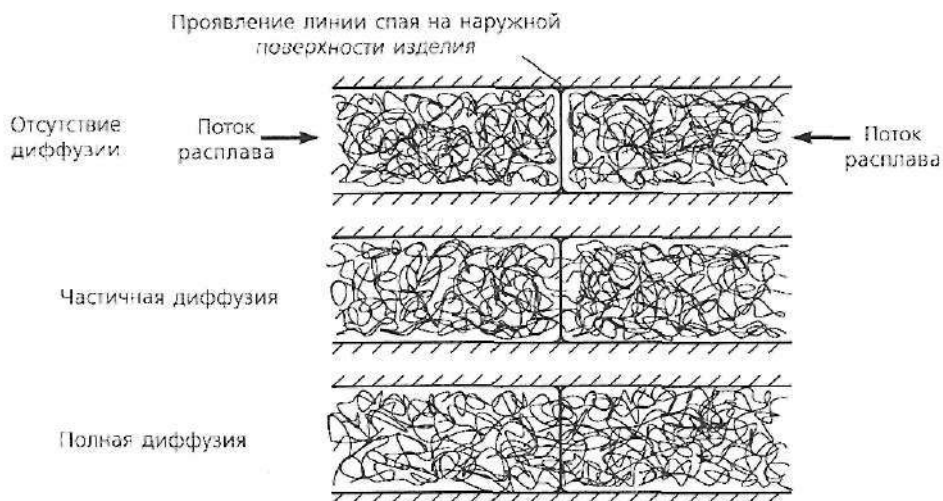


Рис. 2.40. Чтобы добиться достаточно однородной прочности термопласта в области линии спая (в том числе и на поверхности), в процессе течения расплава должна произойти диффузия и «переплетение» макромолекул термопласта из разных потоков

На рис. 2.41 видно, что зона с «хорошим» спаем потоком расположена между зонами с «плохим» спаем. Такую ситуацию называют «состоянием, ведущим к образованию трещины». В крайних (вверху и внизу) зонах диффузия не достигает значительной интенсивности, а макромолекулы, имеющие неблагоприятную ориентацию, оказываются в «замороженном» состоянии, которое может возникать из-за фонтанного движения фронтов потоков расплава перед их слиянием. В одной из работ,

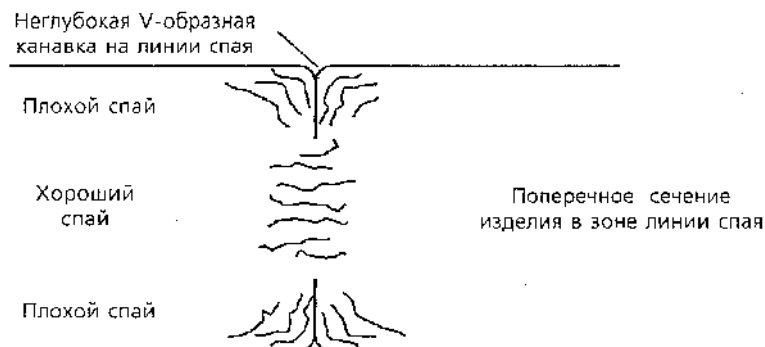


Рис. 2.41. Линия спая представляет собой V-образную канавку, которая видна на поверхности изделия. В области линии спая (по сечению изделия) имеются зоны как с хорошим, так и с плохим спаем (соединением). Зоны «плохого» спая образуются из-за недостаточной диффузии макромолекул, а также их неблагоприятной ориентации, которая возникает в результате фонтанирующего течения соединяющихся фронтов расплава

посвященной этой теме [21], было указано, что глубина зоны «плохого» спая для ПС может достигать значения от 0,2 до 0,3 мм. Дефект в форме канавки обычно наблюдается визуально. Канавка не только портит внешний вид изделия, но и является концентратором напряжений, что опасно для изделия, работающего на растяжение или изгиб. Образование канавки связано с влиянием большого количества факторов, включая и трудности при удалении воздуха/газа, образующихся при соприкосновении фронтов потоков расплава. Использование специальных знаков в форме для удаления газов и предотвращения образования воздушных ловушек в области спая улучшает внешний вид. Однако знаки оставляют следы на поверхности, которые требуется удалять (дополнительная операция). Удаление воздуха и газов из формирующей полости с помощью вакуумной вентиляции перед впрыском расплава используется, когда к внешнему виду изделия и его эксплуатационным характеристикам предъявляются высокие требования. Кроме основного назначения, вакуумная вентиляция способствует уменьшению времени заполнения формирующей полости, а это дополнительно влияет на размер средней зоны с хорошим соединением.

2.3.2. Типы линий спая

При описании типов линий спая используются различные термины. Мы уже отмечали, что линии спая возникают как следствие разделения и последующего соединения фронтов потоков расплава. Разделение потока расплава происходит из-за необходимости обойти пуансон, знак или при наличии нескольких мест впуска (рис. 2.42). Условно стенки литевой формы, окружающие литниковую систему, можно считать как бы пуансоном, который обходит на своем пути поток расплава; после выхода расплава из разных впускных литников потоки сливаются уже в формирующей полости.

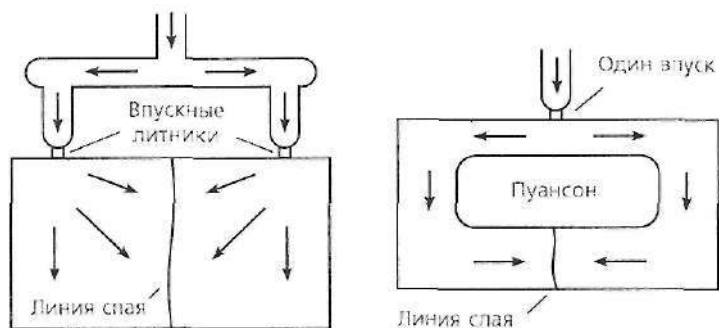


Рис. 2.42. Линии спая в формующей полости могут возникать при нескольких впусках или при огибании потоком расплава пуансонов, знаков

Линии спая можно более точно классифицировать по объему расплава, который будет участвовать в объединении потоков. Линия спая может возникнуть, когда фронты расплава, которые перемещаются в разных направлениях, встречаются и практически немедленно затвердевают. Этот тип линии спая называется стыковым, или холодным. В других случаях после соединения фронтов расплава происходит дополнительная подача расплава в формующую полость. Этот тип линий спая обычно называется спавленным, потоковым, или горячим. Считается, что стыковые линии обычно обладают самым низким качеством. Примеры разных типов линий спая изображены на рис. 2.43.

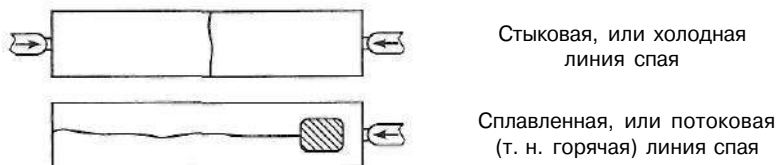


Рис. 2.43. Линии спая можно классифицировать по степени перемещения потока после контакта фронтов встречных потоков расплава. В случае стыковых, или холодных, линий спая фронты потоков расплава останавливаются сразу после соединения. Термины «спавленная» или «потоковая» линии используются для характеристики линий спая, после образования которых поток продолжает поступать в формующую полость

Характер расположения линий спая обусловлен углом, под которым встречаются два фронта потоков (рис. 2.44). Исследования показывают, что линии спая практически исчезают, когда потоки встречаются под так называемым «нулевым углом». Установлено, что этот угол находится в пределах от 120° до 150° — в зависимости от марки материала. Величина угла спая может быть использована при компьютерном моделировании для более уверенного прогнозирования прочности спая [29]. Конструктор должен уделять внимание и такому фактору, как расположение и число пуансонов — соответственно, линий спаев после обтекания пуансонов потоками расплава. Конструкция в виде решетки, состоящая из набора пуансонов или знаков небольшого размера, создает много

линий спая. Увеличение расстояния между пуансоном, то есть препятствием на пути потока, и местом впуска приводит к уменьшению прочности линии спая, поскольку уменьшается средняя температура переднего фронта расплава. Это справедливо в некоторых случаях, хотя есть исследования, в которых утверждается, что характер расположения линии спая (для разумных, в принципе, вариантов) оказывает минимальное воздействие на прочность спаев.

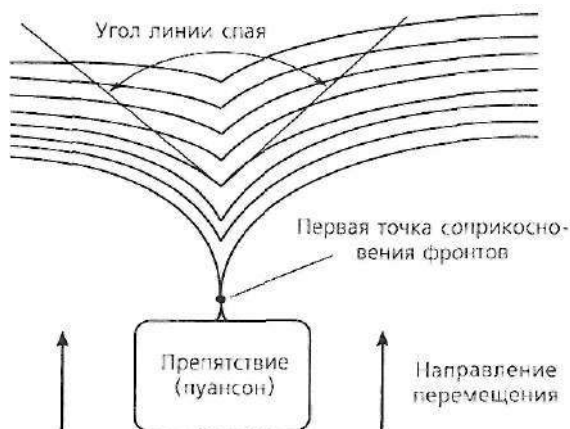


Рис. 2.44. Угол линии спая используется в качестве единицы измерения качества спая (шва)

Рассмотрим два изделия, которые показаны на рис. 2.45. Прочность спая в перпендикулярном направлении относительно перемещения потока (см. рис. 2.45, вверху), практически не будут зависеть от расстояния до места впуска. Однако прочность области спаев для изделий, которые изготовлены в форме с большим количеством пуансонов и знаков (рис. 2.45, внизу), уменьшается с увеличением расстояния от места впуска.

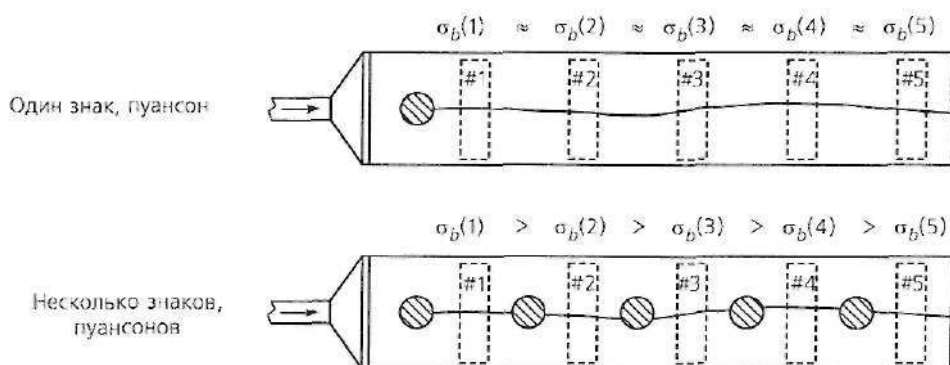


Рис. 2.45. Линии спая создают проблемы при литье под давлением решетчатых изделий, когда поток должен многократно соединяться. С увеличением числа разделенных и соединенных потоков заметна тенденция к уменьшению прочности материала в зонах спаев

2.3.3. Учет особенностей термопластов при конструировании изделий со спаями

Наличие в изделии областей (линий) спая создает конструктору проблемы в большей или меньшей степени. Уровень этих проблем зависит от особенностей морфологии, величины средней молекулярной массы и набора добавок в термопластах. В табл. 2.4 для различных термопластов приведен набор таких коэффициентов, как отношение (в %) показателя прочности на растяжение образца, отлитого с образованием стыковой линии спая, к такому же показателю для образца отлитого без спая. Для оценки используется коэффициент сохранения прочности материала (в области спая). Коэффициенты сохранения прочности получены на образцах для испытаний на растяжение, которые были отлиты через впускные литники, расположенные в обоих торцах изделия, так что при сравнительно короткой длине пути расплава получается стыковая линия спая. Следует ожидать, что значения коэффициентов сохранения прочности будут отличаться от приведенных, если образцы для испытаний будут отличаться от использованных для получения данных таблицы (то есть другой конфигурации, толщины, при других длинах течения потока расплава и углах линий спая). Они могут также сильно изменяться от одной марки материала к другой, поскольку как средняя молекулярная масса, так и набор добавок оказывают сильное влияние на свойства спая. Однако данные табл. 2.4 оказываются полезными для пояснения некоторых фактов.

Таблица 2.4. Коэффициенты сохранения прочности термопластов в области спая (при испытании на растяжение с образованием стыковых линий спая) [35]

Термопласт	Армирующий наполнитель термопласта	Коэффициент сохранения прочности материала в области спая, %*
ПП	Неармированный	86
ПП	Стекловолокно — 20 %	47
ПП	Стекловолокно — 30 %	34
САН (сополимер стирола и акрилонитрила)	Неармированный	80
САН	Стекловолокно — 30 %	40
ПК	Неармированный	99
ПК	Стекловолокно — 10 %	86
ПК	Стекловолокно — 30 %	64
Полисульфон	Неармированный	100
Полисульфон	Стекловолокно — 30 %	62
Полифениленсульфид	Неармированный	83
Полифениленсульфид	Стекловолокно — 10 %	38
Полифениленсульфид	Стекловолокно — 40 %	20
ПА 66	Неармированный	83–100
ПА 66	Стекловолокно — 10 %	87–93
ПА 66	Стекловолокно — 30 %	56–64

Данные получены при испытании на растяжение образцов, отлитых через впуски, расположенные с обоих торцов отливки.

Коэффициенты прочности для неармированных пластмасс (как для аморфных, так и частично кристаллических) обычно находятся в пределах 80-100 %. Исследования показывают, что для неармированных стекловолокном аморфных пластмасс температура расплава и, в меньшей степени, скорость впрыска значительно влияют на прочность спая. Температура стенок формы не оказывает такого влияния, так как даже относительно высокие температуры стенок формы все же ниже температуры стеклования термопласта. Однако для частично кристаллических термопластов такие параметры, как температура расплава, температура стенок формы, скорость впрыска и операция нормализации отливки после изготовления, существенно влияют на прочность спая [31]. Следует указать, что «приемлемое» значение коэффициента сохранения прочности материала в области спая само по себе недостаточно для полной эксплуатационной характеристики качества изделия в данной области. Даже при хорошем сохранении прочности спаи могут не обладать необходимой прочностью при ударных или усталостных нагрузках, при воздействии химических веществ.

Если коэффициенты сохранения прочности спая для ненаполненных термопластов могут быть относительно высокими (при правильном выборе расположения впусков и условий переработки), то для наполненных термопластов с добавками они принимают самые разные значения. Такие добавки, например, как (антипирены огнезащитные составы) или применяемые смазки, облегчающие извлечение отливок из формы, могут оказывать негативное влияние на эксплуатационные характеристики спаев: в зоне спая будут накапливаться примеси. В табл. 2.4 даны относительные значения коэффициентов сохранения прочности спаев, а не абсолютные значения прочности материала в данной области. Уменьшение прочности спая зависит от типа наполнителя/армирующего компонента, уровня нагрузки и марки термопласта. В общем случае процент потери прочности в области спая увеличивается с повышением процента армирующего компонента в термопласте и отношения диаметра волокна к его длине. Процент потерь для высокого отношения диаметра волокна к длине, как в случае длинных волокон, наибольший, затем следуют обычные короткие волокна, и, наконец, размолотые волокна и шарики. Уменьшение прочности спая для армированных волокнами термопластов происходит из-за локальной анизотропии в зоне спая, которая может создаваться из-за ориентации волокон как следствие эффекта фонтанирования встречных потоков расплава.

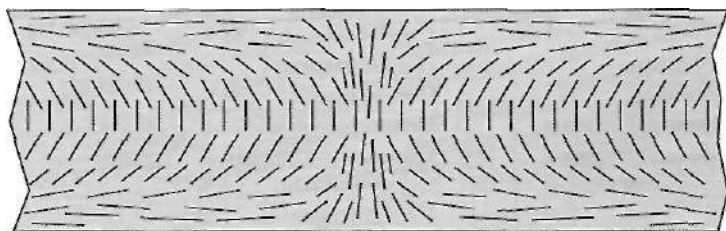


Рис. 2.46. Прочность линий спая для армированных волокнами термопластов может уменьшаться из-за нежелательной ориентации волокон в области спая, — как следствие эффекта фонтанирования встречных фронтов потоков расплава

У термопластов, армированных длинными волокнами, спай будет менее прочный, чем у термопластов, армированных более короткими волокнами. Исследования показали, что коэффициенты сохранения прочности спая для таких материалов относительно малы, когда концентрация волокон слишком высока [30, 34]. Эти армированные термопласты отличаются в общем высокой прочностью и жесткостью, хорошим сопротивлением ползучести и стабильностью размеров изделия. Однако конструктор должен обращать внимание на потенциальную возможность возникновения анизотропной ориентации макромолекул и тщательно выбирать вариант литниковой системы.

Результаты, приведенные на рис. 2.47 для сополимера стирола с малеиновым ангидридом, армированного длинными стекловолокнами (42 %), показывают, что этот материал имеет прочность на изгиб 200 МПа в продольном направлении и 125 МПа в поперечном направлении (в образце без линий спая). Прочность образцов со сплавленной линией спая составляет приблизительно 75 МПа. Скорость впрыска также оказывает некоторое влияние на прочность спая, но самым существенным является сам факт образования спая. При работе с термопластами, имеющими высокий процент наполнителей или армирующих добавок, а также при работе с изделиями сложной геометрической формы, конструктор должен проявлять максималь-

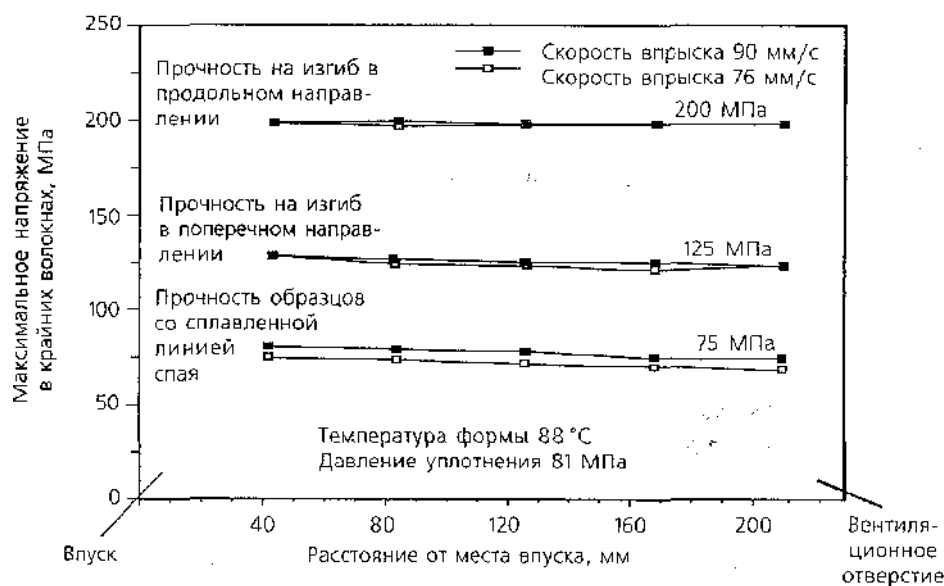


Рис. 2.47. Анизотропное поведение расплава и прочность спая должны учитываться при использовании термопластов, армированных волокнами. Результаты экспериментального исследования, выполненного на образцах из сополимера стирола с малеиновым ангидридом, армированного длинными волокнами, показывают, что показатели прочности материала на изгиб в направлении течения потока существенно больше, чем показатели прочности в направлении, перпендикулярном течению потока

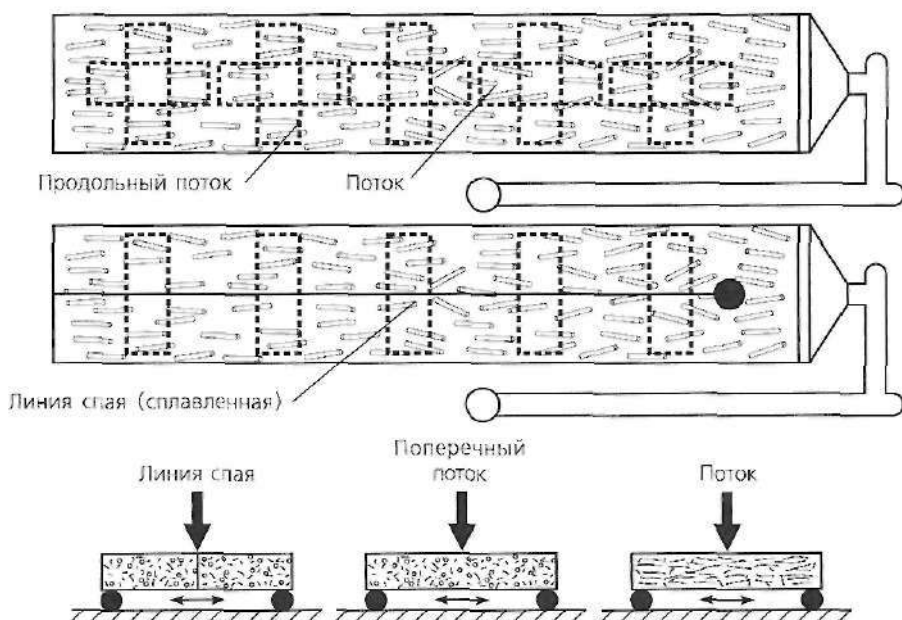


Рис. 2.47. Окончание

нос внимание. Необходимо избегать использования термопластов с высоким содержанием армирующих наполнителей, когда геометрическая форма изделия не позволяет избежать образования большого количества спаев. Предпочтительнее применять термопласты с небольшим наполнением (примерно 10-25 %). Эти материалы, даже если значения их модулей упругости не слишком велики, не создают значительных проблем, связанных с ориентацией, а коэффициенты сохранения прочности спая у них выше.

2.3.4. Возможности улучшения эксплуатационных характеристик спая и внешнего вида поверхности изделия в области линий спая

На прочность и внешний вид поверхности изделия в зоне спая можно в какой-то степени повлиять за счет изменения температуры расплава. Любой параметр, как отмечалось выше, изменение которого приводит к увеличению температуры расплава и давления в зоне соприкосновения фронтов потоков, будет оказывать положительное воздействие на качество спая, поскольку будет способствовать лучшему «переплетению», смещению макромолекул и армирующих волокон разных отоков в этой области. Конструкция литевой формы, особенно ее литниковой системы, также влияет на качество спая. Удлиненные сопла термопластавтомата или горячечанальные литниковые системы будут способствовать повышению качества спая, поскольку они позволяют лучше управлять температурой расплава. Компьютерный анализ вариантов

течения расплава в формующей полости при литье под давлением изделия, имеющего спаи, позволяет определить величину относительного влияния на температуру расплава таких параллельно происходящих процессов, как вязкостное нагревание и контактное охлаждение.

Рассмотрим изделие на рис. 2.48. Изделие типа обода (колеса) может быть отлито под давлением через один впуск по краю изделия в литевой форме с одной плоскостью разъема (двухлитной). Эта литниковая система ухудшает качество стыковой линии спая, расположенной напротив впуска, особенно для изделий с большим диаметром (то есть при большой длине пути расплава до линии спая).

Возможные варианты литниковых систем с одним и четырьмя впусками

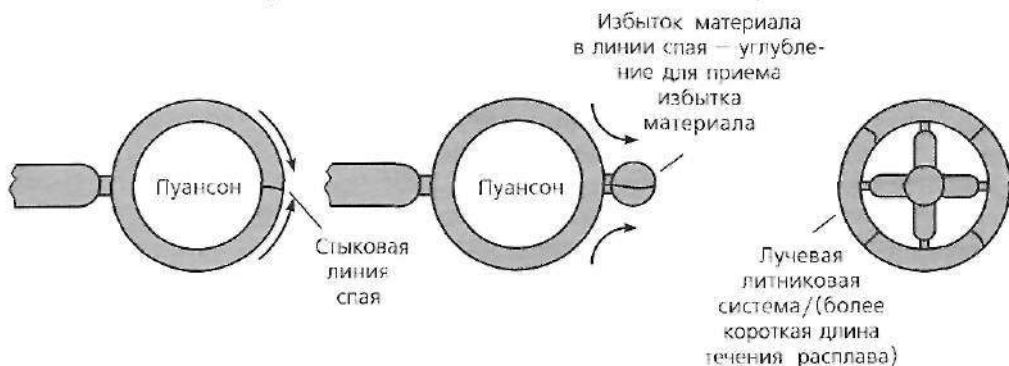


Рис. 2.48. Образование стыковых линий спая создает области с пониженной прочностью, особенно при значительной длине течения потока расплава. Изделие типа обода (колеса), изготовленное с помощью лучевой литниковой системы, имеет большее число линий спая, однако эти линии спая создаются потоками расплава с меньшими длинами течения. Можно также предусмотреть углубление для приема избытка материала, которое эффективно располагает линию спая в плоскости разъема литейной формы

Одним из способов, который позволяет улучшить прочность спая, является специально предусмотренные в конструкции формующей полости углубления для приема избытка материала. Это приводит к эффективному изменению линий спая плоскости вместо стыковых — в прочные сплавленные линии. Добавление углубления для приема материала «со спаем» уменьшит проблемы с изделием, которое в процессе эксплуатации может разрушиться именно в области спая; для этого можно достаточно просто модернизировать существующую форму. К сожалению, это приведет к избыточным затратам термопласта и к необходимости удаления избытка — бобышки. Другим вариантом литниковой системы для такого типа изделия может быть внутренняя лучевая литниковая система. Эта многоточечная система впусков (обычно в ней используются 2,3 или 4 впускных литника) приводит к образованию большого количества стыковых линий спая. Однако благодаря уменьшенной длине пути течения разветвленного потока расплава и поэтому лучше «сохраненной» его температуре каждый спай будет прочнее по сравнению со спаем в изделии, изготовленном

с использованием одного впуска. Расположение впусков по касательной, как показано на рис. 2.49, относится к альтернативному варианту — по отношению к обычной системе расположения впуска по краю изделия.



Рис. 2.49. Литниковые системы с расположением впуска по касательной могут быть использованы вместо обычной системы с расположением впускного литника по краю изделия в целях изменения характера заполнения формующей полости и улучшения прочностных характеристик области спая

Вакуумное вентилирование

Формующая полость должна вентилироваться вдоль линии разреза формы и в глубоких канавках (например, в области расположения ребер или бобышек), чтобы полностью удалить воздух, а также образующиеся летучие компоненты расплава из формы во время ее заполнения. Вентиляционные отверстия в плоскости разреза формы можно использовать для удаления газов из области спая при образовании стыковых линий спая, как правило, расположенных вблизи разреза формы.

Вентиляционные знаки применяются, когда спай изолирован от плоскости разреза. К сожалению, вентиляционные знаки (или толкатели с вентиляционными каналами) имеют определенные недостатки: они могут оставлять следы на отливке, могут закупориваться, например, смазкой для литевых форм, их труднее чистить/обслуживать, чем вентиляционные отверстия, расположенные вдоль линии разреза формы, их расположение может влиять на схему охлаждения формы. Их зачастую трудно разместить так, чтобы попасть в область спая, учитывая ее определенную «подвижность» из-за влияния многих технологических параметров на реальный ход процесса заполнения формующей полости. Вакуумным называется вентилирование, при котором из формующей полости принудительно удаляется воздух и летучие газы в процессе заполнения формы расплавом. Этот способ вентилирования формы позволяет избежать недостатков, связанных с использованием вентиляционных знаков и т. п. [43,44]. Стандартная система вакуумной вентиляции состоит из вакуумного насоса, вакуумного резервуара (баллона) и клапана с электромагнитным управлением, она соединяет форму и вакуумный резервуар, а элементы ее управления вынесены на пульт управления термопластавтомата. Очень важно, чтобы препятствия на пути воздушного потока между формующей полостью и вакуумной системой были минимальными, чтобы не препятствовать свободному перемещению воздуха. Вакуум в полости формы должен создаваться до поступления расплава, и его следует сохранять в течение всего времени, пока вентиляционные отверстия закрыты. Электромагнитный клапан открывается в момент впрыска (или несколько ранее) и закрывается,

когда заполнение формующей полости завершается. В течение оставшейся части цикла литья происходит восстановление вакуума в вакуумном резервуаре таким образом, чтобы подготовиться к следующему циклу литья под давлением. Величина вакуума в вакуумном резервуаре должна поддерживаться на определенном уровне в течение всей стадии заполнения, даже при быстром поступлении воздуха при открывании электромагнитного клапана. Для этого требуется применять вакуумный резервуар относительно большого размера. Системы вакуумной вентиляции могут быть подсоединены к форме через вентиляционные отверстия, расположенные в линии разреза формы. Проникновение воздуха через другие места (например, через плоскость разреза, отверстия для толкателей и т. п.) должно быть сведено к минимуму. Этого можно добиться за счет использования уплотнительных колец и прокладок различного типа.

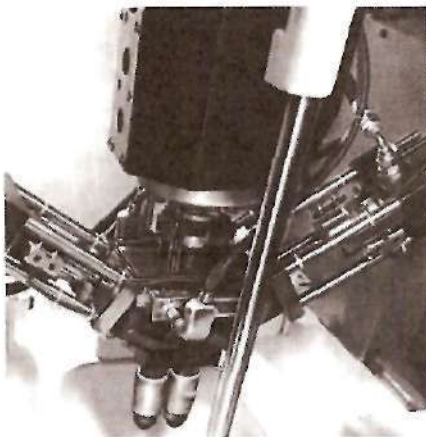
Растворители

В работе [33] было показано, что контролируемое воздействие паров растворителя после завершения цикла литья под давлением повышает прочность линий спая у отливок из аморфных пластмасс, например, у АБС-пластика (сополимера акрилонитрила, бутадиена и стирола). Процесс по своей сути аналогичен процессу полирования паром, который также используется для восстановления хорошего блеска поверхности у покрытого трещинами изделия из АБС-пластика. Воздействие паров растворителя в течение нескольких секунд (если будет достигнута достаточно большая глубина его проникновения) может повлиять в определенной степени на «замороженную» ориентацию макромолекул и способствовать их лучшему «переплетению». Растворитель также способствует уменьшению размеров V-образной канавки [линии спая. Показано, что комбинация факторов, способствующих «залечиванию» линий спая, будет улучшать у изделий из АБС-пластика противоударные характеристики, но это достаточно сложно применять на практике.

Литье под давлением термопластов с применением циклического воздействия на расплав (*Multi-Live Feed Injection Molding, LFIM*)

Относительно новая специальная технология процесса литья под давлением получила название литье под давлением с управляемой ориентацией за счет сдвига (*Shear Controlled Orientation Injection Molding, SCORIM®*) [45–48]. Это модифицированный процесс, который может быть реализован несколькими способами, но с обязательно несложной доработкой термопластавтоматов. Он может быть использован для значительного уменьшения количества областей (соответственно, линий) спая, минимизации риска образования утяжин и микропор, а также для контроля или управления ориентацией как макромолекул, так и армирующих волокон.

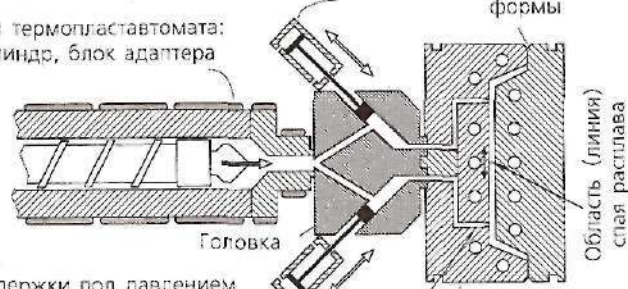
Способ, который показан на рис. 2.50, реализуется с помощью литьевой установки, состоящей из трех основных компонентов. Головка или адаптер, присоединенный к торцу материального цилиндра стандартного термопластавтомата, заменяет стандартное сопло. Привод устройства осуществляется от встроенного гидравлического силового блока, а управление выполняется электроникой. Литьевые формы, которые используются в этой технологии, должны иметь, по крайней мере, два впуска. Литьевая форма (рис. 2.50) имеет два впускных литника, расположенных в подвижной ее части. Начальная фаза процесса литья под давлением по сути проходит без изменений:



Гидравлические цилиндры и поршни для создания возвратно-поступательного движения

Стандартные компоненты термопластавтомата: шнек, материальный цилиндр, блок адаптера

Плоскость (соответственно, линия) разреза формы

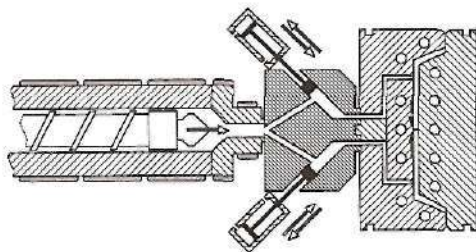


Головка

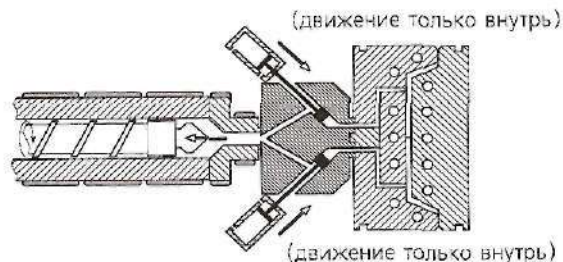
Горяче- или холодноканальная литниковая система

Область (линия) расплава

Фаза 1: Начало стадии выдержки под давлением. Поршни начинают двигаться вперед и назад, выполняя один или более циклов. Одновременно шнек поддерживает необходимые давления уплотнения/выдержки



Фаза 2: Во время стадии выдержки под давлением Поршни одновременно синхронно перемещаются в прямом и обратном (возвратно-поступательно) направлениях, выполняя один или более циклов и попеременно создавая зоны сжатия/разряжения расплава.



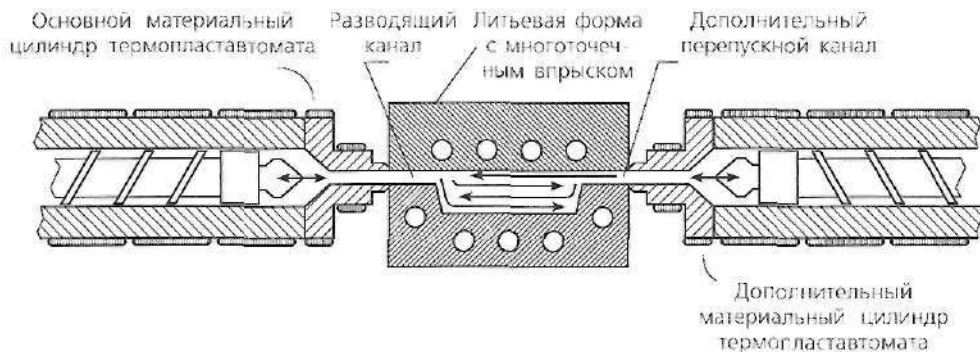
Фаза 3: Завершение стадии выдержки под давлением. Поршни находятся в нижнем положении, контролируя величину давления уплотнения при затвердевании расплава в формирующей полости. В материальном цилиндре термопластавтомата начинается пластикация следующей дозы вгрыска.

Рис. 2.50. Технология литья под давлением термопластов с применением циклического воздействия на расплав — для повышения прочности термопласта в области сая, управления ориентацией армирующих волокон и макромолекул (с разрешения *Scortec Division, British Technology Group USA*)

расплав впрыскивается через подогретую головку (адаптер) в форму. Впрыск может осуществляться через один или два впуска. Как только форма будет заполнена расплавом, поршни гидравлической системы начинают перемещаться в прямом и обратном направлениях, создавая вибрационные колебания расплава. Когда один поршень начинает сжимать расплав, то он выдавливает его через формующую полость и впускной литник в другой цилиндр. Затем процесс повторяется в обратном порядке, а расплав перемещается в обратном направлении, «размывая» область спая (соответственно и линии спая на поверхности отливки). Это перемещение расплава в разных направлениях выполняется несколько раз. Поскольку перемещается только подвижная горячая центральная часть расплава, то таким образом возможно управлять ориентацией макромолекул или армирующих волокон в термопластах. Когда используются четыре впускных литника (например, по одному с каждой стороны прямоугольной отливки), то, как правило, при заполнении формующей полости впуски работают попарно, и может быть достигнута необходимая ориентация во взаимоперпендикулярных направлениях. После окончания фазы 1 (см. рис. 2.50), то есть после нескольких циклов движения поршней в разных направлениях, каждая из пар поршней начинает работать синхронно. В течение одного или нескольких циклов при синхронном действии поршней, но под действием сил сжатия происходит максимально плотное и равномерное заполнение расплавом формующей полости. В конце второй фазы все поршни одновременно сжимают расплав в полости до тех пор, пока впускные литники не «замерзнут» (то есть осуществляется и завершается обычная стадия выдержки под давлением). Этот уникальный способ оказался очень эффективным для «залечивания» линий спая, особенно при использовании термопластов, армированных волокнами, поскольку позволяет эффективно управлять ориентацией как макромолекул, так и армирующих волокон.

Литье под давлением по технологии *Push-PullMolding*

Эта специальная технология литья под давлением почти аналогична предыдущей также была разработана сравнительно недавно [49-51]. Она может быть использована для «размывания» области спая и позволяет эффективно управлять как ориентацией макромолекул, так и армирующих волокон. Но для ее реализации требуется термопластавтомат с двумя модулями впрыска - материальными цилиндрами (рис. 2.51). Один из этих модулей является основным, а второй — дополнительным. В простейшем случае форма имеет два капала, через которые осуществляется процесс ее заполнения. Через основной канал происходит избыточное заполнение формующей полости, при этом через перепускной канал избыток расплава проходит во второй модуль, образуя в его материальном цилиндре некоторый объем расплава. После первоначального заполнения формы цикл повторяется, уже в обратном направлении, так что избыточный расплав будет передаваться уже в основной материальный цилиндр. Такое перемещение расплава может быть осуществлено несколько раз в течение всего цикла литья конкретного изделия. При этом спай эффективно «размывается», поскольку расплав в формующей полости несколько раз проходит через область его образования. Каждый из отдельных потоков расплава, находясь в полости формы, среди других потоков, образованных в процессе такого возвратно-поступательного перемещения расплава, перемещается и распределяется по толщине изделия, что



- Расплав под действием шнека основного материалного цилиндра переполняет формующую полость литевой формы с многоточечной литниковой системой; избыточное количество через перепускной канал попадает в дополнительный материалный цилиндр
- Поток расплава под действием шнека дополнительного материалного цилиндра впрыскивается в формующую полость, и процесс повторяется требуемое число раз

Рис. 2.51. Способ литья под давлением по технологии Push-Pull Molding. За счет организации возвратно-поступательного перемещения расплава в формующей полости происходит «размывание» спая, соответственно, и линии спая, и осуществляется управление ориентацией макромолекул и армирующих волокон

приводит к уменьшению влияния спая на прочность изделия. Чтобы было осуществлено несколько последовательных циклов перемещения расплава до его затвердевания, изделие, которое изготавливается по такой технологии, должно быть достаточно толстым. Технология *Push-Pull Molding* может быть использована и в формах, у которых больше двух впусков. В этом случае требуется применение клапанов во впускных литниках, которые дают возможность механически открывать и закрывать места впуска в нужный момент.

Знаки для возвратно-поступательного движения в литевой форме (In -mold Reciprocating Pins)

Для улучшения прочностных характеристик спая можно также применять в литевых формах особые подвижные элементы, например, вращающиеся матрицы (для изделий цилиндрической формы) или знаки, совершающие возвратно-поступательные движения [52]. В формах можно использовать либо один такой знак, который находится вблизи линии спая (рис. 2.52), или два знака, которые находятся с разных сторон спая. Знаки перемещаются вверх-вниз (возвратно-поступательно) во время заполнения расплавом формующей полости формы. Такое движение знаков создает дополнительное течение расплава в поперечном основному течению направлении, которое способствует повышению прочности спая. Возвратно-поступательное перемещение знаков может управляться кулачковым гидравлическим приводом, который заставляет перемещаться знак, начиная от поверхности расплава на некоторую глубину ниже этой поверхности, создавая временное углубление. После определенного количества циклов такого возвратно-поступательного перемещения знак (или знаки) возвращается в исходное положение на один уровень

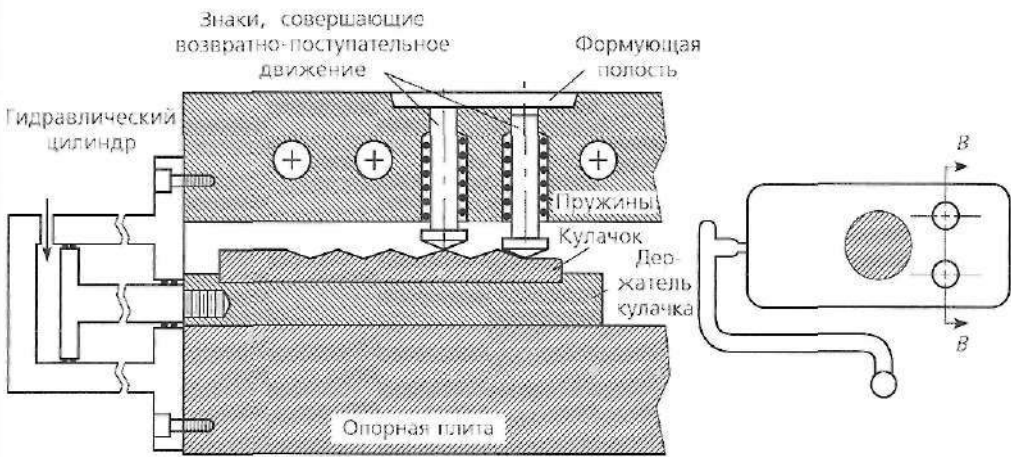


Рис. 2.52. Кулачок (один или более) может приводить в движение знаки, которые совершают возвратно-поступательное движение, влияя на дополнительное перемещение расплава в поперечном направлении, перпендикулярном течению основного потока расплава при заполнении формующей полости. Справа — схема впрыска расплава в формующую полость

(заподлицо) с поверхностью формующей полости. Движение кулачка может быть начато по сигналу таймера, либо в момент соответствующего положения плунжера, а также по сигналу от датчика, измеряющего давление в форме.

Последовательный впрыск

Применение горячеканальных литниковых систем для изделий, в которых образуются спаи, дает определенное преимущество, потому что поддерживается более высокая температура расплава в момент, когда он поступает в формующую полость. Изделия большого размера, например, прямоугольной формы, как показано на рис. 2.53, обычно получают в литевых формах, литниковые системы которых имеют несколько впускных литников, чтобы уменьшить длину течения расплава и обеспечить равномерное его уплотнение. К сожалению, при такой литниковой системе возникает несколько областей спаев, соответственно, линий спая. Однако если использовать механические клапаны — фактически сопла, которые открываются и закрываются механически, действуя по специальной программе, то можно, последовательно открывая каждый клапан при заполнении формующей полости, регулировать образование (и далее избегать) спаев. Сигналы для открывания клапанов могут быть поданы с помощью таймеров; датчиков, отслеживающих положение плунжера; датчика, измеряющего давление в формующей полости. Например, заполнение формы может начаться с открывания клапана одного из впускных каналов, как показано на рис. 2.53. Как только фронт расплава пересекает место расположения второго клапана, он открывается, и процесс заполнения продолжается дальше. После завершения заполнения формующей полости наступает стадия уплотнения расплава, который подавался через впускные литники, снабженные клапанами.

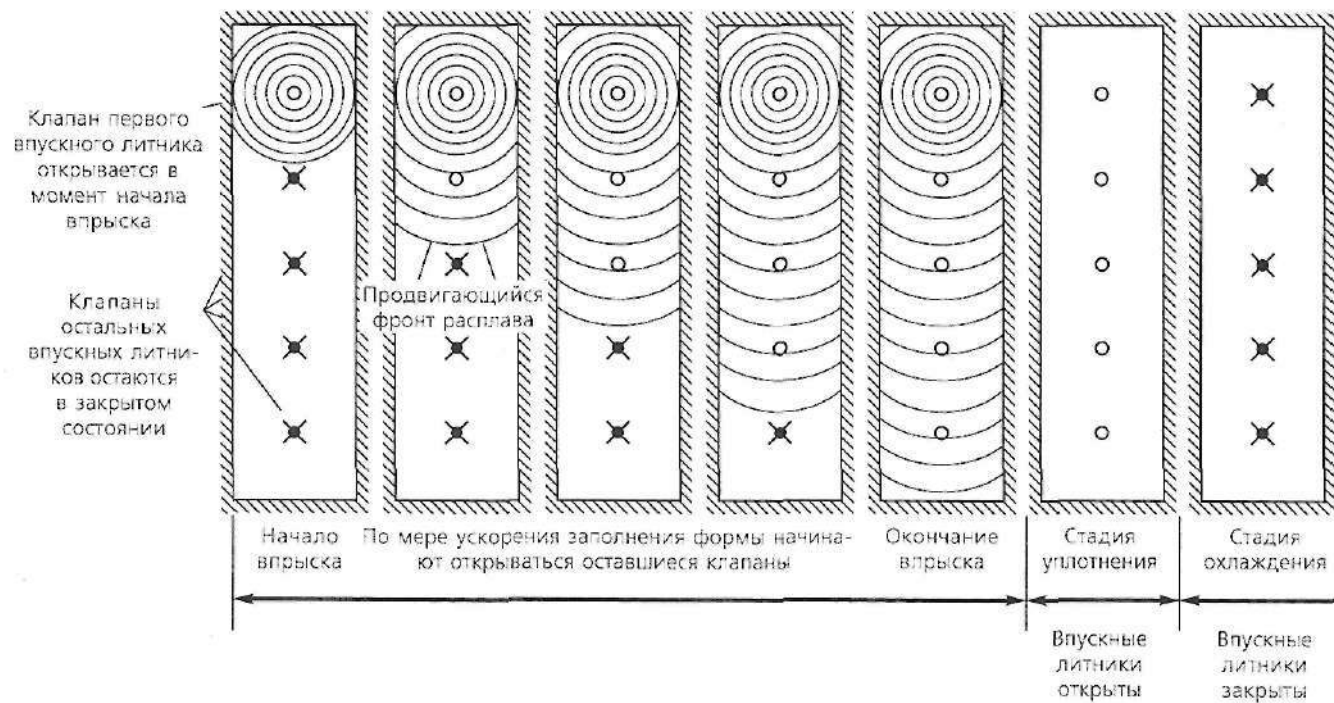


Рис. 2.53. Управление заполнения формующей полости расплавом с помощью механических клапанов, которыми снабжены впускные литники. Клапаны могут открываться и закрываться в необходимой последовательности, что позволяет эффективно влиять на формирование областей линий спая. Работа клапанов может быть запрограммирована на открывание и закрывание в момент появления расплава в формующей полости на уровне соответствующего впускного литника

2.4. Усадка и коробление изделий, изготовленных литьем под давлением

2.4.1. Общие положения

Процесс литья под давлением обычно используется для получения изделий с относительно жесткими допусками по размерам. В некоторых случаях необходимо выполнение очень жестких допусков. Если, например, готовое изделие собирается из нескольких пластмассовых деталей, то эти детали должны максимально точно соответствовать требованиям сборки. Практически все пластмассы при переработке проявляют достаточно высокую усадку. При этом усадка материала не всегда изотропна и стабильна. Если материал в отлитом изделии не изотропен, то расчет размеров формующей полости перестает быть процедурой простого пропорционального (для компенсации усадки) увеличения ее размеров. Кроме того, анизотропное поведение материала в процессе усадки (образца, изделия), будет приводить в определенной степени к возникновению внутренних напряжений и короблению [53–58].

Усадка и коробление, точность размеров пластмассовых изделий зависит от материала, конфигурации и габаритов изделия, конструкции литейной формы и технологических факторов, определяемых процессом переработки.

Факторы, зависящие от материала:

- Тип материала — аморфные или частично кристаллические термопласты.
- Количество и состав наполнителей, в том числе армирующих волокон и т. д.
- Степень абсорбции влаги.

Факторы, зависящие от конфигурации изделия:

- Номинальная толщина стенок.
- Разпотолициность стенок.
- Габаритные размеры изделия.
- Конструктивные особенности элементов изделия, ограничивающие (затрудняющие) усадку.
- Технологические уклоны и конструктивные углы наклона.

Факторы, зависящие от конструктивных особенностей литейной формы:

- Расположение мест впуска.
- Тип и размеры впускных литников.
- Тип литниковых систем.
- Конфигурация и расположение системы охлаждения формы.
- Допуски на изготовление деталей литейной формы, прежде всего, формообразующих.
- Тип систем выталкивания изделия.
- Упругая деформация нагруженных деталей литейной формы.

Факторы, зависящие от технологического процесса:

- Температура расплава и равномерность ее распределения.
- Температура формы и равномерность ее распределения.
- Давление заполнения; уплотнения; выдержки,
- Время заполнения; уплотнения; выдержки.

- Температура изделия при выталкивании.
- Усилие смыкания/размыкания формы.
- Фиксация изделия после извлечения из литейной формы и при его термообработке (отжиге).

2.4.2. Влияние толщины и разнолощинности

Литье под давлением термопластов является дискретным полунепрерывным последовательным процессом, состоящим из определенного количества стадий, которые описаны в разделе 2.1. Стадия уплотнения начинается сразу же после полного заполнения формующей полости, то есть достижения расплавом ее крайних зон. Поскольку расплавы пластмасс характеризуются высоким значением коэффициента сжимаемости, то от величины давления уплотнения расплава зависит масса материала, который в конечном счете будет впрыснут в фиксированный объем формующей полости. Объем формующей полости не всегда является точной постоянной величиной — из-за возможной упругой деформации формообразующих деталей. Затем устанавливается давление выдержки, которое поддерживается шнеком термопластавтомата, чтобы не дать расплаву вытечь из формующей полости на стадии охлаждения изделия, а потом добавлять в нее определенное количество расплава — для компенсации происходящей усадки термопласта. После затвердевания литникового впуска материал продолжает усаживаться, но уже без компенсации.

Типовая зависимость изменения давления в закрытой формующей полости показана на рис. 2.54. Такие переменные процесса литья под давлением, как величины давлений уплотнения и выдержки, оказывают существенное влияние на усадку

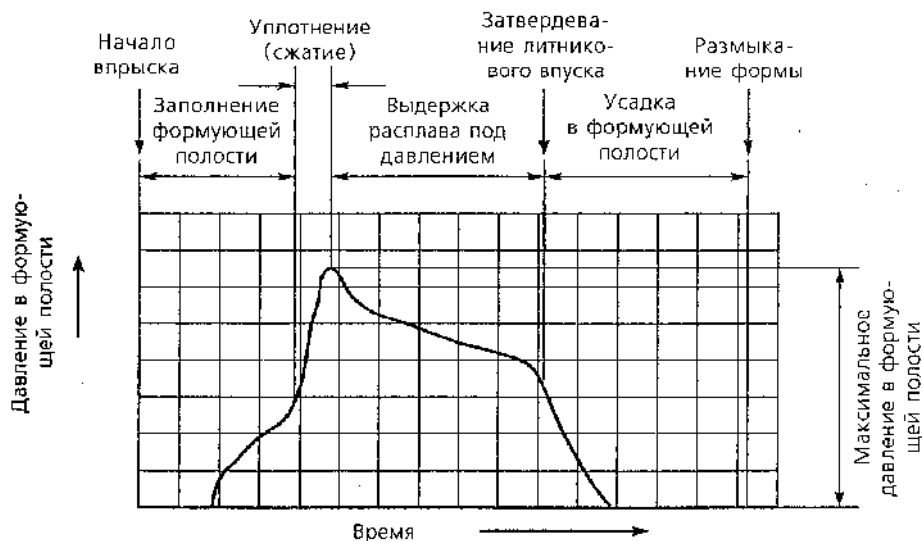


Рис. 2.54. Типовая зависимость изменения давления в закрытой формующей полости от времени цикла при литье под давлением. Стадии уплотнения и выдержки под давлением используются для компенсации усадки пластмассы

и окончательные размеры отлитого изделия. Если не прилагать давление для уплотнения и выдержки, то объемная усадка пластмассы может достигать 25 % [57]. Давление выдержки должно быть, с одной стороны, достаточно высоким, чтобы компенсировать эффекты усадки, а с другой — достаточно низким, чтобы не возникло переуплотнения массы, что может привести к значительным остаточным напряжениям и осложнениям при выталкивании изделия.

Изделия с утолщенными областями труднее охладить и сделать достаточно плотными. Эти области охлаждаются большее время и требуют дополнительного уплотнения. Когда изделия имеют как утолщенные, так и тонкие области, то места впуска предпочтительнее располагать в толстостенных областях, поскольку это позволяет уплотнять массу в них даже тогда, когда в тонкостенных уже произошло затвердевание. В переходных участках изделий между областями с различной толщиной возникает концентрация внутренних напряжений как следствие различно протекающих во времени процессов охлаждения и уплотнения [18].

Например, когда отлитые изделия, аналогичные изделию на рис. 2.55, *a*, выталкиваются из формы, то утолщенные более горячие участки отливки будут дольше охлаждаться и давать большую усадку, чем более тонкие области. Это приводит к возникновению внутренних напряжений в зонах изменения толщины. Внутренние напряжения могут приводить к краткосрочному (без остаточных деформаций) или долгосрочному короблению, ухудшению механических и других функциональных параметров изделия в процессе его эксплуатации. Если в конструкции изделия предусматриваются разнотолщинные области, то можно использовать клиновидные переходные участки (обычно длина клиновидной части должна быть в три раза больше разницы в толщинах), чтобы избежать высокой концентрации напряжений. Переходные участки изменения толщин также «ступенчато» изменяют поток расплава при заполнении формирующей полости. Следует, по-возможности, избегать утолщений стенок в конструкции, поскольку они приводят к проблемам, связанным с усадкой,

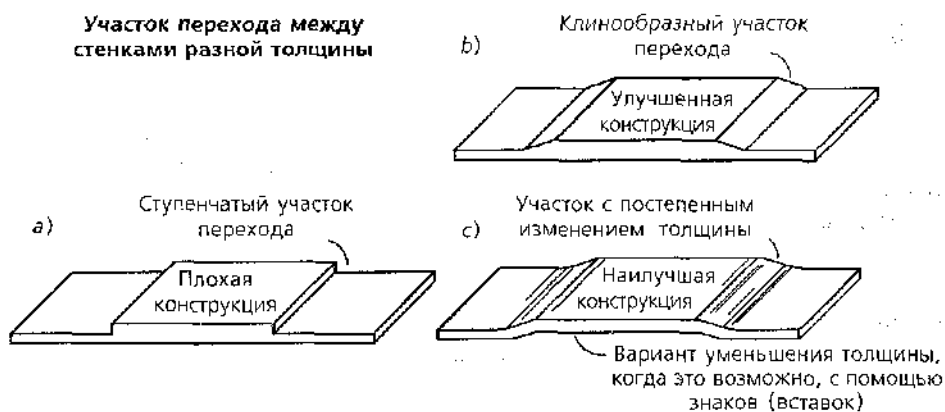
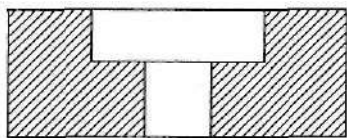


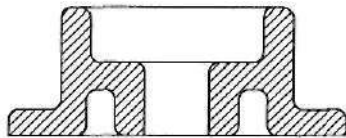
Рис. 2.55. Следует избегать, по-возможности, использования в изделиях стенок разной толщины из-за концентрации усадочных напряжений в переходных участках. Если же в изделии обязательны стенки разной толщины, рекомендуется использовать клиновидные переходные участки

и вызывают необходимость более длительного охлаждения. Рационально при решении этих проблем применять знаки и вставки — для формирования поднутрений, или добавлять ребра и элементы жесткости на краях (торцах) изделия. Это позволяет компенсировать потерю прочности.



Исходная конструкция изделия:

- Участки с очень толстыми стенками
- Неравномерная толщина стенок
- Острые края на наружных и внутренних поверхностях



Улучшенная конструкция изделия:

- Более тонкие участки стенок
- Более равномерная толщина стенок
- Закругленные края наружных и внутренних поверхностей (следует использовать такую конструкцию)

Рис. 2.56. Изменение толщины стенок может быть осуществлено с помощью рационального конструирования матрицы, пуансона и знаков (вставок). Это приводит к сокращению технологического цикла и улучшению общего качества изделия. В случае необходимости для повышения прочности изделия применяют ребра жесткости

На практике, из-за сложности конструкции, бывает невозможно выдерживать одинаковую толщину стенок во всем изделии. Бобышки, ребра технологического и конструктивного назначения будут приводить к локальным изменениям толщин стенок, что способствует возникновению внутренних напряжений в соответствующих областях отливки.

Бобышки могут приводить к возникновению усадочных утяжин, внутренних усадочных полостей. Внутренние усадочные полости формируются, когда «толстая» наружная поверхность изделия, затвердевая в форме, становится достаточно прочной, чтобы выдерживать давление в формующей полости, возникающее в результате охлаждения расплава. К этому времени расплав проявляет большую склонность к образованию зон разрежения, т. е. усадочных полостей, чем к деформированию затвердевающего поверхностного слоя [55]. Усадочные утяжины нежелательны с эстетической точки зрения, а усадочные полости представляют собой неоднородности, которые действуют как конденсаторы напряжений, когда изделие при эксплуатации испытывает нагрузку.

Усадочные утяжины или усадочные полости часто образуются на противоположной стороне стенки, на которой расположены усиливающие ребра [58]. Формующая полость для изделия с толстыми ребрами легче заполняется расплавом, однако может появиться значительное количество утяжин, возникающих из-за ребер. Проблема усадочных утяжин значительно упрощается при наличии больших закруглений в местах пересечения ребер со стенками. Этот прием используется для уменьшения концентрации напряжений и улучшения движения потока расплава. Толщины ребер обычно принимают равными 40–80 % от толщины стенок, на которых они расположены, с радиусами закругления в основании, равными 25–40 % от толщины стенок. Конкретная конструкция ребра зависит от марки используемого материала (его усадочных характеристик).

Если правильно выполнять рекомендации, то размеры усадочных утяжин, которые образуются из-за наличия таких особенностей конструкции, как ребра, будут

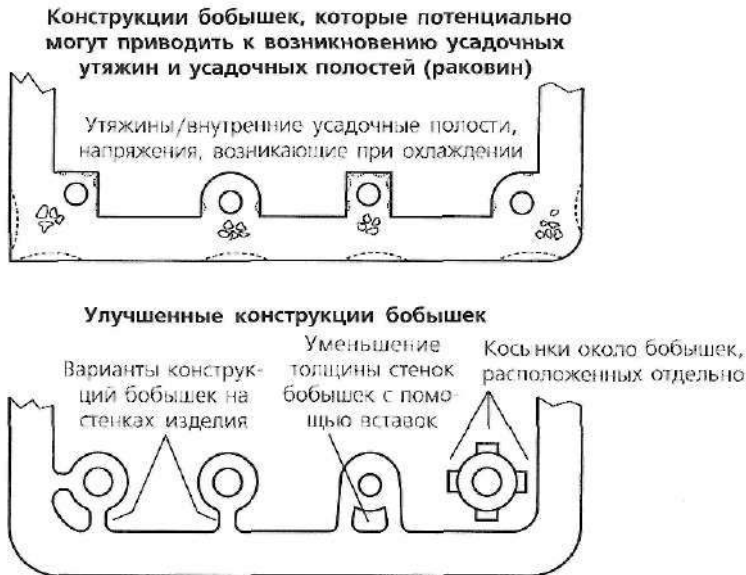


Рис. 2.57. Варианты конструкций бобышек у стенок изделия: бобышки располагаются отдельно от стенок, например, для увеличения прочности при кручении, и улучшении (в конкретных случаях) процесса заполнения формирующей полости

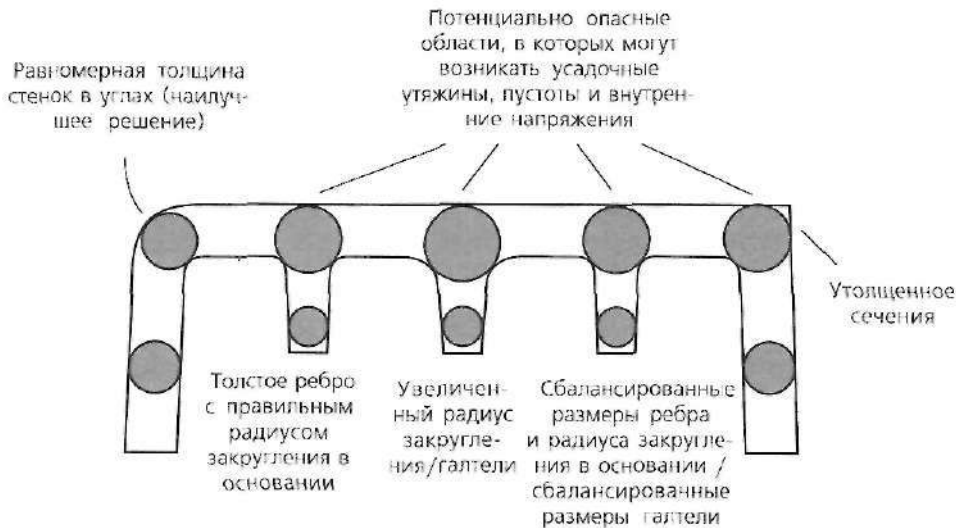


Рис. 2.58. Большие сечения в основании усиливающих ребер могут привести к образованию усадочных утяжин или усадочных пустот

минимальными. Тем не менее не всегда удастся сделать их полностью незаметными. Локальное охлаждение области, в которой образуются утяжины, может повлиять на их величины. На рис. 2.59 приведены различные способы, которые могут быть использованы для маскировки усадочных утяжин [59]. Одной из наиболее распространенных причин изготовления изделий с текстурированной поверхностью является необходимость маскировки таких дефектов, как утяжины или видимые линии спая. Наконец, есть возможность устранения утяжин, если добавлять небольшие пенообразующие агенты в исходный термопласт. При литье под давлением образуется пенная структура по всему объему отливки и при этом утяжины «пропадают».

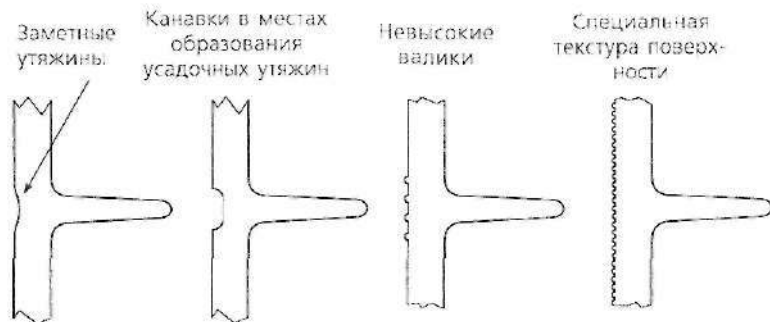


Рис. 2.59. Для маскировки заметных утяжин и тому подобных дефектов, возникающих на противоположных ребрах или бобышках сторонах (стенках), изделия могут быть использованы различные способы, представленные на рисунке

2.4.3. Диаграмма состояния пластмассы: давление-объем-температура (PVT-диаграмма)

Пластмассы отличаются положительными коэффициентами термического расширения и обладают высокой сжимаемостью в расплавленном состоянии. В результате объем, который может занимать порция материала определенной массы, будет зависеть от температуры и давления. Спенсер и Гилмор впервые предложили использовать общее уравнения состояния газа (РУГ-диаграмма) для описания процессов расширения и сжатия пластмассы на примере ПС J 60]. Это обобщенное уравнение состояния имеет следующий вид:

$$(P + a) (V - b) = RT/M, \quad (2.13)$$

где P — гидростатическое давление; V — удельный объем; R — универсальная газовая постоянная; M — молекулярная масса; T — абсолютная температура; a/b — константы, характеризующие данный материал.

Уравнение определяет: давление, температура и удельный объем связаны друг с другом таким образом, что любым заданным значениям температуры и давления соответствует конкретное значение удельного объема. Зависимость между давлением, температурой и удельным объемом может быть определена экспериментально. Данные, связывающие давление-удельный объем- температуру, обычно отображаются в виде

двухмерных графиков, на которых приведены кривые зависимости удельного объема материала от температуры при различных постоянных значениях давления (изобары).

PVT-диаграммы показывают, что пластмассы (термопласты) фактически обладают очень большим коэффициентом сжимаемости при температурах и давлениях, которые используются при литье под давлением. Такие параметры технологического процесса, как давление уплотнения или давление выдержки (более общее — давление в формующей полости), должны оказывать значительное влияние на усадку и размеры изделия. РУГ-диаграммы для частично кристаллических полимеров (например, для ПП или ПА 6.6) сильно отличаются от диаграмм, характерных для аморфных полимеров, таких как ПС. И для тех и для других характерен рост удельного объема с увеличением температуры (при постоянном давлении) — из-за эффекта сжимаемости. Однако в отличие от аморфных термопластов, частично кристаллические имеют на PVT-диаграмме «ступеньку» изменения удельного объема материала при температуре его плавления. Когда частично кристаллизующиеся термопласты охлаждаются в формующей полости, то «аморфный расплав» плавно охлаждается и начинает затвердевать, как только достигает температуры кристаллизации. Значительное уменьшение объема связано с фазовым переходом, когда макромолекулы полимера плотно упаковываются в зонах кристаллизации (рис. 1.2).

Это изменение фазового состояния — от аморфной к частично упорядоченной полукристаллической структуре — объясняет высокую степень усадки частично кристаллических термопластов по сравнению с аморфными (где усадка происходит, в основном, благодаря термическому сжатию, уравнивающему давление). Усадка частично кристаллического термопласта без наполнителя (например, ПП) может быть в пять раз больше усадки аморфного термопласта без наполнителя (например, ПММА) [61].

Объемная усадка изделия из пластмассы может быть рассчитана теоретически, если известна его РУГ-диаграмма и параметры процесса переработки [2]. К сожалению, параметры технологического процесса (и из-за этого усадка — в формующей полости) в значительной степени находятся за пределами зоны реального влияния конструктора, однако приведенное выше описание может быть использовано для лучшего понимания того, как различные стадии процесса литья под давлением будут влиять на объемную усадку материала.

Процесс литья начинается с впрыска расплава в относительно «холодную» форму. Материал начинает охлаждаться, а его удельный объем уменьшается. Уплотняя и добавляя расплав в формующую полость, компенсируется усадка материала в форме до тех пор, пока впускной литник не затвердеет. К этому моменту материал в центральных зонах формующей полости будет находиться еще в расплавленном состоянии и подвергаться усадке без компенсации. Как только отливка становится достаточно твердой, чтобы сохранять свою форму при выталкивании из формующей полости (под воздействием внутренних напряжений или силы тяжести самой отливки) без деформаций, форма раскрывается, и изделие может быть извлечено. Еще теплое изделие продолжает охлаждаться и усаживаться вне формы, пока его температура не станет равной температуре окружающей среды (то есть не придет с ней в равновесие).

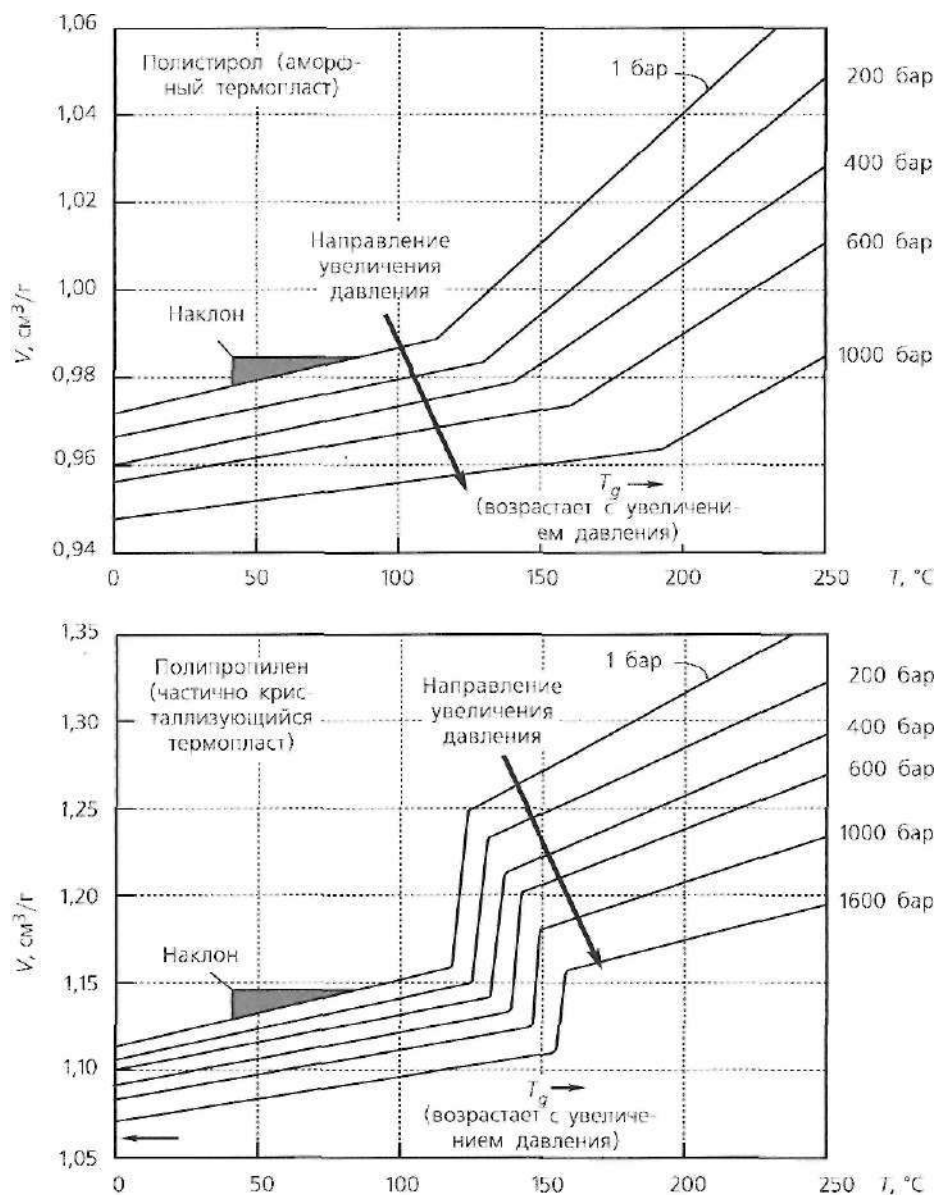


Рис. 2.60. Типичные кривые зависимости давления-объема-температуры (PVT-диаграммы) для полистирола (вверху) и полипропилена (внизу)

Стадии процесса литья под давлением, которые описаны выше, могут быть прослежены по РУГ-диаграмме (рис. 2.61).

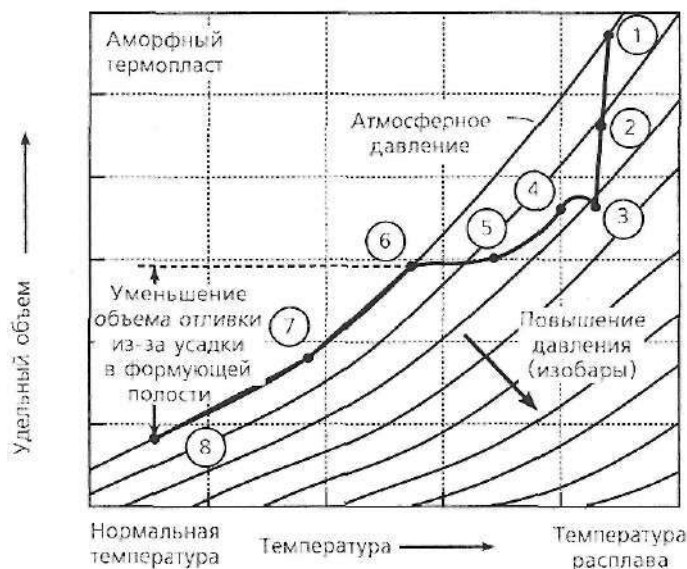


Рис. 2.61. Типовая диаграмма процесса лития под давлением термопластов (зависимость давления и удельного объема от температуры пластмассы). Цифрами отмечены основные стадии и ситуации:

1. Давление расплава повышается по мере поступления его в формующую полость.
- 1-2. Заполнение формующей полости расплавом.
2. Полное заполнение (нулевое давление в конце пути течения потока).
- 2-3. Стадия уплотнения или сжатия расплава.
3. Как только достигается максимальное давление в формующей полости, происходит перетекание материала под действием давления выдержки.
- 3-4. Реальное давление выдержки связано с потерями давления из-за обратного потока материала непосредственно в момент «переключения» на новый режим течения под действием давления выдержки.
4. Стадия выдержки под давлением.
- 4-5. Давление падает из-за охлаждения и увеличения толщины затвердевшего слоя расплава у стенок формующей полости; происходит компенсация сжатия расплава (из-за уменьшения удельного объема).
5. Впускной литник «замораживается», прекращается подача расплава и завершается стадия выдержки под давлением.
- 5-6. Давление падает, когда изделие начинает охлаждаться и происходит его усадка без компенсации.
6. Достигается давление, близкое к атмосферному, что означает, что размеры отливки становятся практически равными размерам формующей полости, и начинается «усадка отливки в формующей полости» (как это было определено выше).
- 6-7. Изобарическое охлаждение отливки в замкнутой литьевой форме.
7. Раскрытие литьевой формы — выталкивание отливки.
- 7-8. Изобарическое охлаждение после лития под давлением, вне формы.
8. Зона термического равновесия отливки с окружающей средой; достижение требуемых объема и размеров отливки (пренебрегая любыми изменениями объема, связанными, например, с адсорбированием влаги).

2.4.4. Линейная усадка отливки в форме

Типовая диаграмма процесса литья под давлением, рассмотренная на рис. 2.61, полезна для определения объемной усадки. Для всех конструкторов изделий и литейных форм наибольший интерес представляет не объемная, а линейная усадка. Для изотропного термопласта, из которого изготавливают литьем под давлением изделие, имеющее возможность свободно, без помех, усаживаться, линейная усадка S_L имеет вид [57]:

$$S_L = 1 - (1 - S_V)^{1/3}, \quad (2.14)$$

где S_V — объемная усадка (следовательно, для указанного типа термопластов линейная усадка равна корню кубическому из значения объемной усадки).

К сожалению, существует достаточное количество факторов, которые приводят к анизотропии усадки. Например, конструктивные ограничения в одном направлении — по длине отливки — будут приводить к увеличению ее линейной усадки в другом. Линейная усадка будет также изменяться из-за ориентационной анизотропии макромолекул и армирующих наполнителей — в зависимости от давления в формующей полости и скорости охлаждения расплава в ней. Объемная усадка может быть теоретически предсказана, но изменения длины, ширины и толщины изделия из-за усадки, приводящие к изменению удельного объема, должны быть определены экспериментально или просто аппроксимированы.

Значения линейной усадки материала определяются экспериментально по разности размера образца и соответствующего ему размера формующей полости. Значение усадки рассчитывают, вычитая измеренный размер образца (изделия) от соответствующего ему размера формующей полости, в которой он был отлит, и деля полученную разность на измеренную величину размера образца (изделия) [62 J. Полученные значения линейной усадки выражаются в следующих единицах: дюйм/дюйм, мм/мм или в процентах (усадка материала, умноженная на 100). Величину линейной усадки изделия, которая измерена экспериментально, конструктор литейной формы может применить для расчета соответствующих размеров формующей полости, используя следующее соотношение:

Расчетный размер формующей полости = измеренный размер
изделия / (1 - линейная усадка материала изделия),

где усадка выражается в единицах дюйм/дюйм (мм/мм). ^

Информация, которая может быть получена с помощью стандартных испытательных процедур, является достаточно «грубой», особенно это относится к образцам, предназначенным для оценки поперечной усадки, поскольку поток расплава течет в «затрудненных» условиях и не имеет возможности свободно растекаться [63J. Очень важно заметить, что перед проведением стандартной испытательной процедуры измерения размеров образца (и изделия) они должны быть выдержаны при определенных условиях. Данные о «стандартной» усадке материала должны быть получены через 48 часов после выдержки образцов при стандартных значениях температуры и относительной влажности. Это особенно важно для частично кристаллических и гигроскопичных термопластов. Размеры изделий, которые получены из стеклоподобных аморфных термопластов (например, ПС), могут стабилизироваться всего за 20-30 минут [64].

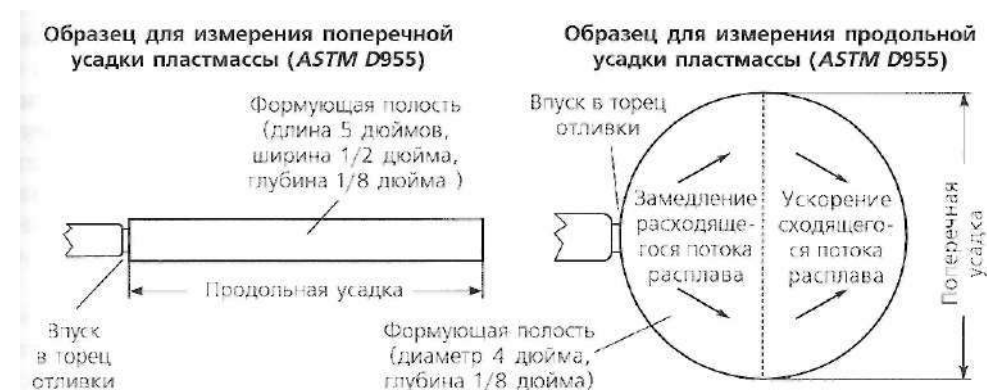


Рис. 2.62. Каждый стандартный тест по образцам даст только грубую оценку усадки материала при литье под давлением — в продольном и поперечном направлениях

С другой стороны, определенные структурные релаксационные изменения частично кристаллических термопластов могут продолжаться в течение нескольких часов или даже дней после литья под давлением образца (изделия). В случае гигроскопичных

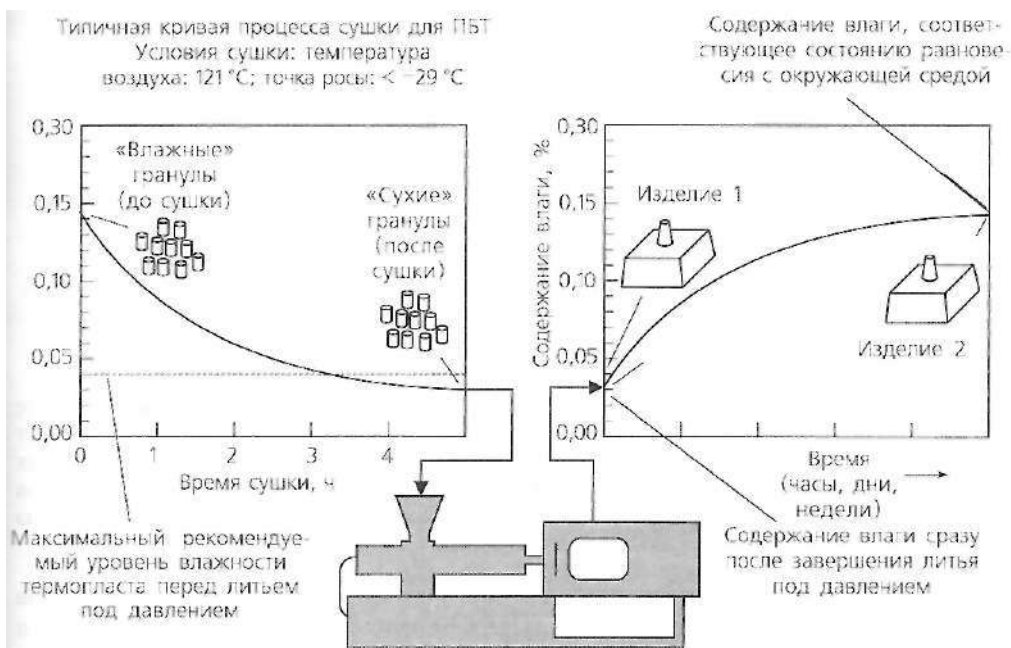


Рис. 2.63. Изделия, отлитые под давлением из гигроскопичных термопластов после сушки, повторно абсорбируют влагу в течение некоторого времени. Скорость накопления влаги будет зависеть от геометрии изделия и условий окружающей среды. Изделие 1 — сразу после завершения литья под давлением предварительно высушенного термопласта. Изделие 2 — сразу после завершения литья под давлением из высушенного предварительно термопласта

термопластов изменения объема и размеров, которые происходят в изделиях после литья под давлением, могут также зависеть от реабсорбции влаги [65,66].

Такие гигроскопичные полимеры, как ПБТ или ПЛ 6.6, перед литьем под давлением подвергаются сушке и в результате отлитые образцы (изделия) получаются «сухими» после извлечения из формы. Через некоторое время происходит реабсорбция влаги из атмосферы, но этот процесс может занимать дни или недели до того момента, когда будет достигнут равновесный с окружающей средой уровень влажности (в зависимости от массы и толщины изделия). В результате после реабсорбции влаги, образцы (изделия) разбухают, увеличиваются в своих размерах.

Размеры образцов (изделий) из частично кристаллического термопласта после извлечения из формы изменяются еще и по другой причине — продолжается усадка, которая может происходить как из-за продолжающейся в аморфных областях кристаллизации, так и разупорядочивания кристаллической структуры (так называемая «вторичная» кристаллизация) [65].

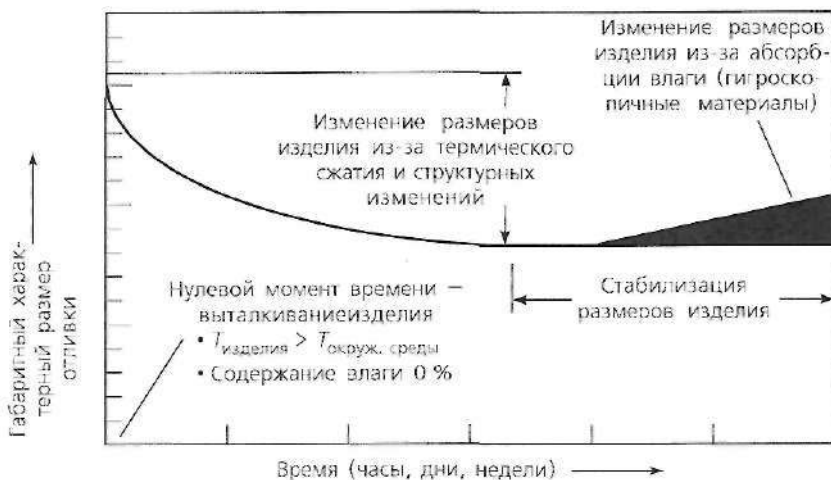


Рис. 2.64. Размеры отливок (изделий) из аморфных термопластов стабилизируются в течение относительно короткого времени. Частично кристаллические термопласты могут продолжать усаживаться в течение длительного времени — из-за структурных изменений в кристаллических зонах. Отливки из гигроскопичных термопластов могут иметь тенденцию к небольшому разбуханию по мере накопления влаги из окружающей среды

Размеры изделий из гигроскопичных и частично кристаллических термопластов (например, ПБТ, полиформальдегида или ПА 6.6) первоначально будут уменьшаться из-за термического сжатия и структурных изменений материала, а затем могут увеличиваться — по прошествии продолжительного времени — из-за повторной абсорбции влаги из атмосферы. Влага в определенной степени способствует разбуханию изделия, вызывает проявление «эффекта пластикации», делает материал более вязким и пластичным. Это важно учитывать при конкретном применении изделия, например, стяжек для крепления кабеля (рис. 2.65). Пластичность важна в тех приложениях,

когда имеет значение, насколько малым может быть эластичный изгиб материала в изделии, а точность размеров становится важным фактором, например, для самозапирающихся механизмов. Когда изделия упаковываются немедленно после завершения процесса литья под давлением (без контроля соответствия изделия требуемым техническим условиям), упаковка может служить барьером для проникновения влаги, оставляя изделие в сухом и хрупком состоянии достаточно длительное время. Чтобы исключить такую проблему, надо добавлять предварительно рассчитанное



Рис. 2.65. Рассчитанное количество воды может быть «добавлено» в сухое изделие сразу после литья под давлением (из высушенного предварительно термопласта), чтобы обеспечить в нем повторную абсорбцию влаги

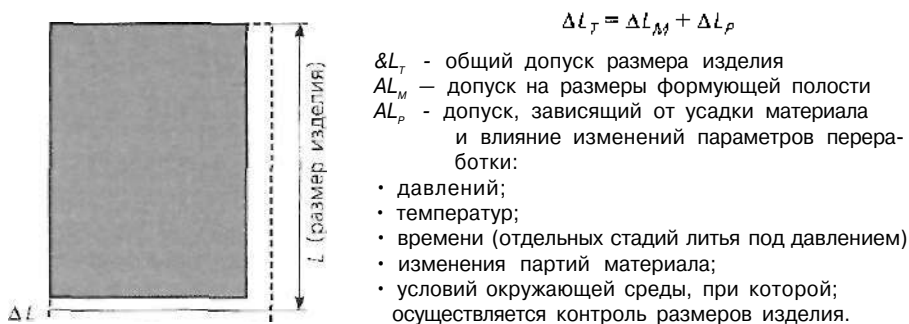


Рис. 2.66. Допуски конкретных размеров изделия зависят одновременно от допусков на размеры формующей полости и от колебания величины усадки материала, что, в свою очередь, зависит от параметров процесса литья под давлением

количество воды (в соответствии с массой отлитого изделия) в упаковку до ее герметизации — это гарантирует обеспечение требуемой влажности среды в течение всего времени хранения готовой продукции.

Точность размеров изделий, полученных литьем под давлением, в значительной степени определяется возможностью правильного предсказания значений линейной усадки материала. Допуски размера, которые могут быть достигнуты на практике, зависят от условий технологического процесса литья под давлением и соблюдения размеров оснастки [67]. Приемлемые допуски на размеры формующей полости, как правило, меньше на 50 %, чем допуски на готовое изделие. Разделение допуска по схеме 50/50 дает возможность изготовителю формы и литейщику иметь одинаковый допуск для компенсации размеров при изготовлении оснастки и для предсказания усадки и влияния параметров литья на точность размеров изделия соответственно [68].

При конструировании и изготовлении литьевых форм для литья под давлением необходимо также учитывать, что фактическая точность размеров деталей зависит от упругой деформации, возникающей в нагруженных деталях и узлах из-за значительных давлений в формующей полости и усилий смыкания полуформ. Требуемую точность размеров изделия легче выдержать, если колебание усадки материала конкретной марки невелико по амплитуде, и предсказуемо. К сожалению, существует много факторов, которые затрудняют такое предсказание, способствуя проявлению анизотропии усадки изделия, возникновению внутренних напряжений, и, следовательно, короблению.

2.4.5. Анизотропная усадка и деформация/коробление изделий

Анизотропная усадка в материале отлитого изделия относится к нежелательным (но фактически неизбежным) последствиям литья под давлением. Она приводит к трудностям при необходимости получения точных размеров изделия, к возникновению внутренних напряжений, а также короблению, когда внутренние напряжения оказываются настолько велики, что изделие начинает деформироваться. Компьютерный анализ позволяет конструктору оптимизировать конструкцию изделия задолго до изготовления формы и минимизировать потенциальные риски возникновения анизотропной усадки и коробления. Значительное количество факторов влияет на сложные процессы, вызываемые неравномерной усадкой изделий, полученных литьем под давлением. К таким факторам относятся:

- асимметричная термическая усадка из-за неравномерного охлаждения изделия;
- неравномерная объемная усадка;
- анизотропное поведение материала, связанное с ориентацией макромолекул, определенной свойствами потока расплава в формующей полости;
- сдвиговая деформация в потоке расплава, возникающая из-за особенностей геометрической формы изделия [69].

Ориентационная усадка (усадка в определенном направлении)

Степень ориентации макромолекул, возникающая в материале в процессе заполнения им формующей полости, оказывает значительное влияние на свойства термопласта в расплавленном, вязкотекучем состоянии. Во время заполнения формующей

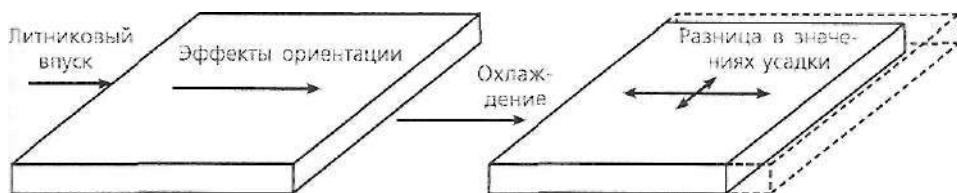


Рис. 2.67. Ориентация макромолекул, связанная с направлением движения потока расплава, будет приводить к разной усадке вдоль и поперек потока

полости макромолекулы полимера подвергаются растяжению, что определенным образом ориентирует их и приводит к анизотропной усадке изделия. Бенаполненные термопласты имеют тенденцию испытывать большую усадку в направлении потока (усадка продольная) по сравнению с направлением, перпендикулярным потоку (усадка поперечная), в то время как продольная усадка наполненных термопластов ограничена ориентацией волокон. В общем случае усадка в материале отлитого изделия будет более изотропной, если степень ориентации макромолекул расплава в процессе заполнения им формующей полости минимальна, и если существуют условия для макромолекулярной релаксации [8].

Влияние различных условий охлаждения

Изменение усадки по толщине изделия может быть вызвано различными скоростями охлаждения поверхностных слоев, соприкасающихся с формообразующими деталями — матрицей и пуансоном. На практике для многих изделий бывает невозможно добиться равномерного охлаждения из-за сложной геометрической конфигурации. Неравномерное охлаждение приводит к различному тепловому сжатию материала по толщине изделия, то есть к различной усадке.

Горячие поверхности формуемого изделия будут подвергаться усадке большее время, чем холодные (после затвердевания впускного литника и выталкивания изделия). Эти различия в усадке будут приводить к возникновению внутренних моментов сил, которые, вероятно, и вызывают коробление изделий [69].

Если изделие отлить из материала с высоким модулем упругости или в его конструкции предусмотреть «элементы жесткости» (ребра; усиленные, утолщенные края, отбортовка, фланцы на торцах), то есть если изделие достаточно прочное, чтобы сопротивляться возможному короблению, то оно будет сохранять свою форму, по при этом сохранятся и внутренние напряжения. Это очень важное обстоятельство, поскольку при определенных уровнях внутренних напряжений будут возникать ослабление сопротивлению растрескиванию под воздействием внешних условий и уменьшение сопротивления ударным нагрузкам. Кроме того, потенциально будет велика вероятность возникновения коробления, если изделие подвергается воздействию повышенных температур (при этом величина модуля упругости снижается) во время сборки, декорирования или эксплуатации.

Различная усадка по толщине изделия может возникать из-за того, что геометрические размеры матрицы и пуансона в таких местах, как углы, будут различаться друг от друга. По сравнению с наружной поверхностью изделия, внутренняя всегда



Рис. 2.68. Коробление или внутренние напряжения могут быть вызваны различным по интенсивности охлаждением, которое приводит к усадке по толщине изделия. Более горячие поверхности имеют тенденцию к большей усадке после того, как изделие выталкивается из формы

меньше по площади, и на практике организовать ее эффективное охлаждение может оказаться затруднительным. Поскольку внутренняя сторона отливки при выталкивании, как правило, остается горячей, она в большей степени подвержена усадке после выталкивания изделия. В результате возникает момент сил, который стремится сжать материал вовнутрь после выталкивания изделия из формы.

Влияние на величину и анизотропию усадки неравномерной скорости охлаждения может быть минимизировано за счет правильного выбора системы охлаждения. Многие из проблем, связанные с короблением изделия, решаются в процессе производства, если форма изготовлена так, что пуансон и матрица имеют независимые контуры охлаждения. Это дает технологу возможность локально регулировать скорость охлаждения на каждой поверхности.

Влияние изменения давления в формующей полости

Давления уплотнения и выдержки, используемые во время переработки, оказывают значительное влияние на усадку отлитого изделия. Высокие значения давлений уплотнения и выдержки приводят, в общем, к уменьшению усадки материала отлитого изделия, а меньшие значения — к ее увеличению. Следует помнить, что давление в полости изменяется от максимального на впуске до минимального в конце пути потока расплава — из-за его сжимаемости. Перепад давлений подлине формующей полости может быть очень существенным, особенно при протяженном пути потока и тонких стенках изделия.

Перепад давления, который наблюдается в течение цикла литья, приводит к тому, что усадка материала увеличивается по мере приближения к периферии формирующей полости, то есть к зоне, удаленной от места впуска. Изменение усадки материала отлитого изделия из-за перепада давления в формирующей полости может также приводить к размерной деформации и короблению изделия.

Подобные закономерности изменения усадки усложняют для конструктора алгоритм расчета и выбора размеров формообразующих деталей и элементов. Одним из способов «устранения» сложных проблем является использование многовпускowej схемы заполнения. В этом случае путь течения отдельных потоков расплава уменьшается, а давление в формирующей полости оказывается более равномерно распределен-

Влияние геометрической формы изделия



Рис. 2.69. Изменение условий охлаждения расплава по толщине изделия может быть вызвано различными скоростями охлаждения слоев, прилегающих к матрице и к пуансону. Обычно охладить пуансоны труднее, чем матрицы. Более горячая сторона изделия будет испытывать большую усадку после выталкивания изделия, что приводит к возникновению внутренних напряжений, короблению изделия

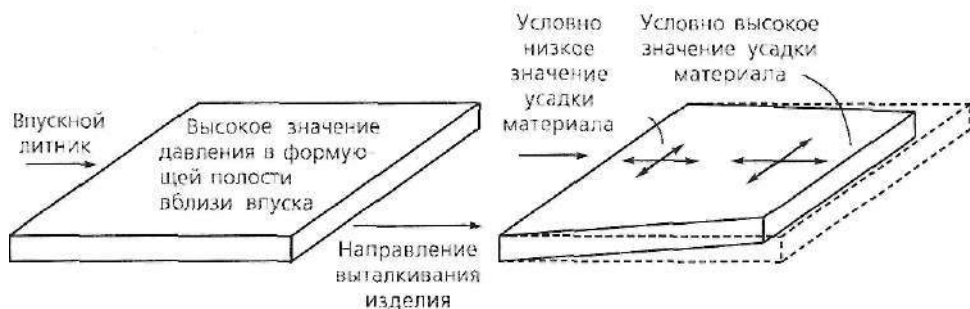


Рис. 2.70. Усадка изделия вблизи впускного литника меньше усадки в местах, до которых поток расплава доходит в последнюю очередь

ным (поэтому усадка отлитого изделия будет более равномерной), поскольку все области изделия будут находиться ближе к впуску. В качестве альтернативы указанному варианту, чтобы компенсировать различия в значениях усадки, можно уменьшить размеры матрицы (на практике такой способ применяется редко). Данные об усадке материала, которые получены при испытаниях образцов большого размера, имеющих форму диска, при четко выраженном потоке более предпочтительны для использования, чем данные, полученные по упрощенному стандартному методу *ASTM* [62]. Используя образцы больших размеров, поставщики материала имеют возможность получать с большей достоверностью значения продольной и поперечной усадки для зон, расположенных вблизи и вдали от места впуска расплава в формующую полость.

Размеры формующей полости с одним впускным литником (рис. 2.71) должны быть изменены таким образом, чтобы сечение потока в полости было бы больше, чем вблизи места впуска — это позволяет компенсировать изменения в давлении, возникающем из-за различий в усадке.

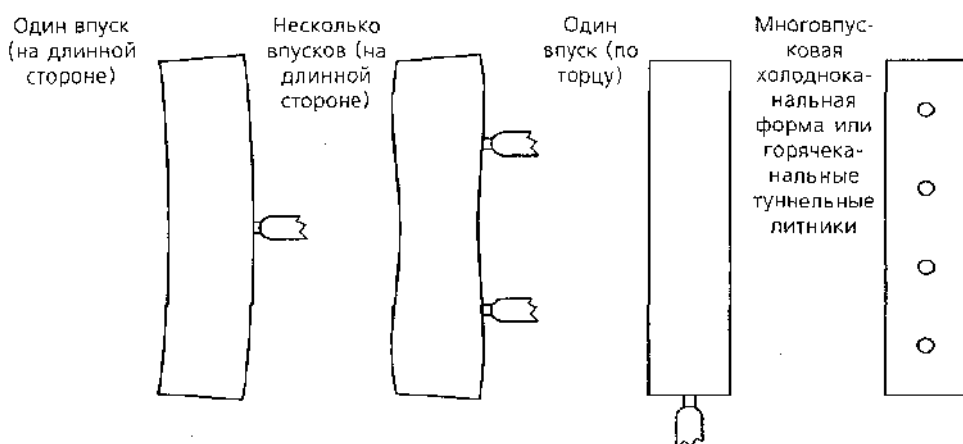


Рис. 2.71. Размеры изготовленных в литьевой форме изделия изменяются под влиянием изменения усадки — от меньшей вблизи места впуска, до большей по периферии полости. Правильная геометрическая форма изделия (без отклонений от плоскостности, коробления) может быть получена при использовании большего количества впусков, чтобы уменьшить перепад давления в формующей полости и снизить разницу в усадке материала по объему изделия

Влияние радиального потока расплава

В изделиях с центрально расположенным впускным литником происходит заполнение формующей полости потоком расплава радиального, дискового типа. В этом случае направление вдоль потока будет считаться продольным, а направление по окружности — поперечным. Если величина усадки материала в разных частях изделия будет различной, то тогда изделие, изготовленное в форме с центральным расположением впускного литника, будет оставаться плоским, но изгибаться, принимая форму купола или седла. Если отлитое изделие сохраняет свою конфигурацию,

то это означает, что либо значение усадки одинаково во всех частях изделия, либо изделие обладает достаточной жесткостью (что связано с комбинированным влиянием модуля упругости и геометрической формы), которая позволяет выдерживать возможные в нем внутренние усадочные напряжения. Однако в этом случае внутри изделия все равно сохраняются внутренние напряжения.

Если же изделие усаживается, это значит, что материал не имеет достаточной жесткости, чтобы выдерживать усадочные напряжения. Когда в результате коробления образуется купол, то это, вероятно, происходит из-за того, что фактическая усадка вдоль окружности оказывается большей, чем усадка вдоль радиуса. Коробление изделия в форме седла, как показано на рис. 2.72, может быть связано с тем, что усадка во внутренних слоях изделия больше, чем в наружных слоях, или величина усадки отлитого изделия в «радиальном» направлении больше, чем усадка на периферии вдоль «окружности» [57]. В любом случае коробление изделия может быть сведено к минимуму за счет комбинированного воздействия разных способов: «управлением» давлением в формующей полости, макромолекулярной ориентацией расплава или разным по интенсивности охлаждением.

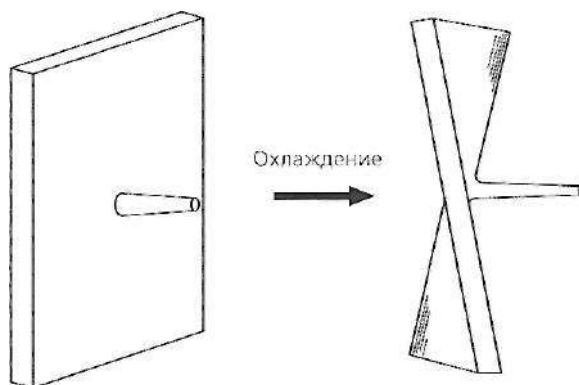


Рис. 2.72. Плоское прямоугольное изделие, изготовленное в литьевой форме с центральным расположением впускного литника, имеет разную усадку, приводящую к короблению, из-за:

- а) разности усадок в «радиальном» направлении и на периферии, в направлении по «окружности» как результат различий в структурной ориентации макромолекул;
- б) разности в усадке вдоль пути потока, возникающей из-за перепада давления;
- в) разности в длине пути потока расплава от центрального литника до короткой и длинной сторон изделия

Такие различия в усадке могут приводить к изменению конфигурации изделия: от плоской формы до формы «седла», как показано на рисунке 2.72.

Учитываемые факторы, связанные с особенностями термопластов

Все термопласты, перерабатываемые литьем под давлением, потенциально могут иметь разную усадку, что связано с их разной структурной ориентацией, отличиями в заполнении формующей полости расплавом и поведением при охлаждении. Различия

оказываются тем большими, чем больше среднее значение молекулярной массы термопласта. Различия в усадке, связанные с охлаждением, проявляются в термопластах всех типов, но наиболее они сильны в частично кристаллических материалах: в них только часть объема кристаллизуется, а остальная часть находится в аморфном состоянии. Способность частично кристаллического термопласта образовывать зоны с чисто кристаллической решеткой усиливается, если охлаждение происходит с более низкой скоростью. Таким образом, усадка частично кристаллического термопласта будет зависеть от скорости охлаждения, которая прямо влияет на степень кристаллизации материала. Соотношение скорость охлаждения/степень кристалличности влияет и на характер структуры кристаллов.

Усадка отливки из частично кристаллических термопластов происходит значительно сложнее, чем отливок из аморфных материалов, поэтому толщина изделия для первых имеет гораздо большее значение; общий тип поведения, который можно ожидать, показан на рис. 2.73. Высокие значения усадки материала в отлитом под давлением изделии можно ожидать в отливках из частично кристаллизующихся термопластов, имеющих толстые стенки — из-за необходимости в таких случаях увеличения времени охлаждения (а также времени кристаллизации). Этому обстоятельству следует уделить особое внимание при конструировании и изготовлении изделия. Например, когда применяют ребра для упрочнения плоских изделий, то обычно их толщина меньше, чем номинальная толщина стенок, на которых они находятся. Такое решение способствует уменьшению размера усадочных утяжин на противоположной ребру поверхности изделия, но замедляют скорость охлаждения, что будет приводить к короблению в направлении, перпендикулярном направлению ребра.

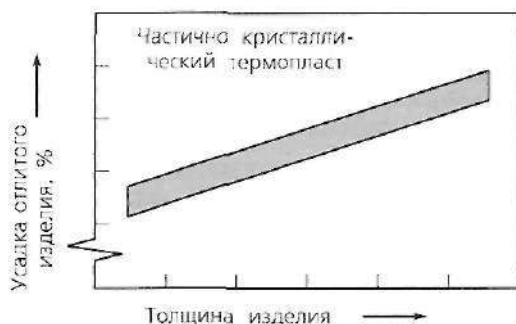


Рис. 2.73. Значения усадки частично кристаллического термопласта возрастает с увеличением толщины стенок изделия

Ориентация кристаллов, и в целом, кристаллизация, индуцированная сдвигом при течении расплава, также влияет на сложное поведение частично кристаллических термопластов (с точки зрения усадки изделия [57]).

Параметры технологического процесса, которые влияют на скорость охлаждения, будут влиять и на усадку изделия, отлитого из частично кристаллического термопласта. Параметры процесса, которые приводят к уменьшению скорости охлаждения, также будут улучшать условия кристаллизации, что позволит инженеру-технологу

регулировать в некоторых пределах усадку материала, меняя другие параметры технологического процесса, например, температуру формы. Следует заметить, что структурные изменения материала также будут влиять на усадочные, механические и другие эксплуатационные характеристики изделия (рис. 2.74).

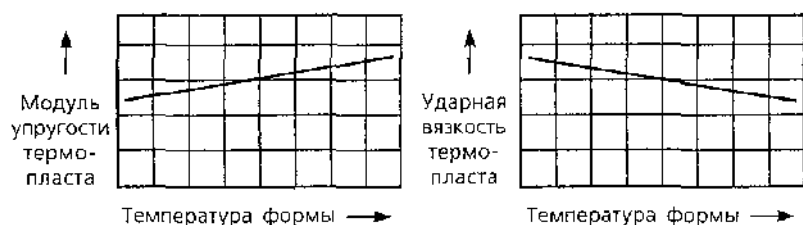


Рис. 2.74. Как усадка материала отлитого изделия, так и механические свойства частично кристаллического термопласта изменяются при изменении толщины стенок изделия и зависят от параметров, многие из которых, способствуя процессу кристаллизации, влияют на увеличение показателя жесткости изделия

В общем, величина усадки изделий из частично кристаллических термопластов без наполнителей в несколько раз больше, чем из аморфных материалов. С увеличением усадки материала повышается вероятность возникновения значительных внутренних напряжений и, следовательно, коробления. Изделие, которое изображено на рис. 2.75, имеет разнотолщинные стенки и (с большой вероятностью) будет коробиться из-за относительно толстого дна.

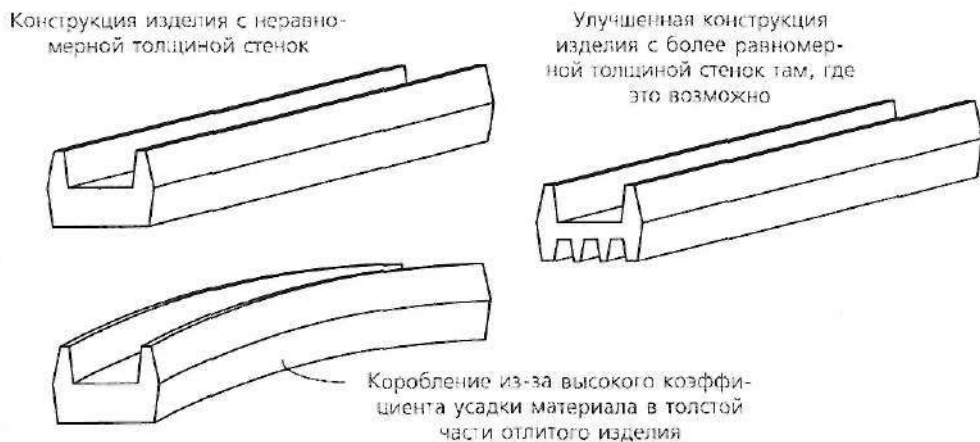


Рис. 2.75. Очень важно добиваться, чтобы в изделии была равномерная толщина стенок, особенно когда изделие изготавливается из частично кристаллических термопластов (величина и равномерность усадки зависит от величины и равномерности толщины)

Риск появления коробления может быть минимизирован с помощью (где это возможно) поднутрений в толстых зонах изделия, чтобы добиться более однородной толщины стенок и максимально однородного по объему и скорости охлаждения. Там же, где в конструкции изделия необходима разнотолщинность, надо изменить схему охлаждения формы или марку стали, из которой она изготовлена (то есть учесть теплопроводность), таким образом, чтобы добиться более равномерной скорости охлаждения.

Усадка в изделиях, отлитых из термопластов с наполнителями

Наполнители в виде волокон разной длины, чешуек или хлопьев, шариков обычно добавляются в термопласты для избирательного модифицирования их механических свойств, увеличения жесткости и сопротивления ползучести, что позволяет использовать наполненные термопласты для изделий, в которых требуется обеспечивать повышенную прочность. Большинство наполнителей являются неорганическими материалами с относительно низкими коэффициентами термического расширения. Наполнители либо не усаживаются, либо усадка в них существенно меньшая, чем у полимерной основы пластмассы, в которую они добавляются. Сыпучие и относительно мелкодисперсные наполнители в виде чешуек, хлопьев способствуют уменьшению усадки отливок из аморфных или частично кристаллических термопластов. Такое уменьшение приблизительно пропорционально концентрации наполнителей, при этом не возникает существенных проблем, связанных с негативным влиянием анизотропии усадки. Правильное введение наполнителей, которые изготавливаются из стекла или графита, обеспечивают в отливках достижение высоких эксплуатационных характеристик. Термопласты с сыпучими, мелкодисперсными наполнителями (по сравнению с коротко- или длинноволокнистыми армирующими наполнителями) существенно отличаются по показателям продольной и поперечной усадок (рис. 2.76) [70]. Анизотропная усадка

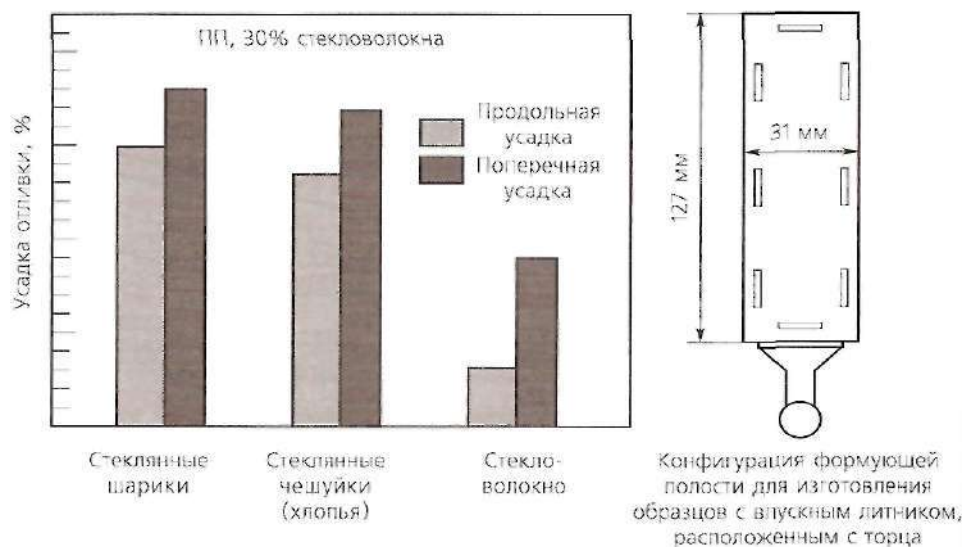


Рис. 2.76. Проблема анизотропии усадки становится особо острой для изделий из термопластов, армированных стекловолокнами, затем — стеклянными хлопьями и шариками

затрудняет конструктору литьевых форм определение соответствующих размеров формирующей полости. При этом следует помнить, что анизотропия усадки отливок зависит от характера их (волокон) ориентации. В общем, после впрыска расплава в формирующую полость волокна ориентируются таким же образом, как и «окружающие» их полимерные макромолекулы.

Причем важно иметь в виду, что именно ориентация наполнителя - армирующих волокон — «удерживает» полимерную систему — макромолекулярную структуру — в нужном состоянии при заполнении расплавом формирующей полости и охлаждении его в ней. Ориентация армирующих волокон зависит от продольного потока. Скорость заполнения формирующей полости, вязкость расплава и схема расположения мест впуска имеет особо большое значение для литья под давлением термопластов, армированных волокнами [71,72].

Волокна, как отмечалось, ориентируются в направлении перемещения потока расплава и ограничивают усадку в этом же направлении. На рис. 2.77 показана типичная зависимость усадки отливки из частично кристаллического термопласта (ПФГ) от концентрации наполнителя (армирующего стекловолокна).

Продольная усадка несколько больше поперечной, и оба значения относительно велики (от 1,5 до 2,0 %). Для отливок из частично кристаллических наполненных термопластов разница между продольной и поперечной усадками напрямую зависит от концентрации наполнителей — армирующих волокон. Хотя эта разница более заметна для частично кристаллических термопластов, но она может возникать и в отливках из

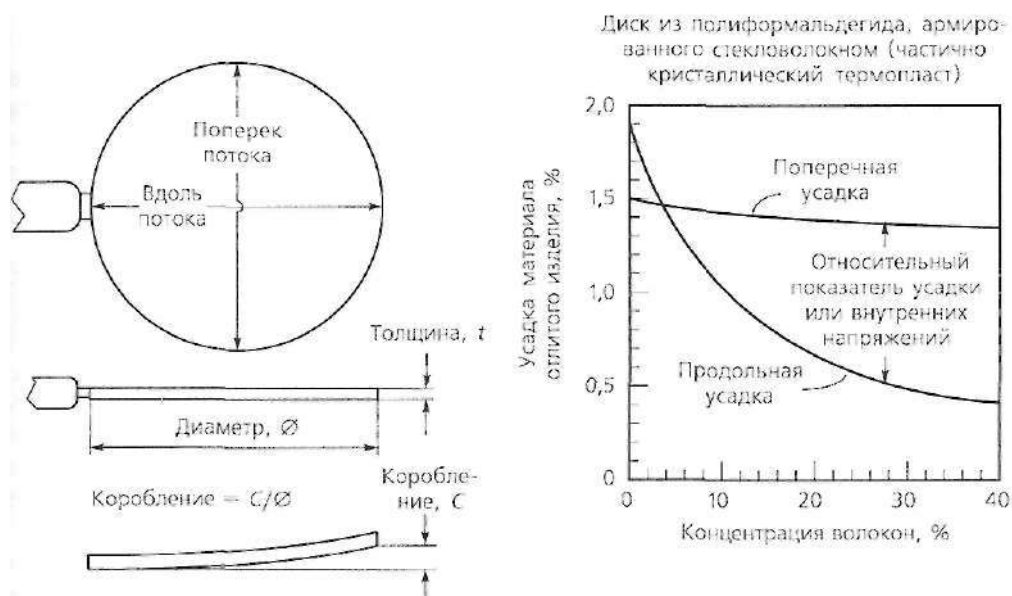


Рис. 2.77. Разница в усадке может наблюдаться в отливках из частично кристаллических термопластов, армированных стекловолокнами. Ориентация волокон будет снижать продольную усадку, в то время как поперечная — оставаться относительно высокой

аморфных армированных термопластов [12]. Конструкторы должны учитывать склонность к анизотропии усадки в отливках из термопластов, армированных волокнами, когда они выбирают конкретные материалы для изготовления изделия.

Усадка частично кристаллических термопластов, армированных стекловолокнами, менее предсказуема, если изделие имеет разную толщину стенок. Как было упомянуто ранее, чем больше времени требуется для охлаждения изделия, тем более благоприятными оказываются условия для роста кристаллов, а это, в свою очередь, приводит к большей анизотропии свойств отливки. Разнотолщинность влияет на величину продольной и поперечной усадок (рис. 2.78) [73]. Следует заметить, что

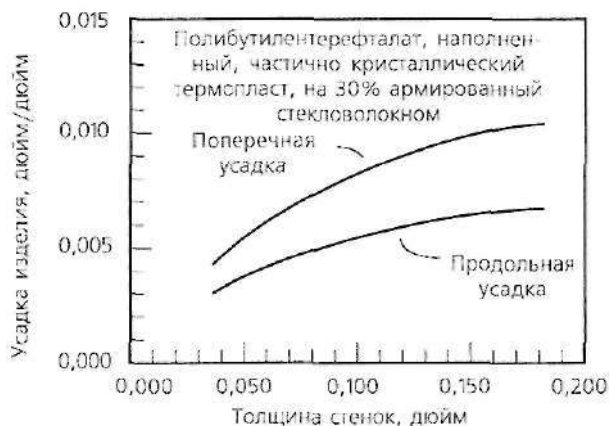


Рис. 2.78. Усадка материала отлитого изделия из армированного кристаллического полимера (например, армированного стекловолокном ПБТ) меняется с изменением направления потока (вдоль или поперек) и толщины изделия

усадка отливок из измельченных и повторно переработанных термопластов, армированных волокнами, отличается от усадки исходных (новых) материалов из-за иной (в результате дробления) структуры и ориентации волокон [63].

Существует несколько способов, которые позволяют уменьшить вероятность коробления, возникающего из-за разницы поперечной и продольной в усадках отливок из термопластов, армированных волокнами. Одним из наиболее эффективных является использование так называемых гибридных материалов, содержащих наполнители из стекловолокон, хлопьев, а также других сыпучих минеральных наполнителей. Эти гибридные материалы дают возможность добиться у изделий уникального — по сравнению с другими термопластами — баланса механических, эксплуатационных параметров и более изотропной усадки, поэтому они широко применяются, когда требуются изделия с заданными «жесткими» допусками на размеры [63,72].

Упрочняющие волоконные наполнители с некруглыми поперечными сечениями волокон оказываются полезными для «борьбы» с короблением отливок. Использование стекловолокна с двухдольным поперечным сечением в частично кристаллических термопластах, может уменьшить коробление на 30-40 % по сравнению с волокнами круглого поперечного сечения (при сохранении тех же механических, эксплуатационных

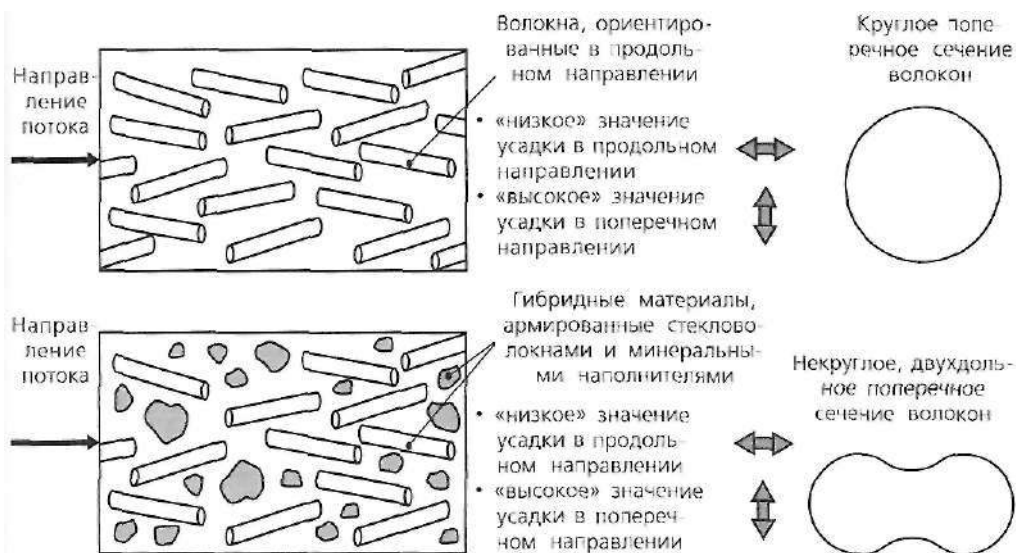


Рис. 2.79. Гибридные термопласты с наполнителями в виде упрочняющих волокон и хлопьев, имеют более изотропную усадку (по сравнению со стандартными марками ненаполненных термопластов). Использование волокон с некруглыми, двухдольными поперечными сечениями способствуют возникновению в отливках более изотропной усадке по сравнению с круглым поперечным сечением волокон

характеристик) [74]. Такие конструктивные особенности изделия, как, например, ребра жесткости, также могут способствовать уменьшению коробления, и при применении термопластов, армированных волокнами, и при литье под давлением вспениваемых термопластов. Следует также использовать минимизирующую ориентацию волокон схему расположения впускных литников. Изделия, которые изготавливаются в формах с большим количеством мест впуска, расположенных равномерно на поверхности изделия, будут иметь уменьшенную длину пути потоков и будут заполняться, прежде всего, с помощью радиальных потоков, а это, в свою очередь, гарантирует более равномерное уплотнение материала.

Во всех случаях при конструировании и подготовке производства изделий из термопластов, армированных волокнами, когда требуется выполнение жестких допусков на размеры изделий, рекомендуется применять компьютерный анализ и моделирование процесса заполнения формующей полости расплавом. Компьютерный анализ дает подробную информацию о том, какова будет ориентация волокон во время заполнения, и прогнозы в отношении усадки и коробления.

2.5. Охлаждение и затвердевание

Длительность цикла литья под давлением термопластов зависит от времени смыкания формы, заполнения формующей полости расплавом, охлаждения расплава, времени размыкания формы и извлечения готового изделия. Время охлаждения —

доминирующая составляющая общего цикла литья под давлением. По этому параметру определяется скорость изготовления изделий. Отливка в форме должна быть охлаждена до такой температуры, чтобы она не могла деформироваться под усилием ее выталкивания. Температура изделия должна быть такой, чтобы релаксация под действием остаточных напряжений не привела к короблению или деформации после выталкивания. Скорость охлаждения и затвердевания отливки зависит от большого количества факторов: конструкции изделия, оснастки, материала и технологических параметров процесса переработки. Важнейшими факторами, влияющими на установление оптимальных значений скорости охлаждения являются: теплоизоляционные свойства сталей, применяемые для изготовления формы; расположение и размеры поперечных сечений каналов системы охлаждения; температура расплава и оформляющих поверхностей матрицы и пуансона. Из-за многообразия параметров и различий их вклада во время охлаждения отливок в форме заранее давать точные оценки для конкретной конструкции изделия затруднительно. Но можно (и нужно) сделать ориентировочную оценку, которая очень полезна для конструкторов литых под давлением изделий при технико-экономической оценке рентабельности производства. Конструктор, например, может определить, как предлагаемое им изменение толщины стенок изделия или предлагаемая замена марок материала будут влиять на изменения времени охлаждения и, соответственно, определить себестоимость готовой продукции.

Самая точная оценка времени охлаждения отливки достигается только при компьютерном анализе. Такой подход позволяет совместно изучать особенности всех этапов процесса заполнения формы и ее охлаждения. Такого рода анализ не только дает возможность получить полную информацию, необходимую для расчета времени охлаждения, но и, что также важно, позволяет оптимизировать систему охлаждения формы таким образом, чтобы обеспечить сбалансированное и эффективное охлаждение всех зон отливки. Без такого анализа может случиться так, что отдельные области формирующей полости формы будут иметь более высокую температуру, чем другие, а из-за этого, в свою очередь, потребуются увеличение цикла литья, а также могут возникнуть условия для неравномерной усадки и коробления отливки. Конструктор может получить приближенную оценку времени охлаждения на основании решения уравнений распространения тепла в неравновесной среде для отливки стандартной геометрической формы. Многие изделия условно можно моделировать как пластины, охлаждающиеся в основном за счет теплопереноса через относительно большие (верхнюю и нижнюю) поверхности. Поскольку уравнения, описывающие процесс охлаждения пластины, получены с допущением, что длина и ширина пластины бесконечны, если длина и ширина пластины больше толщины в 10-15 раз, то ошибка расчетов будет относительно небольшой, так как количество тепла, которое рассеивается через такие боковые поверхности изделия, относительно невелико. Аналогично описывают процесс охлаждения отливок цилиндрической формы, у которых высота цилиндра в 10-15 раз больше диаметра. При таком соотношении ошибка в расчетах будет несущественной [2, 75, 76]. Уравнения, представленные на рис. 2.80, предполагают, что температура расплава, поступающего в формирующую полость, одинакова по всему объему, а плоская отливка равномерно охлаждается с обеих сторон (цилиндрическая — по всей боковой поверхности). Кроме того, считается, что система охлаждения формы в состоянии отводить

Пластина

$$t_c = \frac{h^2}{\alpha \pi^2} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \right], \quad T_e \text{ здесь температура по оси образца} \quad (2.16)$$

$$t_a = \frac{h^2}{\alpha \pi^2} \ln \left[\frac{8}{\pi} \left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \right], \quad T_e \text{ здесь средняя температура по объему образца} \quad (2.17)$$

Цилиндр

$$t_c = 0,173 \frac{R^2}{\alpha} \ln \left[1,6023 \left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \right], \quad T_e \text{ здесь температура по оси образца} \quad (2.18)$$

$$t_a = 0,173 \frac{R^2}{\alpha} \ln \left[0,6916 \left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \right], \quad T_e \text{ здесь средняя температура по объему образца} \quad (2.19)$$

t_c — время, необходимое для того, чтобы зоны отливки по ее оси симметрии, охладилась до температуры выталкивания из формы, с;
 t_a — время, необходимое для того, чтобы средняя температура отливки сравнялась с температурой выталкивания из формы, с;
 h — толщина отливки (пластины), м;
 R — радиус отливки (цилиндра), м;
 T_m — температура расплава, при которой начинается охлаждение отливки, °С;
 T_w — температура матрицы/пуансона во время охлаждения в замкнутой литейной форме, °С;
 T_e — температура выталкивания отливки из формы, °С;
 α — температуропроводность термопласта $k/\rho c$, $\text{м}^2/\text{с}$;
 k — теплопроводность термопласта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 c — удельная теплоемкость термопласта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 ρ — плотность термопласта, $\text{кг}/\text{м}^3$.

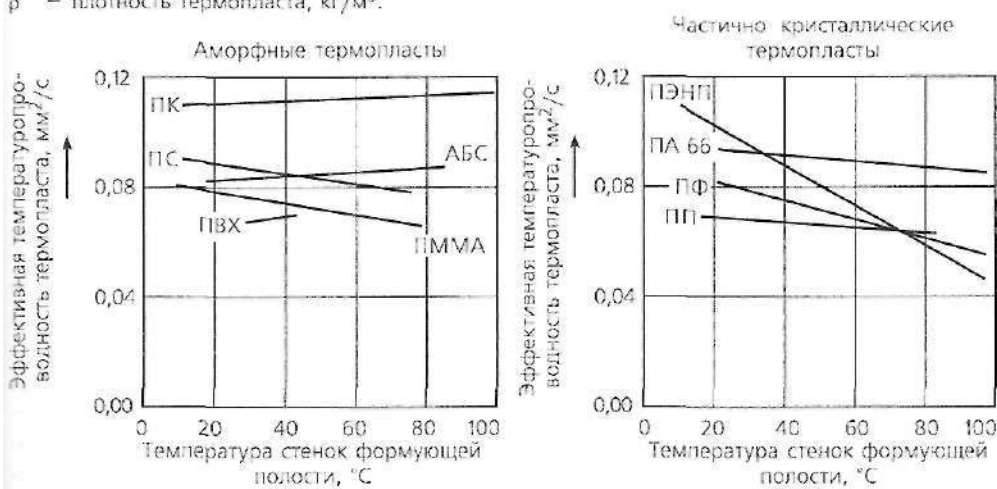


Рис. 2.80. Конструкторы могут использовать уравнения¹, описывающие зависимости для определения времени охлаждения (и общего цикла литья под давлением), чтобы оценивать возможность для измерения этого времени при изменении толщины отливок или при выборе иных марок термопластов

¹ При использовании формул (2.16)–(2.19) и данных по графикам на рис. 2.80 следует иметь в виду, что авторские обозначения и размерности воспроизведены без какой-либо корректировки. — Прим. науч. ред.

тепло от формообразующей поверхности (от металла, из которого изготовлены матрица и пуансон) с той же скоростью, с какой оно (тепло) поступает с расплавом в формующую полость. На практике температура формообразующей поверхности формы всегда будет поддерживаться на несколько более высоком, чем среднее значение, уровне. Время, необходимое для того, чтобы в центре отливки была достигнута температура, при которой она выталкивается из формы, и время, необходимое для выравнивания температуры до средней температуры отливки, определяют на основании данных, приведенных на рис. 2.80 как для отливки — пластины, так и для отливки — цилиндра [75].

Чтобы решить уравнения, приведенные на рис. 2.80, конструктор должен задать определенное количество параметров. Толщина или радиус изделия обычно известны, или конструктор дает рациональное соотношение между толщиной отливки и временем ее охлаждения. Стандартное решение предполагает использовать для расчетов максимальное значение толщины в разнотолщинных изделиях, поскольку соответствующая толщина потребует максимального же времени охлаждения.

Значения температуры расплава и формы, используемые в расчетах, должны быть выбраны близкими к ожидаемым в процессе производства. Лучше провести несколько серий расчетов времени охлаждения, чтобы охватить все возможные значения, рекомендуемые для переработки данного материала. Температура извлекаемого изделия должна находиться в диапазоне между температурой расплава и температурой стенок формующей полости. Изделие должно быть охлаждено до температуры, при которой оно в состоянии выдержать воздействие толкателей и сохранить неизменной свою форму после извлечения из формы. В качестве «индикатора» при определении максимально допустимой температуры выталкивания используют температуру стеклования (для аморфных термопластов), при которой происходит деформация под действием заданной нагрузки [11] или температуру размягчения по Вика [78]. Такие тесты позволяют установить температурный диапазон, в котором термопласт переходит из твердого состояния (когда он выдерживает, в частности, воздействие толкателей) в высокоэластическое состояние (близкое по свойствам к мягкой коже). При этом расчет охлаждения производится в обратном порядке, то есть осуществляется поиск температуры, при котором материал переходит из высокоэластического состояния в твердое. Температура размягчения по Вика более предпочтительна для предварительной оценки максимально допустимой температуры выталкивания изделия (и для расчета времени охлаждения изделия в форме). Тест по Вика определяет температуру, при которой плоский индикатор (стержень) проникает в полученный литьем под давлением контрольный образец. При этом считается, что он аналогичен эффекту воздействия толкателя на отливку. В любом случае (при любом температурном «индикаторе») важно учитывать градиент температуры по толщине изделия (по мере охлаждения). Изначально предполагается, что температура расплава равномерно распределена по всему объему, и именно она (соответствующее ее значение) выбирается для расчета. Если ждать достаточно долго, то все изделие, в конечном счете, охладится до температуры стенок формующей полости. На практике изделия выталкиваются задолго до того, как по всему их объему температура станет равной температуре формы. Уравнения (2.16) и (2.18) позволяют рассчитать температуру, которую должна достичь центральная зона отливки в момент ее выталкивания,

а уравнения (2.17) и (2.19) — время, за которое средняя температура отливки станет равной заданной температуре выталкивания отливки из формы.

Теплофизические свойства материала отливки оказывают определенное влияние на все тепловые процессы и связанные с ними технологические параметры, в том числе на времена охлаждения отливки в форме. Для расчета времени охлаждения необходимо знание температуропроводности материала. К сожалению, все свойства материалов, связанные с температуропроводностью, а именно: теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость являются функциями и температуры, и давления (то есть существенно изменяются в процессе литья под давлением). Это особенно ярко проявляется у таких частично кристаллических термопластов, как ПА и ПП, которые при охлаждении претерпевают значительные фазовые изменения. Если известны средние значения температуропроводности материала, то можно приблизительно оценить времена охлаждения. Эффективные значения температуропроводности (см. рис. 2.80) для ненаполненных частично кристаллических термопластов, могут использоваться при расчете времен охлаждения отливки в форме [75].

Наконец, следует заметить, что в уравнениях (2.16) и (2.19) толщина плоской отливки и радиус цилиндрической отливки имеют показатель степени, равный 2. От толщины отливки зависит ее масса, то есть необходимое для литья под давлением количество материала (такая зависимость линейна), но влияние толщины на величину времени цикла более сложно: даже небольшое уменьшение толщины изделия может привести к существенному уменьшению времени цикла литья. С другой стороны, если конструктор увеличил толщину стенки, например, в два раза, то, теоретически, время охлаждения отливки до температуры ее выталкивания должно увеличиться в четыре раза. На практике оно возрастет на несколько меньшую величину, так как более толстые изделия обычно значительно быстрее, еще до затвердевания центра отливки, приобретают жесткость, необходимую для безопасного выталкивания из формы. Важно, чтобы при выборе номинальной толщины отливки конструктор принимал во внимание указанное выше.

2.6. Выталкивание¹ изделия из формы

2.6.1. Общие положения

Последняя стадия процесса литья под давлением — выталкивание изделия из формы. Идеально, если извлечение отлитого изделия происходит без его повреждения или деформации. Конструктор литейной формы несет, как правило, основную ответственность за выбор системы выталкивания, которая наилучшим образом соответствовала бы геометрическим особенностям конкретного изделия, при этом он должен представлять все трудности, которые могут возникнуть при выталкивании и предупреждать их появление. Изделие из термопластов должно быть сконструировано с учетом

¹ Выталкивание — это общее понятие; буквально выталкивание относится к удалению изделия из матрицы (гнезда, формирующей полости); с пуансона изделие сталкивается. Возможно применение технологически «обезличенных» терминов — извлечение (для знаков, вставок), объем, свинчивание (резьбовых изделий), удаление и др. — *Прим. науч. ред.*

этого, для чего необходим тесный контакт и взаимные консультации конструкторов изделия и литевых форм уже на ранних этапах разработки изделия. Конструктор литевой формы может дать консультацию по специфическим проблемам выталкивания изделия и желательных, в связи с ними, изменениях конструкции. К факторам, которые влияют на простоту выталкивания изделий и, соответственно, стоимость формы, относятся:

- углы уклона или конусность;
- качество обработки формообразующих поверхностей формы;
- требования к внешнему виду изделия;
- наличие поднутрений или отверстий в изделии;
- выталкивание — из стационарной или подвижной полуформы;
- характер расположения изделия — в матрице или на пуансоне;
- расположение плоскости (плоскостей) разъема формы.

Почти все из перечисленных факторов связаны с конкретной конфигурацией изделия. Однако даже для изделий, имеющих ровную поверхность и относительно простую геометрию, система выталкивания может оказаться дорогой (относительно стоимости всей литевой формы), если изделие не сконструировано заранее с учетом его будущего выталкивания.

2.6.2. Углы уклона

Углы уклона поверхностей формующей полости

Углы уклона (или конусность) поверхностей обычно назначаются для облегчения выталкивания практически любой отливки, когда ее протяженность в направлении выталкивания из формы достаточно большая. Наиболее распространенным вариантом схемы конструкции формы является расположение матрицы в стационарной полуформе, а пуансона — в подвижной полуформе. В большинстве случаев при размыкании формы изделие остается на пуансоне:

1) благодаря усадке материала изделия возникает значительное контактное давление на пуансон, а также силы трения между изделием и поверхностью пуансона;

2) из-за неравномерного охлаждения изделия по толщине возникают усадочные напряжения, которые стремятся «оторвать» изделие от стенок матрицы.

Следует заметить, что в конкретных формах поверхность контакта изделия и матрицы может быть больше, чем изделия и пуансона, однако в первом случае возникающее давление, как правило, будет меньшим из-за усадки изделия, направленной «от стенок». Углы уклона принимают равными от долей до нескольких градусов. Их следует назначать с учетом глубины формующей полости, усадки и жесткости материала изделия, качества (шероховатости) поверхности формообразующих деталей литевой формы, смазки на поверхности. С помощью углов уклона поверхностей, а также знаков, установленных в матрице и в формующихся поднутрениях, как правило, облегчается их (знаков) удаление до полного выталкивания изделия.

В принципе, изделия могут изготавливаться и без углов уклона (с «нулевым уклоном»), но тогда приходится применять, например, формы с раздвижными полуматрицами, чтобы при их размыкании отделить изделие от матрицы.

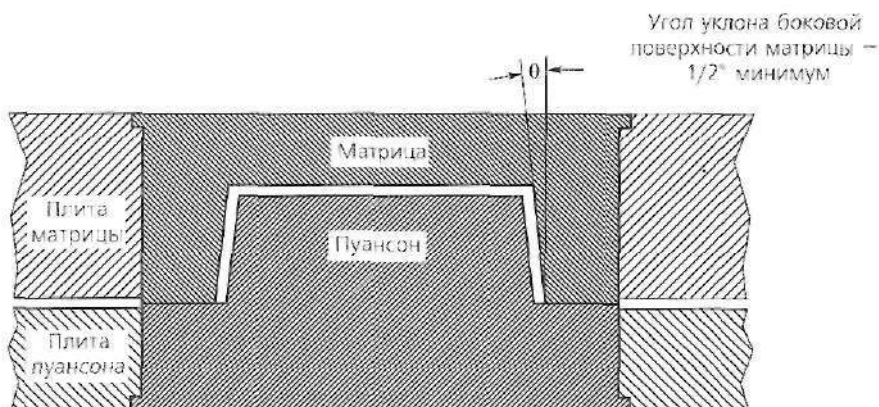
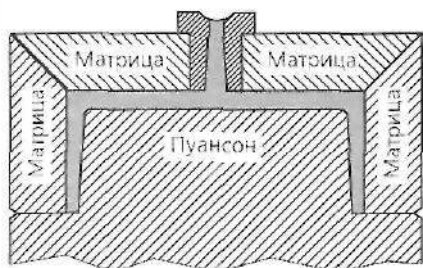


Рис. 2.81. Углы уклона боковых поверхностей матрицы облегчают выталкивание изделия из формирующей полости после размыкания формы, а углы уклона пуансона способствуют облегченному «сталкиванию» изделия с пуансона

Изделия большой толщины без углов уклона боковых поверхностей (с «нулевым уклоном матрицы») обычно требуют применения более сложных форм



Боковое перемещение формообразующих деталей необходимо, чтобы упростить выталкивание изделия и предохранить от повреждений поверхности изделия и формы

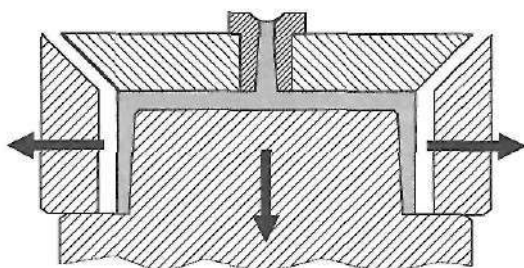


Рис. 2.82. Изделия могут изготавливаться без уклонов поверхностей (при «нулевом уклоне»), на соответствующих формообразующих поверхностях, но в таких случаях приходится применять, например, формы с раздвижными полуматрицами, чтобы при размыкании отделить изделие от матрицы

Разъемная матрица позволяет размыкать форму с меньшим усилием, благодаря чему снижается вероятность «залипания» изделия в матрице, а также повреждения и образования задиров поверхностей формы из-за трения. С помощью разъемных форм, узлы которых могут свободно перемещаться на достаточно большое расстояние, улучшается возможность получать текстурированные поверхности, отверстия и поднутрения. Однако разъемные формы значительно дороже «обычных»: из-за дополнительных плоскостей разбега в них может образовываться больше облоя, заметного на поверхностях изделия.

Углы уклона пуансона

После размыкания формы и до окончательного выталкивания изделия оно должно быть отделено от пуансона. Изделия из термопластов имеют тенденцию плотно усаживаться на пуансоне, и необходимы значительные усилия, чтобы их «столкнуть». Эти усилия требуются приложить в начальный момент отделения изделия от поверхности пуансона. Величина усилия «сталкивания» зависит от таких факторов, как усадка материала и его модуль упругости, коэффициент трения пары металл-термопласт, шероховатость поверхности пуансона и угол уклона поверхностей. Как уже

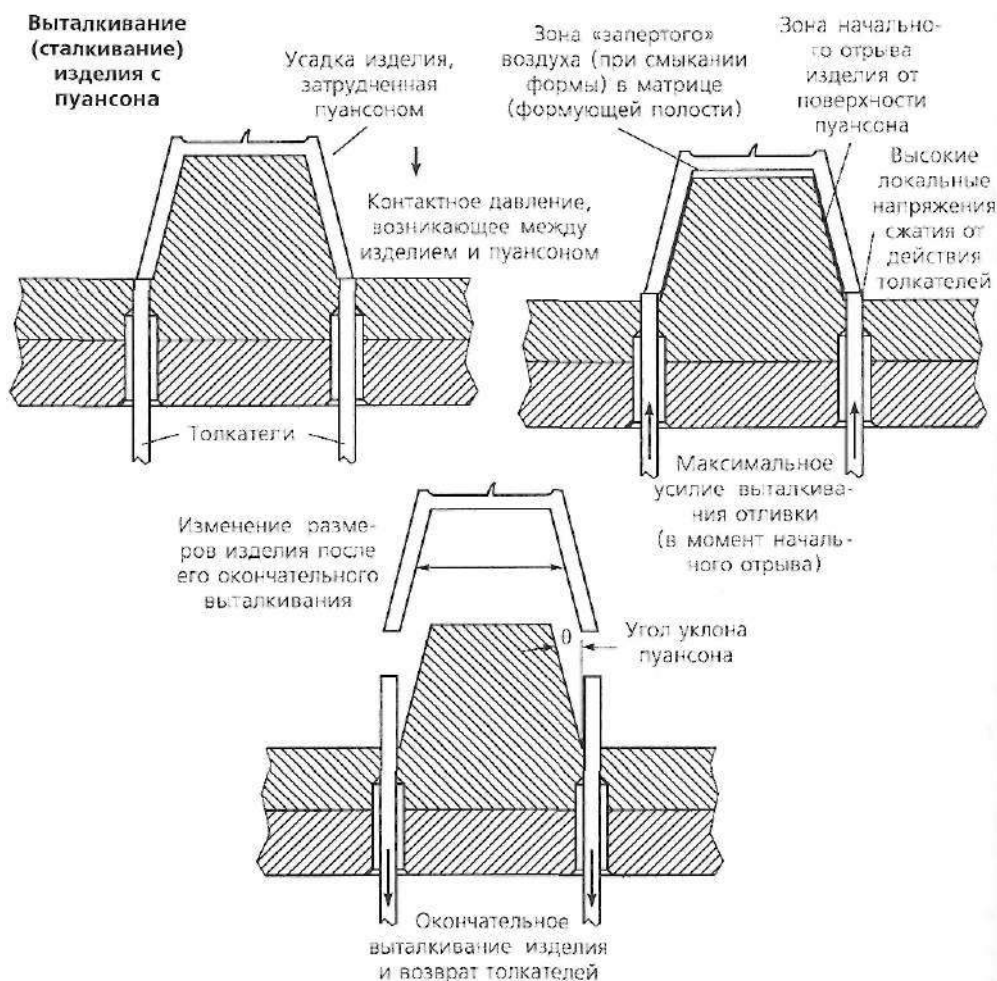


Рис. 2.83. После размыкания формы изделие должно быть отделено от пуансона. Усилие, необходимое для сталкивания его с пуансона, зависит от комплексного влияния факторов: усадки материала, состояния и особенностей боковых поверхностей, в т. ч. наличия канавок-поднутрений; количества «запертого» воздуха в формирующей полости

отмечалось, изделия «с нулевыми углами уклона» выталкивать (сталкивать) достаточно трудно, для этого необходимо прилагать значительные усилия до тех пор, пока не прекратится контакт изделия с пуансоном. Углы уклона от $1/4^\circ$ до 2° обычно назначаются для пуансонов, исходя из тех же соображений, что и для полостей. Большие углы уклона облегчают выталкивание, но существенно влияют на форму (конусообразность) изделия; позволяют снизить величину начального усилия (усилия отрыва) и поэтому упрощают общую конструкцию системы выталкивания, что, в свою очередь, может повлиять на выбор более экономичного варианта системы охлаждения и всего процесса литья под давлением.

Если для выталкивания конкретного изделия требуются небольшие усилия, то это дает возможность извлечь изделие, даже если оно «мягкое»: нет опасности его деформации, можно равномерно распределить по поверхности изделия прикладываемое усилие. Ей же более важно, чтобы углы уклона приводили к уменьшению величины контактной поверхности изделия с пуансоном, после первоначального отрыва и в результате — к быстрому уменьшению усилий выталкивания. Уменьшение контактного давления одновременно способствует проникновению воздуха, обдувающего пуансон, а это позволяет компенсировать влияние «вакуумных» эффектов в зоне контакта, которые не только затрудняют выталкивание изделия, но и могут повредить его. Для сталкивания изделий очень больших размеров и толщины применяют специальные воздушные клапаны или вентиляционные шпильки, чтобы с их помощью устранить вакуум, и, после первоначального отрыва, струей воздуха отделить изделие от пуансона. В большинстве случаев углы уклонов пуансонов и матрицы параллельны; это рационально, поскольку при этом изделия получаются равнотолщинными.

Установлено, что чем угол уклона больше, тем усилия, необходимые для выталкивания изделия, меньше. На рис. 2.84 приведены результаты экспериментов по оценке влияния угла уклона на усилие сталкивания отливок из термопластов — ПЭВП

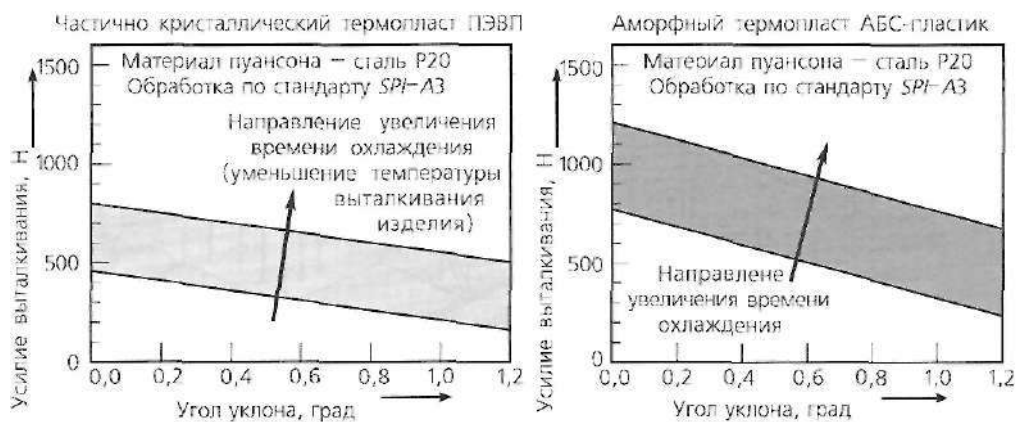


Рис. 2.84. Экспериментальные результаты определения величины усилия сталкивания изделия с пуансона. Эти усилия уменьшаются с увеличением угла уклона. Наличие угла уклона уменьшает риск образования задигов и абразивного повреждения поверхности пуансона

и АБС-пластика. В обоих случаях, повышение угла уклона на одну и ту же величину приводит к значительному уменьшению усилий, затрачиваемых на выталкивания. Причем для отливок из АБС-пластика усилия всегда выше, чем для ПЭВП, что связано, видимо, с различиями в усадках материалов.

Углы уклона оказывают существенное влияние на форму изделия. Это может привести к разногласиям между конструктором изделия и конструктором литейной формы. Ребра, бобышки, поднутрения должны иметь углы уклона; усиливающие ребра имеют уклоны с двух сторон. Положительный эффект, возникающий при этом, относится к уменьшению усилия выталкивания, но само ребро в формирующей полости труднее наполнить расплавом, а конструктивно оно оказывается менее упрочненным. Практически при выборе углов уклона ребер конструктор вынужден решать компромиссную задачу — облегчить усилия выталкивания изделия без существенной потери его прочностных свойств. Поскольку усилия выталкивания для ребристых поверхностей с углами уклона оказываются меньшими, уменьшается и площадь поверхности, на которую воздействует каждый толкатель. При этом, однако, сохраняется опасность хрупкого разрушения толкателя, а маленькая площадь контакта с ребром будет приводить к такому увеличению локальных усилий сжатия, что толкатели могут даже проникать в тело ребра. Толкатели с прямоугольным и поперечным сечением («лезвия») обеспечивают наилучшее выталкивание изделий с ребрами, но они относительно дороги в сравнении с общей стоимостью литейной формы.

Приливы под толкатели, аналогичные приведенным на рис. 2.85 и 2.86, используют при выталкивании изделий, состоящих из секций с внутренними стенками. Приливы под толкатели обычно представляют собой сплошные круглые бобышки в ребрах. Приливы под толкатели имеют относительно большую поверхность, на которую может воздействовать толкатель. При этом приливы не оказывают существенного влияния на величину усадочных утяжин, которые образуются на поверхности, противоположной той, на которой находится ребро, поскольку толщина в основании конструктивного элемента равна или близка толщине самого ребра.

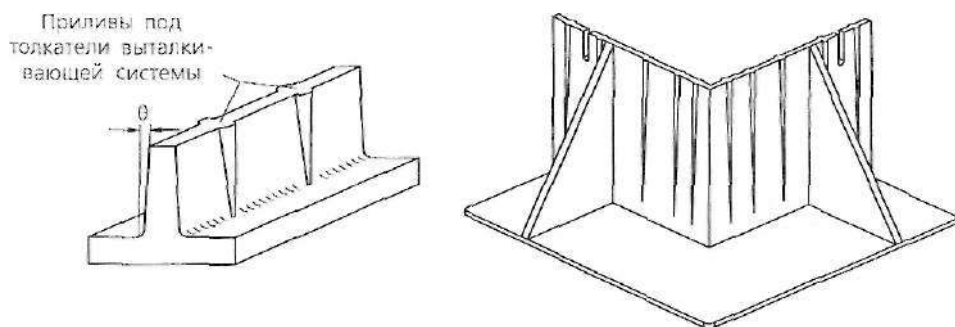


Рис. 2.85. Обычно конструируют изделия с приливами под толкатели выталкивающей системы, увеличивая, таким образом, поверхность, на которую каждый толкатель оказывает давление. Это уменьшает величину локальных усилий сжатия, создаваемых системой выталкивания, и снижает вероятность риска образования заметных следов от толкателей на поверхности изделия

Следует избегать неопределенности при расчете ребер или других конструктивных элементов литого под давлением изделия; следует осторожно использовать такие общие характеристики, как «минимум», «максимум», «номинальный» и «допустимый». На рис. 2.86 показано ребро с номинальной толщиной стенок 0,060 дюйма и допустимым уклоном 2° [80].

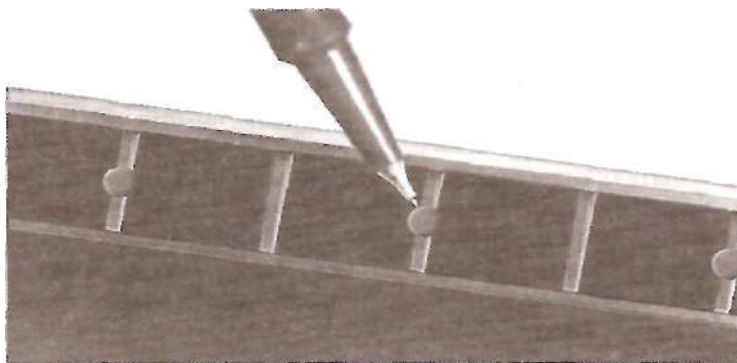


Рис. 2.86. Часть изделия, для выталкивания которого используются приливы под толкатели в выталкивающей системе

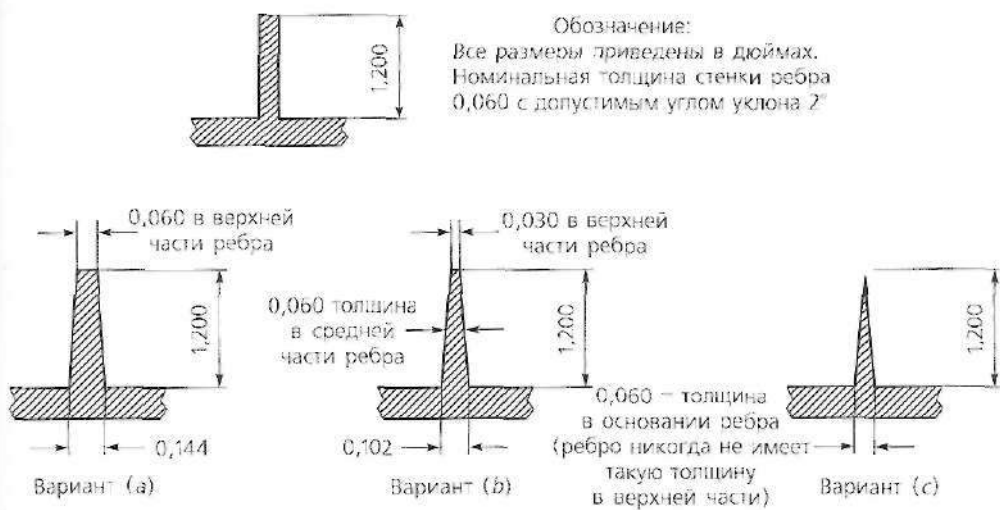


Рис. 2.87. Толщина ребра и угол уклона должны быть точно указаны на чертеже изделия, чтобы избежать неверной интерпретации таких сомнительных характеристик, как «максимальная» или «минимальная» величина и проч.

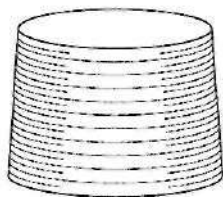
Использование компьютерных баз данных трехмерной каркасной и твердотельной моделей эффективно устраняет неопределенности в конструкциях такого типа.

2.6.3. Влияние качества поверхностей матрицы и пуансона

Шероховатость поверхности

Качество обработки поверхностей матрицы и пуансона значительно влияет на особенности выталкивания конкретного изделия. Марка стали, из которой изготовлены формообразующие детали литейной формы, и тип поверхностей оказывают существенное влияние на извлечение изделия. Шлифование матрицы или пуансона в направлении уклона (то есть параллельно направлению выталкивания изделия) более предпочтительно при большой глубине матрицы, когда угол уклона невелик или вообще отсутствует. Это существенное замечание, потому что на производстве намного легче отшлифовать пуансон или матрицу в направлении, перпендикулярном направлению выталкивателя. Хотя цилиндрический пуансон (рис. 2.88) легче всего шлифовать на токарном станке, очень важно, чтобы окончательное шлифование было сделано по линии уклона поверхности, чтобы улучшить условия выталкивания. Сходные проблемы существуют для ребер, которые, как правило (в зависимости от расположения) гораздо легче полировать вдоль, то есть в направлении, перпендикулярном направлению выталкивания изделия. Шлифование наклонных поверхностей (вдоль линии уклона) позволяет уменьшить усилия выталкивания изделий, даже если на этих поверхностях расположены поднутрения.

Шлифование в направлении,
перпендикулярном направлению
выталкивания



Шлифование наклонных поверхностей
(вдоль линии уклона) способствует
уменьшению усилия выталкивания

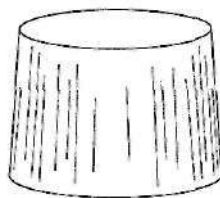


Рис. 2.88. Матрицы и пуансоны должны шлифовать по наклонным поверхностям (вдоль линии уклона), что способствует уменьшению усилия, необходимого для выталкивания изделия, несмотря на наличие поднутрений (на рисунке слева - кольцеобразные поднутрения), шлифовать которые необходимо в направлении, перпендикулярном направлению выталкивания

Эксперименты, результаты которых приведены на рис. 2.89, показывают, что усилия выталкивания образца из ПЭВП существенно меньше для случая применения пуансона, отшлифованного в направлении, перпендикулярном направлению выталкивания [79]. Усилия выталкивания уменьшаются по мере возрастания температуры отливки, при которой выталкивание происходит (в том числе при ускоренном выталкивании). Это может быть связано с влиянием усадки и модуля упругости материала в момент выталкивания (при соответствующей температуре) что, в свою очередь, уменьшает контактное давление между изделием и пуансоном.

Шероховатость поверхностей пуансона и матрицы также являются важными факторами, влияющими на параметры выталкивания изделия. Степени шероховатости

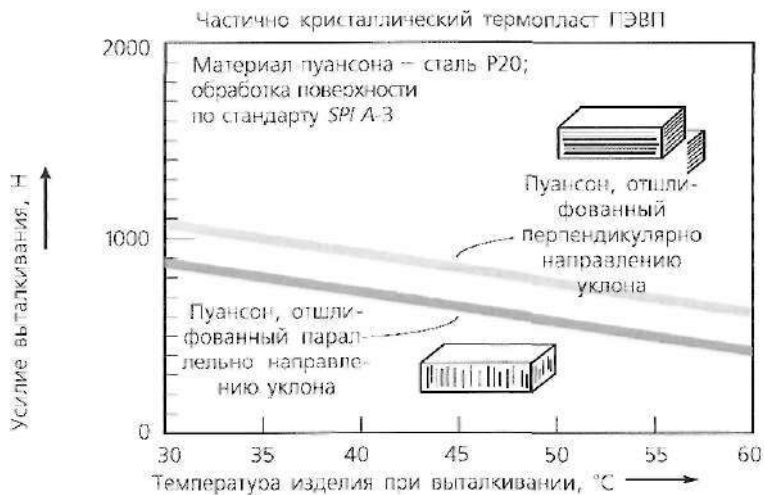


Рис. 2.89. Экспериментальные результаты показали, что шлифование наклонных поверхностей приводит к уменьшению усилия выталкивания изделия

и топография обработанных поверхностей определяются в соответствии с принятой новой классификацией. Предположительно, это может быть следствием создания, например, лучших условий вентиляции формирующей полости. Поверхности изделий копируют поверхность деталей формирующей полости; их шероховатость по стандарту SPI - от Л1 до Ш (см. табл. 5.2 и 5.3, стр. 340,341).

Данная классификация (включает 12 степеней) заменяет старые стандарты SPE/SPI, имевшие обозначения от #1 до #6¹. Шероховатость поверхностей металлических деталей измеряется с помощью нрофилометра, который использует щуп и «анализатор»,

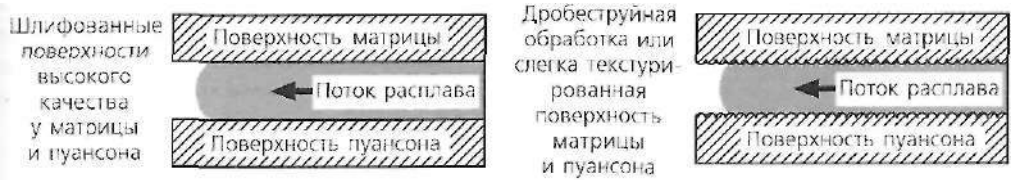


Рис. 2.90. Высокое качество шлифования поверхностей облегчает выталкивание изделий из формирующей полости: чем оно выше, тем меньше на поверхности изделий следов от механической обработки (своеобразных мини-поднутрсний). В других случаях, например, при литье под давлением изделий из «мягких» термопластов, или, например, эластомеров, слегка текстурированные поверхности обработанные специально металлических деталей формы, подвергнутые дробеструйной обработке, копируясь на изделия, не будут создавать затруднений при выталкивании

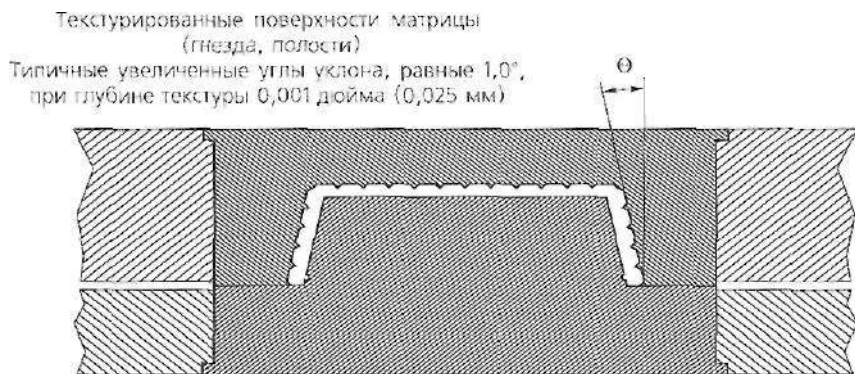
Общие рекомендации по шероховатости, механически обработанных металлических поверхнос-
тей см. ГОСТ 2789 73; справочник «Допуски и посадки», СПб.: Политехника — 2001. Изд. 8.
Т. 1-2. — Примеч. науч. ред.

определяющий разницу между пиками и углублениями обработанной поверхности. Реальная шероховатость поверхности определяется затем как средневзвешенное (среднеквадратическое) значение многочисленных измерений. В большинстве случаев более гладкие поверхности деталей облегчают выталкивание изделий, что особенно заметно при литье под давлением изделий из аморфных термопластов. В случаях, когда поверхность слегка текстурирована или была подвергнута дробеструйной обработке, усилия, затрачиваемые на выталкивание, возрастают. Наилучшее качество деталей формирующей полости и изделия обычно достигается при литье под давлением термопластов с пониженной вязкостью (высокая скорость течения расплава). Расплавы этих материалов в состоянии продавливаться через плоскость разреза, образуя облой. Намного труднее достигается хорошее качество поверхности у изделий из термопластов с более высокой вязкостью и низкой скоростью потока расплава. Более высокая вязкость материала препятствует «смачиванию» поверхности формирующей полости при ее заполнении расплавом.

Если материал полностью не смачивает поверхность формирующей полости, то реальная площадь контакта между ними уменьшается, соответственно снижается и усилие выталкивания изделия. Но это возможно только при достаточной эластичности термопласта, позволяющей изделию быстро релаксироваться после выталкивания, не оставляя следов от вершин и впадин матрицы.

Текстура поверхности

Изделия с текстурированной поверхностью требуют большего угла уклона, чтобы облегчить их выталкивание. Если текстура поверхности неупорядочена, то в матрицах, например, назначаются увеличенные углы уклона $1-1,5^\circ$ при глубине текстуры $0,001$ дюйма ($0,025$ мм). Это эмпирическое правило. Такие неупорядоченные



Следует избегать применения пуансонов с текстурированной поверхностью, то есть избегать текстурирования внутренних поверхностей изделия

Рис. 2.91. Когда текстурируются боковые поверхности формирующей полости, то необходимо назначать увеличенные углы уклона, чтобы облегчить отделение изделия от матрицы, и уменьшить риск образования задиров на поверхности. Кроме того, может оказаться необходимым «добавить» поднутрения пуансону, чтобы изделие оставалось на нем при размыкании формы

текстурированные поверхности, как, например «деревянные узоры», требуют назначения больших углов уклона. Обычно текстурирование выполняется на наружных поверхностях изделия (то есть текстурированная поверхность изделия прилегает к такой же поверхности формирующей полости).

Изделия с текстурированной внутренней поверхностью, формируемые на пуансоне, значительно труднее столкнуть, так как, усаживаясь на пуансоне, они плотно его обхватывают по всей текстурированной поверхности; фактическая поверхность контакта изделия с пуансоном оказывается большей равновеликой гладкой поверхности и необходимо назначить большие углы уклона для облегчения сталкивания [82].

Дополнительные факторы

Силы трения между изделием из пластмассы и формирующей поверхностью в процессе выталкивания (то есть силы, связанные со сдвигом изделия из формирующей полости или отделением от пуансона) могут быть уменьшены за счет использования: 1) смазки или 2) за счет применения покрытий или 3) специальной обработки поверхности полости.

Смазки и вещества, облегчающие **выталкивание** изделий

Применение смазки или специальных покрытий на трущихся поверхностях уменьшают силы трения в паре изделие-деталь формы при выталкивании изделия. [83, 84]. Смазывающие вещества удобно классифицировать по назначению: преимущественно внутренние или преимущественно наружные.

Преимущественно внутренние смазывающие вещества и являются, собственно, добавками, которые обладают хорошей совместимостью с материалом и которые уменьшают вязкость расплава. Преимущественно внешние смазывающие вещества отличаются очень низкой растворимостью в термопласте при литье под давлением, создавая смазывающий слой между изделием и деталями формы. Преимущественно наружные смазки используются для уменьшения усилия выталкивания изделий, особенно когда перерабатываются такие хрупкие термопласты, как ПС. Преимущественно наружные смазки — хорошая альтернатива аэрозолям, которые применяются для облегчения размыкания формы и использование которых сопряжено с возникновением определенных трудностей при декорировании и сборке изделий. В качестве наружных смазывающих веществ обычно используются так называемые металлические мыла.

Покрывания рабочих формообразующих поверхностей формы

Эффективным технологическим направлением для уменьшения усилий выталкивания изделий является применение плакирования или других специальных технологий обработки рабочих поверхностей, в результате чего создаются покрытия, работающие как «сухие» смазки [85-94]. Некоторые из таких технологий поверхностной обработки дополнительно повышают твердость поверхности, сопротивляемость истиранию, устойчивость к переносу материала изделия на поверхность пуансона или матрицы, улучшают коррозионную стойкость. «Сухие» смазки позволяют отказаться от аэрозолей, облегчающих размыкание формы, а также от необходимости удаления, очистки их следов перед такими операциями с готовыми изделиями, как нанесение рисунков, склеивание или сварка. Никелирование или хромирование поверхности (электроосаждение никеля или хрома) существенно улучшают

износостойкость и коррозионностойкость (в зависимости от типа термопласта), однако их влияние на величину усилия выталкивания изделия пока еще достаточно хорошо не изучено.

Такие специальные способы обработки поверхностей деталей формующей полости, как плазменное напыление паров нитрида титана (TiN), позволяет уменьшить усилия выталкивания изделий из частично кристаллических термопластов (ПФ, ПА) и аморфных термопластов (различных стиролов и акрилов) [86, 93]. Аналогично отмеченному влияют покрытия из дисульфида молибдена, дисульфида вольфрама [90] и аморфного карбида бора [91]. К другому распространенному покрытию, обычно используемому для уменьшения усилия выталкивания, относится ПТФЭ (тефлон) [88]. Это покрытие состоит из частиц ПТФЭ диаметром приблизительно от 1 до 3 мкм, которые находятся во взвешенном состоянии в электролитическом растворе никеля. Частицы ПТФЭ осаждаются или удерживаются в никелевой «матрице», когда она формируется на поверхности матрицы или пуансона формы, как показано на рис. 2.92.

ПТФЭ формирует тонкий слой, представляющий сухую пленку, которая снижает коэффициент трения поверхности матрицы или пуансона и снижает усилие выталкивания изделия для большого числа термопластов, включая ударопрочный ПС, ПК и ПП [92].

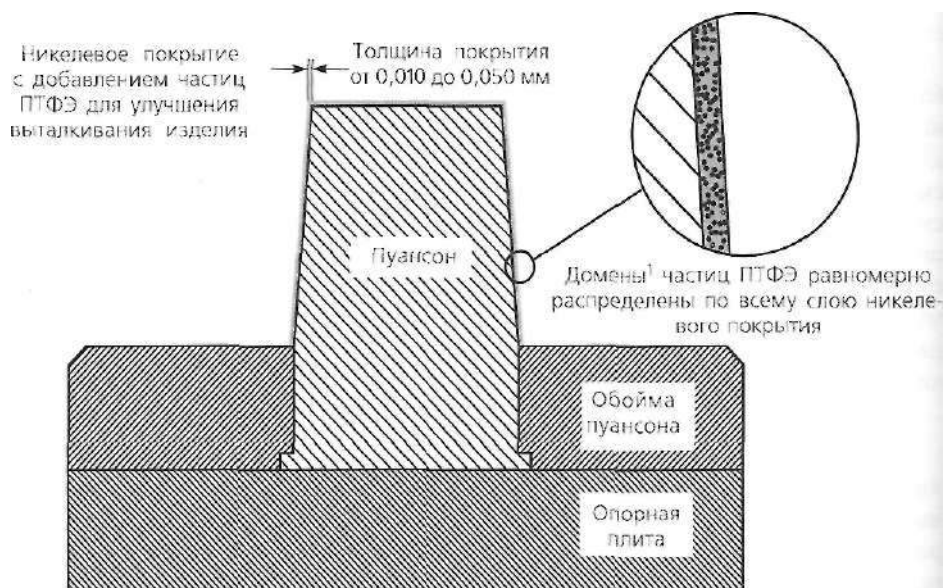


Рис. 2.92. Никелевое покрытие с равномерно распределенными частицами ПТФЭ (тефлона) может значительно уменьшить усилие, необходимое для выталкивания изделия

Домен (физ.) — небольшая область в веществе, отличающаяся физическими свойствами от смежных областей. (Современный словарь иностранных слов. М.: Русский язык, 1992.) — *Примеч. науч. ред.*

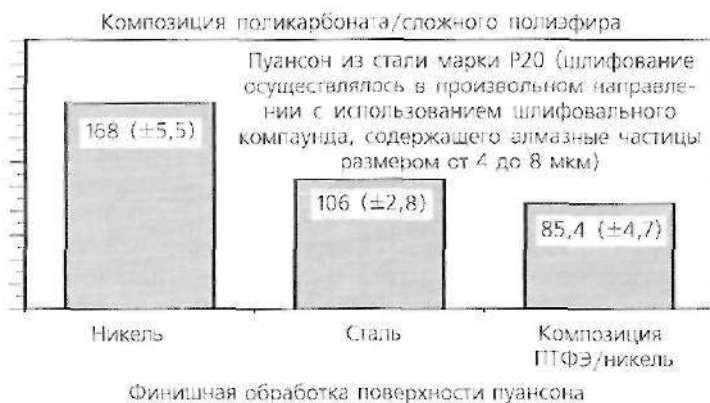


Рис. 2.93. Никелевое порошковое покрытие с равномерно распределенными частицами ПТФЭ (тефлона) эффективно снижает усилие выталкивания изделия

2.6.4. Факторы, относящиеся к внешнему виду изделия

В системах выталкивания изделий из формы применяют толкатели (выталкиватели) — цилиндрические, плоские, трубчатые и т. д., которые оставляют следы на поверхности изделия. Обычно ответственность за это лежит на конструкторе литейной формы, который должен согласовать наиболее подходящий вариант конкретной конфигурации изделия и его расположение в формующей полости. Поэтому он должен указывать места, на которые можно воздействовать тем или иным элементом системы выталкивания, чтобы не повредить или не ухудшить внешний вид изделия. В некоторых случаях, например, при изготовлении линз (рис. 2.94), видимые дефекты вообще не допустимы.

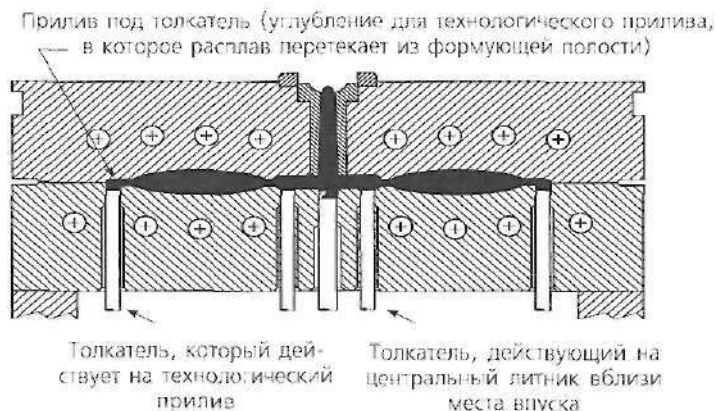


Рис. 2.94. Толкатели, втулки, наклонные колонки и другие детали, соприкасающиеся при выталкивании изделия с его поверхностью, оставляют на ней следы и поэтому должны быть расположены только в наименее заметных местах

При литье под давлением неглубоких изделий применяют толкатели, действующие непосредственно на литники, то есть под литники (например, если центральный литник достаточно длинный или достаточно прочный). Чтобы улучшить условия выталкивания изделия, применяют технологические приливы, как показано на рис. 2.94.

Конструкторские решения относительно выталкивающей системы тесно связаны с выбором расположения плоскостей разъема формы, расположением мест впуска и каналов охлаждения изделия в каждой из полуформ. Рассмотрим снова изделие, которое показано на рис. 2.5. Это изделие может быть верхней половиной корпуса бытового прибора или кассового аппарата. В случае однопоздной литьевой формы самое простое — применить центральный литник, «стандартное» расположение матрицы/пуансона (то есть матрица связана с неподвижной плитой, а пуансон — с подвижной или дополнительной толкающей плитой термопластавтомата).

Предпочтительнее, чтобы изделие оставалось в подвижной полуформе: тогда система размыкания формы может быть использована для «запуска» системы выталкивания. Однако если к наружной поверхности изделия предъявляются повышенные требования, то расположить центральный литник с ее стороны недопустимо. Как альтернативный вариант можно расположить место впуска со стороны пуансона, а следы от выталкивателя должны быть скрыты. Такая схема обычно не применяется, поскольку она является более дорогой. Конструктор должен учитывать, что есть другие возможности или альтернативные варианты извлечения изделия со стороны стационарной полуформы. Например, стандартный набор матрицы и пуансона может быть сконструирован с расположением центрального литника в матрице, если след от него будет «спрятан» под наклейкой или логотипом.

2.6.5. Поднутрения и отверстия

Идеально, если для выталкивания изделий из литьевой формы не требуются какие-либо специальные «нестандартные» узлы. Надо стараться, по-возможности, избегать применения механизмов для бокового смещения и перемещения деталей, например, толкателей, расположенных под углом, складывающихся пуансонов, механизмов вывинчивания знаков и т. п. Усложненные узлы литьевых форм могут существенно повышать стоимость производства, требуют более внимательного технического обслуживания, влияют на схему расположения каналов охлаждения и, в конечном счете, приводят к увеличению времени цикла литья под давлением. Если нельзя совсем отказаться от бокового смещения и перемещения деталей, то пользоваться этим приемом следует очень осторожно и ограничивать его при любой возможности. Особая необходимость в «нестандартных» узлах возникает, когда в изделии требуется формировать элементы, расположенные в направлении, перпендикулярном направлению смыкания формы. Когда бокового перемещения формующих деталей формы не избежать, предпочтительнее обеспечить его в направлении, перпендикулярном направлению размыкания формы. По-возможности, следует избегать перемещений под углом, не равным 90 град. На рис. 2.95 показано отверстие на боковой стенке изделия. Для извлечения небольшого знака, формующего это отверстие, необходимо его (знака) боковое смещение, и, следовательно, усложнение конструкции и увеличение стоимости изделия. Но если при конструировании изделия учесть направление его выталкивания,

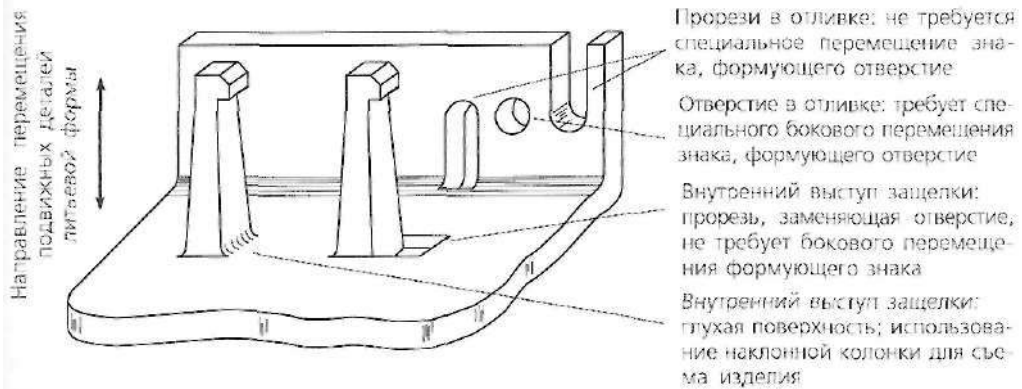


Рис. 2.95. Каждый раз пало стараться конструировать такие отверстия или выступы защелок, чтобы их можно было свободно выталкивать. Например, замена отверстия в боковой стенке изделия прорезью не требует дополнительных затрат, связанных с необходимостью бокового смещения формирующих знаков формы

тогда отверстие, например, может быть заменено на прорезь (рис. 2.95), и не потребуются более сложные решения для смещения знака при выталкивании изделия.

На рис. 2.95 показано, что поднутрений, образованных выступами защелок, можно избежать, если они формовались с помощью отсекателя, а не наклонной колонки (см. детали в разделе 6.3.3). Вариант с отсекателем лучше использовать, когда в основании выступа имеется прорезь, допустимая с учетом требований к качеству внешнего вида.

В другом примере изделия (рис. 2.96) с прорезями или окнами на боковых стенках формуются с помощью отсекателей, а не за счет боковых перемещений. Однако подобные решения можно применять только для изделий, конструкции которых допускают большие углы уклона боковых стенок, что позволяет реализовать достаточно простую схему смыкания-размыкания литевой формы.

Выталкивать изделия с поднутрениями после размыкания литевой формы возможно, только используя разъемные матрицы, различные варианты боковых перемещений



Рис. 2.96. Отверстие в боковой стенке формируется с помощью отсекателей, а выталкивание изделия из формы происходит после ее размыкания по плоскости разреза матрицы/формы

знаков, специальные конструкции пуансонов и матриц, с элементами «отсекания». Однако в особых случаях можно выталкивать изделия с поднутрениями непосредственно из матрицы или сталкивая с пуансона, если поднутрения неглубокие. Допустимая глубина поднутрения зависит от конструкции изделия и свойств материала при температуре выталкивания изделия. Например, процесс сталкивания с пуансона полиэтиленовой пробки с резьбой возможен, если изделие достаточно эластично, а резьба сконструирована с углами, которые позволяют осуществить постепенное извлечение изделия и минимизировать его повреждение при сдвиге с резьбового знака. В процессе выталкивания или сталкивания с пуансона пробка (еще полностью не остывшая) деформируется, но затем восстанавливает свою форму и размеры, и будет продолжать усаживаться. Точность размеров на изделия с поднутрениями, которые сталкиваются с пуансоном, трудно заранее предсказать, так как велик риск влияния процессов, связанных с появлением остаточной деформации материала. Изделия из материалов типа термопластичных эластомеров, могут отливаться под давлением с большим количеством поднутрений (если это требуется), однако конструирование эффективной системы их автоматического выталкивания может оказаться очень трудоемким. В этих случаях изделия могут быть отделены от пуансона вручную. С другой стороны, допустимая глубина поднутрений в изделиях из жестких аморфных термопластов, например, ПС, очень небольшая. В некоторых случаях поднутрения специально добавляются для того, чтобы изделие при размыкании формы оставалось на пуансоне (то есть не застревало в матрице), как показано на рис. 2.97.

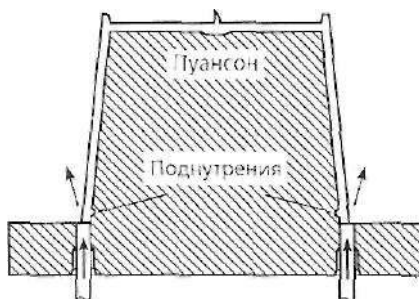


Рис. 2.97. В ситуациях, при которых трудно выталкивать изделия из формирующей полости, например, когда боковые стенки изделия текстурированы, на пуансоне выполняют специальные технологические задержки — поднутрения, которые гарантируют извлечение изделия из матрицы при размыкании формы

Изделия с поднутрениями могут быть изготовлены с достаточно «жесткими» допусками, но только если применяются специальные механизмы или детали форм, обеспечивающие перемещение соответствующих формообразующих элементов.

Можно не считаться с ограничениями, связанными с размерами и формой поднутрения, показаниями пластичности материала. Для извлечения таких изделий применяются механизмы свинчивания, наборы извлекаемых вставок, наклонные колонки (раздел 6.3.3) и складывающиеся пуансоны. Механизмы для свинчивания необходимы для удаления резьбовых знаков, например, при изготовлении пластмассовых пробок.

Извлекаемые вставки применяют для изделий со сложной геометрической формой или при литье под давлением небольшого количества изделий (прототипов). К извлекаемым вставкам относят и детали-компоненты матриц/пуансонов, которые устанавливают в форму до ее смыкания и удаляют вместе с изделием из формы. Вставки извлекаются оператором из отливки вне литейной формы. Для повторения цикла литья под давлением используют второй сменный набор вставок, которые могут быть использованы для изготовления изделий очень сложной геометрии. Из-за больших затрат этот процесс на практике используется лишь в мелкосерийном производстве или при изготовлении прототипов, но с его помощью относительно просто можно создать литейную форму для изготовления изделий очень сложной геометрической формы.

Литье под давлением с использованием вставок из низкоплавких металлических сплавов

В последние годы были разработаны технологические процессы, которые позволяют отливать под давлением очень сложные изделия из различных термопластов. Изделия с большими и сложными поднутрениями можно изготовить, применяя вставки (знаки) из низкоплавких металлических сплавов. Литье под давлением с плавкими вставками применяют для изготовления сложных изделий — клапанов, насосов, топливных раковок и воздушных впускных коллекторов автомобилей [93-98]. Реализация такой модификации процесса литья под давлением требует значительных капиталовложений, но они окупаются благодаря тому, что сложные изделия изготавливают за один впрыск, и, таким образом, устраняется необходимость получать несколько деталей, требующих выполнения затратных операций при последующей сборке.

Вставки изготавливают штампованием или литьем. Наружная конфигурация вставки должна точно соответствовать сложной геометрической конфигурации внутренней полости изделия. Вставки устанавливают в раскрытую литейную форму. Затем форма смыкается и осуществляется литье под давлением (в стандартном варианте). Когда форма размыкается, то изделие со вставкой выталкивается. Для выполнения следующего цикла литья требуется установить другую вставку. После выталкивания изделия со вставкой, последняя выплавляется вне литейной формы. Как было отмечено, материал вставок должен представлять металлический сплав с низкой температурой плавления. Выплавление может быть выполнено разными способами:

- вымыванием вставки горячей жидкостью (для полых вставок);
- погружением изделия и вставки в емкость с горячей жидкостью («метод плавательного бассейна»);
- индукционным нагревом (этот метод может привести к окислению металла);
- индукционным нагревом в горячей жидкости.

Предпочтительнее использовать горячую жидкость, поскольку она позволяет быстро расплавить вставку и снизить вероятность окисления металла.

После выплавления вставки само изделие проверяют металлическим детектором, чтобы убедиться в полном удалении металла. Затем выплавленный металлический сплав затвердевает, а потом вновь используется при изготовлении вставок для следующих циклов литья под давлением.

Металлические сплавы, из которых изготавливают вставки, должны иметь относительно низкие температуры плавления, чтобы изделие из термопласта не было

повреждено или деформировано при выплавлении вставки. С другой стороны, материал вставок и сама их конструкция должны быть в состоянии выдерживать термические и силовые нагрузки, возникающие в процессе литья под давлением. На практике обычно используется эвтектический сплав олово-висмут. Этот сплав обладает низкой усадкой и не вызывает трудностей при обработке. Несмотря на то что температура его плавления около 138 °С, он применяется для литья под давлением таких термопластов, как ПА, армированный стекловолокнами, при температурах переработки выше 290 °С.

Это возможно, если процесс литья под давлением спроектирован правильно, и температура поверхности вставки будет ниже температуры плавления материала вставки. Тонкий затвердевший слой термопласта, находящийся в контакте со вставкой, должен быть достаточен для поддержания нужного градиента температуры внутри термопласта. Одновременно происходит отвод тепла от относительно горячей поверхности вставки по направлению к менее нагретой ее центральной зоне. Плавкий материал должен быть в состоянии выдерживать механические нагрузки, связанные с эксплуатацией литьевой формы. Конструкция литников и расположение мест впуска должно быть оптимизировано, чтобы обеспечить сбалансированное заполнение формующей полости и минимизировать вероятность механических повреждений вставки.

В целом многостадийный процесс (литье металлической вставки, литье под давлением изделия со вставкой, выплавление вставки из изделия) хотя и трудоемок, позволяет изготавливать уникальные изделия очень сложной геометрической формы. Пример такого изделия — воздушный впускной коллектор для автомобиля, показанный на рис. 2.98 [93]. Воздушный впускной коллектор отливается из полиамида,

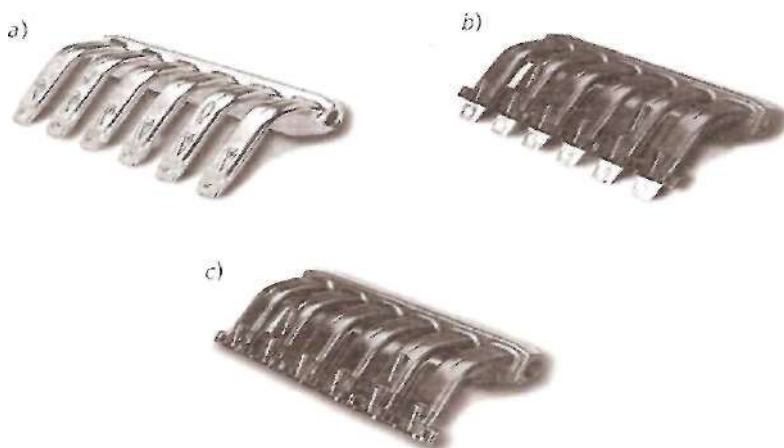


Рис. 2.98. Изделия очень сложной геометрической формы могут быть отлиты под давлением с использованием плавких металлических вставок: *a* — вставка из низкоплавкого металлического сплава готова для установки в литьевую форму; *b* — отлитое изделие со вставкой как единое целое выталкивают из формы; *c* — пластмассовая отливка после выплавления металлической вставки

армированного стекловолокном. По сравнению с коллектором, отлитым из алюминия, полиамидный имеет определенные преимущества. К ним относятся:

- меньшая масса (на 30–60% легче, чем алюминиевый аналог);
- более высокое качество поверхности, что уменьшает сопротивление поступающего в автомобиль воздуха;
- соблюдение точных размеров изделия (без дополнительной механической обработки);
- меньшая температура воздуха в трубке (благодаря хорошим изоляционным свойствам термопласта).

Литье под давлением сложных изделий с использованием металлических плавких вставок позволяет получить конструктивно цельные изделия. Когда к готовому изделию предъявляют более жесткие требования точности всех его конструктивных элементов, изготавливают две или более части/детали изделия (как правило, их отливают одновременно в разных литевых формах), а затем собирают/соединяют различными методами, например, с помощью ультразвуковой сварки (см. главу 6.)

Складывающиеся пуансоны/вставки

С помощью специальных (обязательно индивидуальных для конкретного изделия) складывающихся пуансонов/вставок можно формовать разнообразные поднутрения как на наружных, так и особенно на внутренних поверхностях [96–101]. Складывающиеся вставки состоят из сегментов с гибкими элементами, которые сжимаются вовнутрь (при освобождении внутренних поднутрений), как только начинают выталкивать изделие. После сжатия вставка легко выталкивается из изделия. Как и вывинчивающиеся резьбовые знаки, складывающиеся вставки могут применяться для формования резьбовых крышек и фитингов. Однако в отличие от вывинчивающихся знаков, складывающиеся вставки могут применяться и для формования кольцевых канавок, углублений и даже отверстий на боковых стенках изделия (что устраняет необходимость использования бокового смещения внешних элементов оснастки). Складывающиеся вставки могут быть предварительно изготовлены различных типоразмеров [99,100]. Вставки больших размеров, диаметром от 25 до 90 мм, могут сжиматься на величину от 1,20 мм до 3,75 мм на одну сторону (допустимая глубина поднутрения); вставки малого размера, диаметром от 13 до 24 мм, могут сжиматься на величину от 1,32 до 1,50 мм на сторону. Эти небольшие вставки имеют ограниченную область применения — когда формируется прерывистая резьба или поднутрения [101].

Место расположения линии разреза формы

В некоторых случаях необходимость в «формовании» поднутрения может быть исключена за счет простого изменения положения изделия в формующей полости. Изделие, которое показано на рис. 2.100, имеет ребра, расположенные под углом к основной стенке, с которой они составляют единое целое. При ориентации изделия как на рис. 2.100 (слева), для выталкивания необходимо с помощью подвижного пуансона или наклонной колонки предварительно «освободить» зону поднутрения. Если изделие расположить под углом в формующей полости,

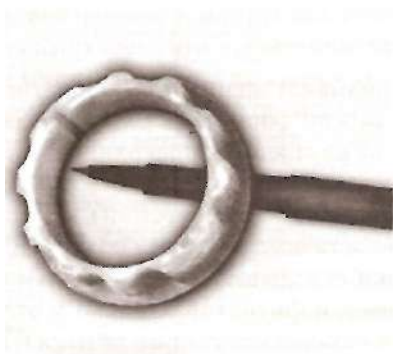
a)



b)



c)



d)

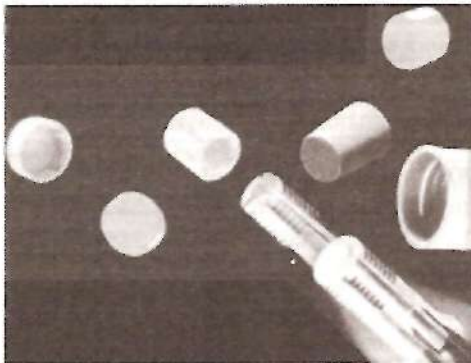


Рис. 2.99. Складывающиеся пуансоны (или вставки) применяют для изготовления изделий с поднутрениями на внутренних поверхностях: *a* — складывающийся пуансон применяется для изготовления внутренних канавок; *б* — пуансон в «сложенном» состоянии; *с* — изделие с внутренней кольцевой канавкой отлито под давлением с помощью складывающегося пуансона; *д* — складывающиеся пуансоны небольшого размера (мини-пуансоны) (с разрешения Roehr Tool)

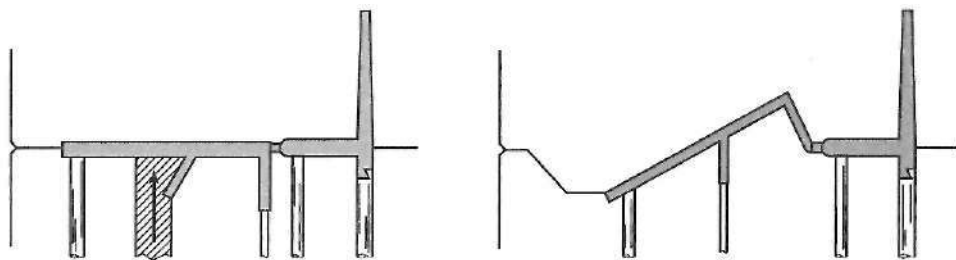


Рис. 2.100. В некоторых случаях изменение положения изделия в формующей полости устраняет необходимость поднутрений и может упростить его выталкивание

как показано на рис. 2.100 (справа), то оно может быть вытолкнуто без каких-либо трудностей [102]. Однако всегда лучше при конструировании изделий избегать любых подобных элементов, расположенных под углом к основной плоскости разъема формы [104].

2.6.6. Предварительная оценка усилия выталкивания изделия

Наиболее наглядный вариант — оценка усилия, необходимого для сталкивания изделия с пуансона; оно может быть оценено во многом аналогичным образом, как это делается при оценке усилия запрессовки неподвижного прессового соединения (см. раздел 6.2). Известно, что усилия, необходимые для соединения с натягом зубчатого колеса или втулки с металлической осью, могут быть определены, если заданы геометрические размеры соединяемых деталей, величина требуемого натяга, модуль упругости материалов деталей и коэффициент трения пары. Сталкивание изделия с пуансона — обратная задача. В результате охлаждения в формирующей полости изделие усаживается на пуансоне. Металлический пуансон затрудняет усадку, тем самым ограничивая изменения размеров изделия, при этом возникают определенные внутренние (усадочные) напряжения. Когда изделие при сталкивании с пуансона освобождается, немедленно начинается релаксация отливки и, соответственно, изменения размеров.



Рис. 2.101. Усадка изделия из пластмассы во время охлаждения в форме затруднена, она «ограничивается» пуансоном. Изделие испытывает упругое сжатие сразу после выталкивания; его размеры будут изменяться вследствие релаксации напряжений

Величина быстрого изменения размеров определяется как разница размера пуансона и размера изделия, измеренного сразу после его сталкивания. Силы трения, возникающие при сталкивании, могут быть вычислены, если известны следующие параметры [2]:

- геометрическая форма и размеры изделия;
- усадка термопласта;
- модуль упругости термопласта при температуре выталкивания изделия;
- сила трения в паре пуансон/термопласт.

Усилия выталкивания/сталкивания изделия зависят от суммарного воздействия:

- сил трения в паре изделие-пуансон;
- сил, направленных на сопротивление вакууму, который создастся только в случае охватывания пуансона (или знака) изделием, типа («стакан», то есть цилиндрическим изделием с дном).

Из-за разности давлений снаружи пары изделие-пуансон и внутри нее, когда изделие сталкивается с пуансона, в пространство между изделием и пуансоном начинает проникать воздух. От того, насколько легко это происходит, во многом зависит величина первоначального усилия, необходимого для сталкивания изделия; воздух может проникать в пространство между изделием и пуансоном через зазоры в отверстиях под толкателем и т. п. Силы сопротивления разрушению материала изделия при температуре его выталкивания определяются параметрами механических свойств и особенностями конструкции изделия (толщиной стенок, глубиной поднутрения и т. д.). Усилия сталкивания изделия типа колюю/втулка (когда не возникает сил сопротивления вакууму) без поднутрения создаются только силами трения при перемещении изделия по пуансону. Сила первоначального отрыва при сталкивании изделия, или сила трения, может быть определена по уравнению:

$$F_c = \mu \cdot P_k \cdot A, \quad (2.20)$$

где μ — коэффициент статического трения в паре изделие/пуансон; P_k — контактное давление в паре изделие/пуансон (возникающее из-за затрудненной усадки); A — площадь контакта пары изделие/пуансон.

Из трех переменных в уравнении (2.20) только площадь контакта легко измерить. Рассмотрим пример, который показан на рис. 2.101. Начальная площадь контакта:

$$A = \pi \cdot \varnothing_c \cdot L_c \quad (2.21)$$

где $\varnothing_c$ — диаметр пуансона; L_c — длина пуансона (осевой размер).

Контактное давление в паре изделие/пуансон будет зависеть от величины затрудненной усадки при температуре сталкивания изделия и модуля упругости термопласта при растяжении. Оно будет наибольшим для изделий из частично кристаллических термопластов, отличающихся большими коэффициентами усадки и величинами модуля упругости. Любая переменная, которая будет уменьшать коэффициент усадки материала или модуль упругости при растяжении, уменьшает контактное давление в паре изделие-пуансон, а следовательно, и усилие сталкивания. Например, сокращение времени цикла литья под давлением, то есть уменьшение времени пребывания формы в сомкнутом состоянии, будет приводить к уменьшению усилий сталкивания, так как к его началу, при соответствующей температуре изделия, величины усадки и показатели жесткости (то есть модуля упругости) будут относительно меньшими. Однако может возникнуть опасность деформации изделия при более высоких температурах сталкивания и меньших усилиях (отливка «мягкая», эластичная, риск деформации повышенный).

Выше отмечалось, что изделия должны охлаждаться в формующей полости до такой температуры, при которой достигается жесткость, достаточная, чтобы предотвратить деформацию при размыкании формы и выталкивании изделия. Время охлаждения

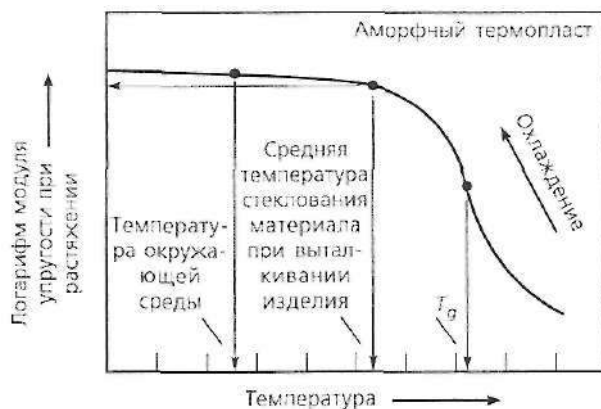


Рис. 2.102. Изделия из пластмассы должны быть охлаждены в формующей полости до такой температуры, чтобы была достигнута определенная прочность и твердость поверхности, достаточная для предотвращения возможных деформаций под действием толкателей и из-за внутренних напряжений в отливке

определяется технологом экспериментально, при этом для оценки средней температуры изделия в момент выталкивания используется температура размягчения по Вика или температура потери формоустойчивости под действием заданной нагрузки. Это важно учитывать при конструировании изделия.

Растягивающие напряжения a_m возникающие в изделии, могут быть определены, если известны модуль упругости при растяжении E_m и линейная усадка материала изделия во время выталкивания (при соответствующей температуре); к сожалению, точно оценить такую усадку нелегко, поскольку изделия будут продолжать усаживаться после выталкивания.

Помочь оценке в этих условиях могут данные PVT-диаграмм или анализ с помощью компьютерных программных средств. Результаты расчетов лучше всего представить в виде определенного процента от предполагаемого «стандартного значения усадки в форме». В общем виде имеем:

$$\sigma_T(T_e) = E_T(T_e) \cdot \varepsilon_T(T_e). \quad (2.22)$$

В случае тонкостенного изделия цилиндрической формы (радиус R) с дном толщиной h , растягивающее напряжение является окружным:

$$\sigma_H(T_e) = \sigma_T(T_e) = P_h \cdot R/h. \quad (2.23)$$

В случае тонкостенного изделия цилиндрической формы типа втулки/кольца первоначальное усилие выталкивания изделия (напряжение отрыва) определяется из уравнения:

$$F_e = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot E(T_e) \cdot \varepsilon(T_e) \cdot L_c \cdot h, \quad (2.24)$$

где L_c — см. уравнение (2.21); μ — статический коэффициент трения для пары изделие/пуансон.

Значение ρ для большинства термопластов зависит как от температуры, при которой начинается выталкивание, так и от уровня нормального напряжения. Сложность заключается еще в том, что термопласт начинает наплавляться на поверхность пуансона. Значения статических коэффициентов трения для реальных условий литья под давлением, хотя и наиболее предпочтительны, их не всегда легко получить. Предсказываемые значения усилия выталкивания являются весьма грубыми, неадекватно отражающими состояние и поведение материала изделия на этой стадии процесса. Приведенная ориентировочная оценка усилия выталкивания изделия цилиндрической формы сделана при нулевом уклоне поверхностей. На рис. 2.103 приведены скорректированные данные для разных значений углов уклона, с увеличением которых, как видно из диаграммы, уменьшаются усилия, необходимые для выталкивания изделия. Более детальный обзор и анализ проблем, связанных с определенными усилиями выталкивания изделий, приведены в работе Менгеса и Морена [2].

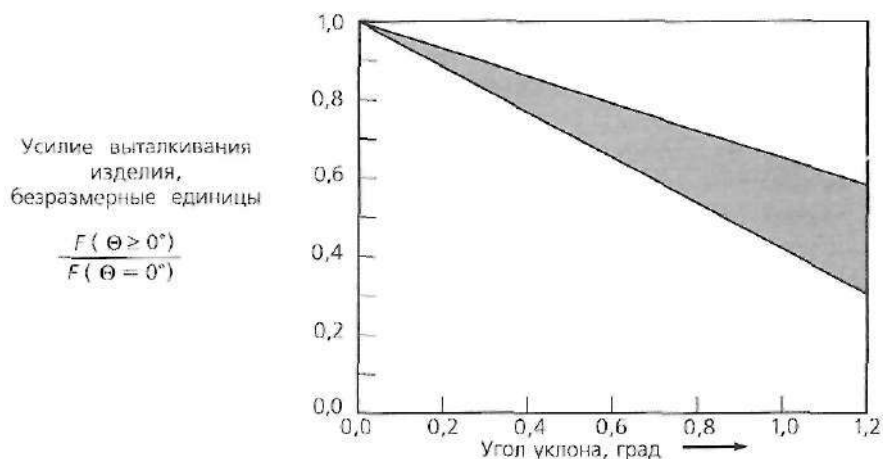


Рис. 2.103. График для грубой оценки уменьшения усилия выталкивания изделия при увеличении угла уклона у пуансона

2.7. Некоторые специальные технологии литья под давлением изделий из термопластов

2.7.1. Литье под давлением с газом

Общие положения

Литье под давлением с газом обладает довольно гибкими возможностями, которые позволяют конструировать и изготавливать более сложные изделия из термопластов. Как и традиционный способ литья под давлением со вспениванием, литье под давлением с газом представляет собой модификацию классического процесса.

позволяющего упростить или избежать многих сложных проблем, связанных с достижением требуемого качества поверхности, экономией материала изделия, а также с ограничениями по длительности цикла (возникающими в процессе литья под давлением изделий из вспенивающихся термопластов). Литьем иод давлением с газом можно получать прочные и конструктивно жесткие изделия практически без внутренних напряжений в них и усадочных утяжин, с относительно хорошим качеством поверхности. Усилия смыкания формы при литье иод давлением с газом меньше, чем необходимые усилия, например, при традиционном исполнении литья под давлением изделий из вспенивающихся термопластов. Значительные технологические преимущества процесса открывают широкие перспективы для конструирования изделий, например, в производстве автомобилей, кассовых аппаратов, бытовых приборов и т. д. Многие преимущества проявляются по мере накопления опыта переработки и конструирования изделий. По сравнению с классическим процессом литья под давлением, литье под давлением с газом является более сложным с точки зрения управления процессом, особенно при использовании многогнездных литьевых форм. Толщина стенок изделия здесь определяется не только конструктивными требованиями (особенно для тонкостенных участков изделия), но и специфическими технологическими параметрами: степенью заполненности формующей полости расплавом, температурой формы (для участков с каналами, по которым распространяется газ). Все это подчеркивает важность точного управления процессом. При внедрении в производство технологии литья под давлением с газом обычно приходится оплачивать лицензию на ее приобретение.

Далее приведено краткое описание технологии литья под давлением с газом (подробная информация в [103-109]). Процесс литья под давлением с газом чаще всего используется для:

- 1) изготовления изделий с толстыми стенками, такими как трубы, ручки или рамы, профили (с внутренними каналами);
- 2) для изготовления деталей, типа корпусов, панелей, полок или шасси, применяемых в большой гамме изделий, например, в телевизорах, в компьютерах и т. д.

Как было отмечено, к основным преимуществам этой технологии относятся: экономия материала, снижение времени технологического цикла (то есть повышение производительности), повышение качества изделий благодаря устранению усадочных утяжин и практически полностью внутренних напряжений. Все эти основные преимущества могут быть достигнуты за счет образования полостей, каналов для распространения газа внутри изделия. Изготовление таких изделий относительно несложно, газ всегда распределяется в зоны наименьшего сопротивления, у него четко определен путь перемещения. Последнее обстоятельство позволяет получать тонкостенные изделия (газ способствует уменьшению коробления и устранению усадочных утяжин, которые обычно возникают, когда в изделии имеются усиливающие ребра и бобышки, а также уменьшению давления в формующей полости при заполнении формы). Для получения изделий с тонкими стенками (так называемые «изделия с открытыми каналами») каналы большого сечения для распространения газа размещают «в теле» изделия, чтобы обеспечить достаточные для необходимого количества газа объемы. Газовые каналы большого сечения (то есть в изделиях с толстыми стенками)

способствуют упрочнению изделия подобно тому, как ребра в изделиях, отлитых под давлением без газа, по традиционной технологии. Изделия с газовыми каналами необходимо спроектировать и изготовить так, чтобы газ не проникал через тонкие стенки изделия (поскольку, как отмечалось, он распространяется в направлении зон с наименьшим сопротивлением). Определение размеров каналов и мест их расположения должно исходить из задачи обеспечения сбалансированного заполнения формирующей полости расплавом и достижения заданной прочности изделия (по всему объему последнего).

В табл. 2.5 приведены обобщенные данные об основных преимуществах процесса литья под давлением с газом по сравнению с другими технологиями. В таблице приведены относительные оценки корпусов больших телевизоров из ПС (то есть изделий больших размеров, которые, с одной стороны, должны иметь безупречный внешний вид, а другой — должны выдерживать значительную внешнюю нагрузку) [110].

Таблица 2.5. Сравнение возможностей различных технологий литья под давлением термопластов на примере изготовления корпусов телевизоров из ПС

Технология литья под давлением	Гибкость конструкции	Прочность изделия	Длительность цикла формирования	Масса изделия	Качество поверхности изделия
Классическая технология литья под давлением	+	—	+	+	+
Литье под низким давлением со вспениванием	+	++	—	—	—
Литье с противодавлением, со вспениванием	+	++	—	—	—
Литье под давлением с газом	++	+	+	++	+

Относительные оценки: ++ — отлично; + — хорошо; — — удовлетворительно.

Описание процесса литья под давлением с газом

Суть процесса литья под давлением с газом, как и классического литья под давлением, заключается во впрыске расплава термопласта в формирующую полость литейной формы, отличающуюся хорошей вентиляцией. Каналы для распространения газа «работают» как «внутренние литники» в классическом процессе литья под давлением; применение одного впуска в формирующую полость позволяет избежать образования линий спая (которые возникают в других случаях, например, при нескольких впусках). При впрыске в формирующую полость подается рассчитанный ограниченный объем расплава, то есть намеренно осуществляется «недолив» (по сравнению с классической технологией). В конце стадии впрыска термопласта (или после короткой задержки), подается сжатый газ; обычно это азот — доступный инертный газ. Газ под давлением проникает в центральную область расплава, распространяется, перемещается в зоны наименьшего сопротивления, «оттесняет» расплав к периферии и стенкам формирующей полости и, при необходимости, с помощью предварительно сконструированных газовых каналов-направляющих способствует формированию полостей в изделии и всех

его периферийных элементов. Это стадия предварительного заполнения формующей полости газом. Поскольку данный процесс происходит при ограниченном объеме расплава (с «недоливом»), то обязательное уплотнение материала отливки завершается не за счет плунжера/«подушки», а за счет давления газа. Давление газа поддерживается на достаточно высоком уровне, чтобы компенсировать (вторичной подачей) объемную усадку материала при уплотнении. После того как изделие охлаждено до температуры, при которой его можно выталкивать из разомкнутой литейной формы, газ удаляется — через специальную вставку или (при выталкивании центрального литника) через открытый литниковый канал — до размыкания формы и выталкивания изделия. Основные стадии процесса литья под давлением с газом представлены на рис. 2.104 [1151].

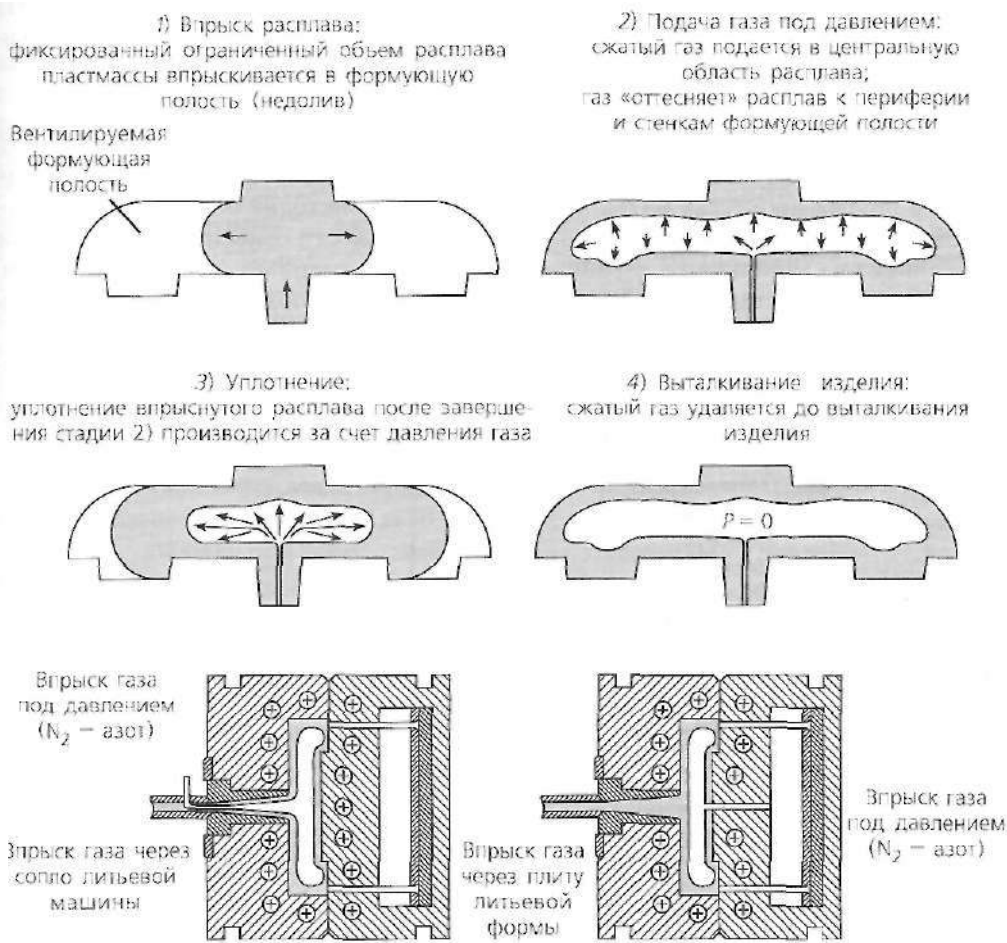


Рис. 2.104. Вверху: последовательность стадий литья под давлением с газом. Внизу: вариант подачи газа через сопло литейной машины и через плиту литейной формы

Известно несколько модификаций литья под давлением с газом. Одно из основных отличий — вариант подачи сжатого газа: либо через сопло литьевой машины, либо непосредственно в формующую полость через подвижную плиту литьевой формы. В первом случае газовые каналы должны начинаться в сопле, во втором — в формующей полости независимо от расположения мест впуска. Литье под давлением с подачей газа непосредственно в формующую полость более универсально, но при этом на поверхности изделия могут остаться следы от впускных литников и газовых каналов, а также вентиляционных отверстий.

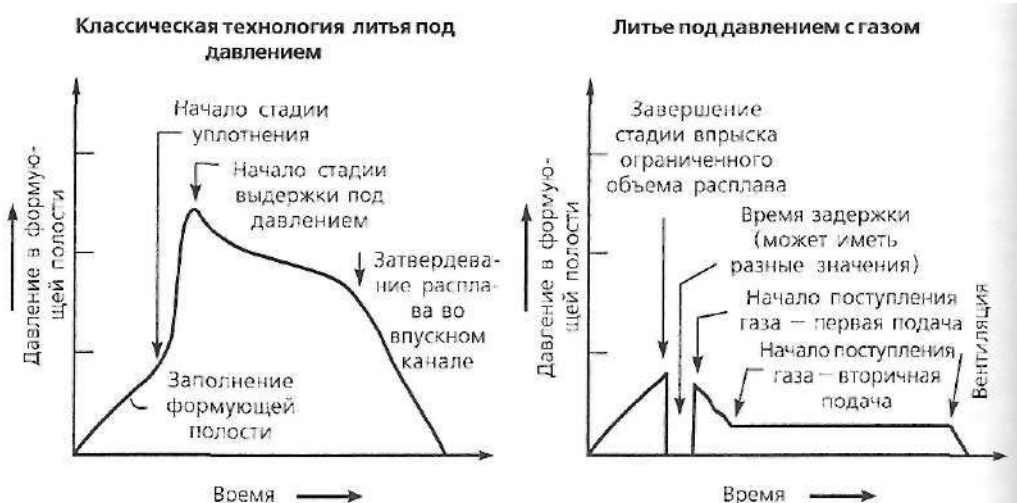
Стадии процесса литья под давлением с газом

Независимо от конкретной модификации литья под давлением с газом для каждой характерны и аналогичны основные стадии: впрыск расплава, подача газа в расплав (первая подача), уплотнение расплава с помощью газа (вторичная подача). На рис. 2.105 представлены основные стадии литья под давлением с газом в виде зависимостей изменения давления в формующей полости в течение одного цикла.

Заполнение формующей полости

В начале стадии впрыска рассчитанный ограниченный объем термопласта подается в формующую полость. На этой стадии при литье под давлением с газом, как и в других процессах литья под давлением, происходит образование затвердевшего слоя. Величина давления в формующей полости относительно не велика, поскольку она заполняется ограниченным объемом расплава; давление намеренно снижают и потому, что надо «дать возможность» наполниться газом каналам большого сечения для распространения газа.

Очень важно, чтобы ограниченный объем расплава термопласта, поступивший в формующую полость на стадии впрыска, распределился в ней равномерно и окончательно к моменту завершения первой подачи газа [105].



FUC.Z.IU3. Диаграмма изменения давления в формующей полости при классическом литье под давлением термопласта (слева) и при литье под давлением с газом (справа)

Если газовые каналы относительно большого сечения будут неправильно распределены или их толщина окажется слишком большой, расплав (до подачи газа в формующую полость) может создавать кольцевые завихрения вдоль газовых каналов, даже разрушая их и создавая ситуацию, благоприятствующую образованию воздушных ловушек.

Компьютерное моделирование при проектировании изделий и литьевых форм для литья под давлением с газом практически обязательно; известные коммерческие программные продукты позволяют получить надежные оценки при расчете толщины сплошных стенок и мест расположения газовых каналов и их размеров до изготовления формующего инструмента, не теряя времени и средств на реализацию метода «проб и ошибок» [112].

Заполнение формующей полости расплавом/газом

Продолжительность времени от впрыска расплава в формующую полость до подачи газа имеет большое значение для качества изделия. При подаче газа через сопло литьевой машины заданный объем расплава полностью впрыскивается в формующую полость до подачи в нее сжатого газа. Когда сжатый газ подается в формующую полость напрямую, можно инициировать подачу газа еще до завершения стадии заполнения формующей полости расплавом. Иногда желательно делать фиксированную по времени задержку — после впрыска расплава в формующую полость, чтобы дать термопласту, остывая, стать более вязким, что предотвращает возможность проникновения газа за пределы газовых каналов в области, прилегающие к оформляющей поверхности полости. К сожалению, при такой задержке может пострадать качество поверхности изделия: из-за остановки/старта иногда возникает эффект вибрации потока или (в худшем случае) может случиться преждевременное затвердевание расплава [111].

Стадия впрыска газа

Окончательная стадия заполнения формующей полости производится при давлениях в диапазоне от 0,5 до 30 МПа (70–4500 фунтов/дюйм²). При этом используются системы регулировки газа как по давлению, так и по объему [112]. Давление газа должно быть достаточным для преодоления сопротивления течению вязкого расплава термопласта, перемещающегося в формующей полости по направлению к незаполненным зонам изделия, как показано на рис. 2.106 [113]. Поскольку газ перемещается по газовым каналам (газ должен оставаться внутри этих каналов), он «оттесняет» расплав в оставшиеся незаполненными области формующей полости. Эта часть стадии заполнения обычно непродолжительна, поскольку газ быстро перемещается по каналу до тех пор, пока расплав термопласта не переместится до крайней точки периферии полости. [108]. Толщина стенок вокруг полых газовых каналов зависит от большого числа параметров, к которым относятся: степень заполнения формующей полости рассчитанным ограниченным объемом расплава, температура литьевой формы и степень равномерности распределения газа внутри каналов.

Технологические проблемы, которые могут возникнуть на стадии подачи газа и заполнении им формующей полости: продувание насквозь потока расплава — из-за недостатка материала в передней части газового пузыря; воздушные (газовые)

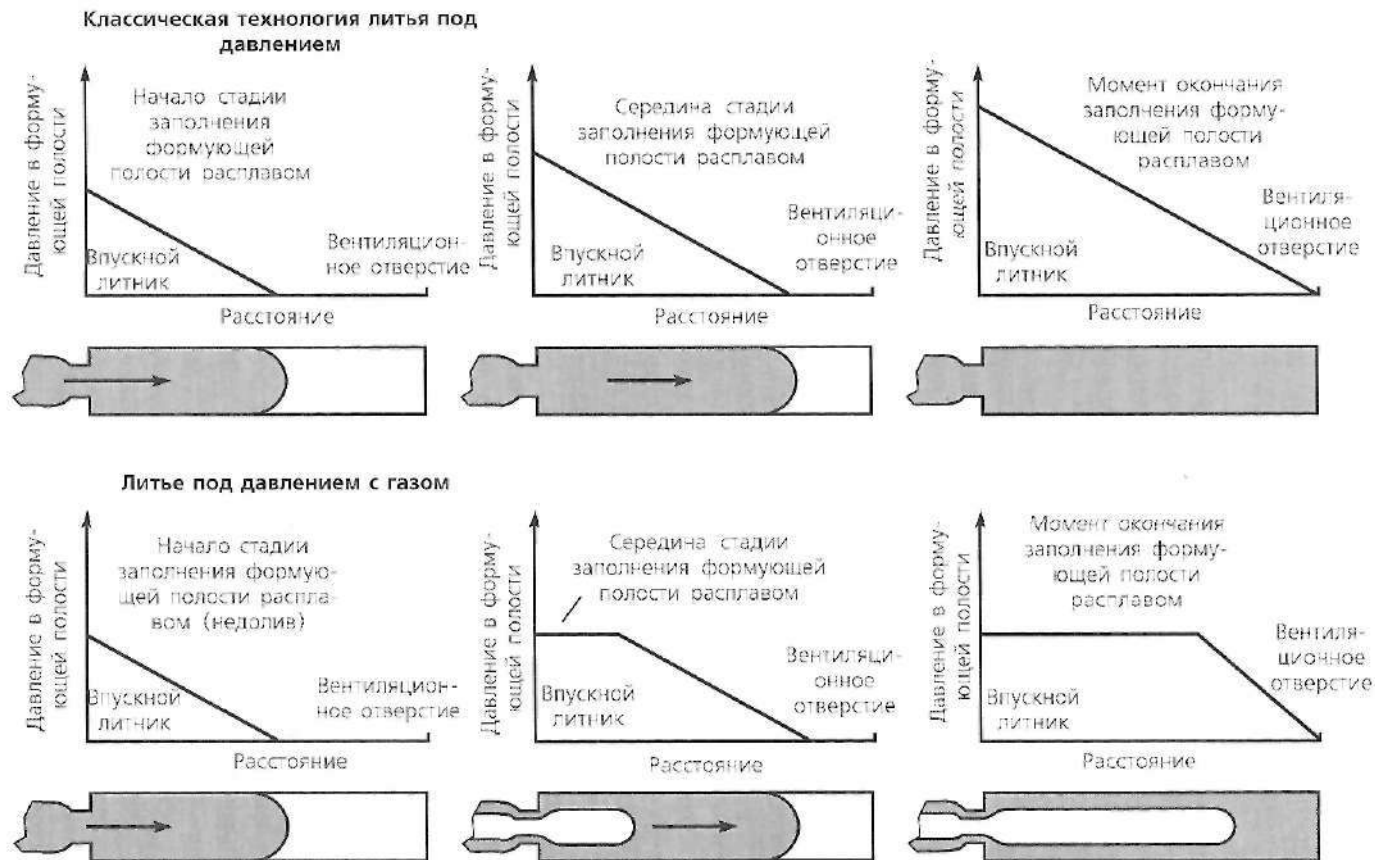


Рис. 2.106. Упрощенное представление процесса распределения давления в формирующей полости на стадии заполнения расплавом формирующей полости: для классической технологии литья под давлением термопластов (вверху) и для литья под давлением с газом (внизу)

пузыри — из-за возникновения кольцевых завихрений расплава вдоль газовых каналов; следы вибрации потока расплава — из-за задержки после впрыска подачи газа в формующую полость; недолив — из-за низкого давления или нерациональной конструкции изделия; проникновение газа в тонкостенные области изделия — также из-за кольцевых завихрений расплава, приводящих к возникновению большой разности давления вдоль канала [105]. Опасность проникновения газа в тонкостенные зоны должно быть предметом особого внимания, поскольку это негативно влияет на эксплуатационные, прежде всего, механические характеристики изделия.

Уплотнение расплава газом

После впрыска и заполнения формующей полости расплавом, давление газа внутри каналов поддерживается на определенном уровне, и, таким образом, обеспечивается воздействие газа на расплав. Поскольку каналы со сжатым газом распределены в различных зонах изделия с учетом его конфигурации, распределение давления в формующей полости должно быть достаточно равномерным, что является неперенным условием существенного уменьшения потенциальной склонности изделия к короблению. Поскольку материал изделия на стадии охлаждения в форме усаживается, для компенсации объемных изменений и уплотнения расплава производится вторичная подача газа. Наружные поверхности толстостенных зон изделия не будут иметь усадочных утяжин, так как в этих зонах внутри образованы полости, и, благодаря давлению газа, стенки плотно прижимаются к формующей полости и происходит их постепенное затвердевание. Усадка изделий в таких зонах скорее образуется с внутренней стороны изделия [103]. Слишком большое уплотняющее давление может стать причиной проникновения газа за пределы канала в область, прилегающую к стенке. Дефекты того же типа могут возникнуть при заполнении газом тонкостенных зон изделия [111].

Принципы конструирования изделий для их изготовления литьем под давлением

При конструировании изделий, которые будут изготавливаться литьем под давлением, крайне необходимо учитывать специфические технологические факторы (так как технологичность изделия есть функция перерабатываемое™ материала) так и требования, предъявляемые к готовому изделию. Это означает, что конструирование изделия, литьевой формы и выбор параметров процесса должны производиться одновременно, должен быть применен наиболее эффективный метод параллельного проектирования; при этом важно использовать средства компьютерного моделирования для оптимизации конструкции изделия и параметров технологического процесса. Компьютерное моделирование процесса необходимо при создании изделий литьем под давлением с газом, поскольку этот процесс сложнее хорошо изученной классической технологии литья под давлением, и ввиду его относительной новизны сравнительно небольшое число конструкторов обладают достаточно солидным опытом в этой области, хотя и установлены некоторые основные положения, которых следует придерживаться при освоении технологии литья под давлением с газом, но эмпирические правила не всегда применимы из-за сложности процесса [111].

Материалы

Литьем под давлением с газом успешно перерабатывается большинство термопластов, в том числе с наполнителями, армирующими добавками. Особенности

реологического поведения материалов, когда в формующей полости практически одновременно происходит перемещение расплава и газа, сильнее всего влияет на ход процесса и качество изделия [111,113,114].

Схема размещения каналов для подачи газа

Решение о схеме (сети) размещения газовых каналов является, возможно, наиболее ответственным в технологии литья под давлением с газом. Эта схема будет влиять как на качество (прочность) изделия, другие его функциональные параметры, так и на сам процесс (эффективность, воспроизводимость и т. д.) изготовления. Она предопределяет характер, направление перемещения газа и его воздействие на поток расплава в начальной стадии заполнения (недолива).

Потоки газа и расплава должны быть сбалансированы, поскольку газ и расплав будут перемещаться по пути наименьшего сопротивления. Следует избегать замкнутых каналов (в виде петли) [103]. Каналы должны быть сориентированы вдоль главного направления потока расплава и установлены таким образом, чтобы они заканчивались вблизи зоны, которая должна быть заполнена последней (где давление заполнения будет минимальным). Например, диагональные газовые каналы более предпочтительны для изделий прямоугольной формы с заполнением через один центральный литник. Добавление относительно толстых газовых каналов может вызвать затруднения, поскольку они очевидно влияют на характер заполнения формующей полости, увеличивается риск образования кольцевых завихрений вдоль таких каналов, которых следует избегать. С одной стороны, они могут приводить к образованию воздушных ловушек, а с другой — мешать заполнению газом каналов, уже полностью заполненных расплавом. Риск образования кольцевых завихрений меньше тогда, когда используется большое число каналов с небольшим сечением. В качестве альтернативного решения может быть подача газа напрямую в толстостенные зоны отливки (расположенные в этих зонах газовые каналы) [113]. Газовые каналы обычно располагаются со стороны нелицевой поверхности изделия и могут иметь, как и ребра, различные размеры и конфигурацию размещения. Толщина изделия в зоне расположения газовых каналов должна быть больше, чем толщина прилегающей стенки: это обязательное условие для формирования каналов, для эффективного распространения сжатого газа. Толщина стенки с каналом внутри нее должна быть, по крайней мере, в 2-3 раза больше «номинальной» толщины стенки. Газовые каналы большого сечения обеспечивают дополнительную жесткость, но когда сечение газовых каналов велико, возникает, как уже отмечалось, проблема кольцевых завихрений расплава. Большое количество каналов малого сечения устраняет эту проблему. Упрочняющие ребра могут использоваться вместе с газовыми каналами для повышения жесткости (рис. 2.107, 2.108) [103, 110-113]. Методика конструирования изделий с открытыми газовыми каналами описывается в работах [111-113]. Все существующие подходы в значительной степени базируются на использовании компьютерных программ С/Ш-моделирования. Главным при конструировании форм для литья под давлением с газом является обоснование выбора схемы, или сети, газовых каналов в объеме изделия, расчет размеров сечения и протяженности газовых каналов — чтобы добиться равномерного заполнения ограниченного объема расплава по формующей полости и равномерного распространения подаваемого газа. Следует еще раз отметить,

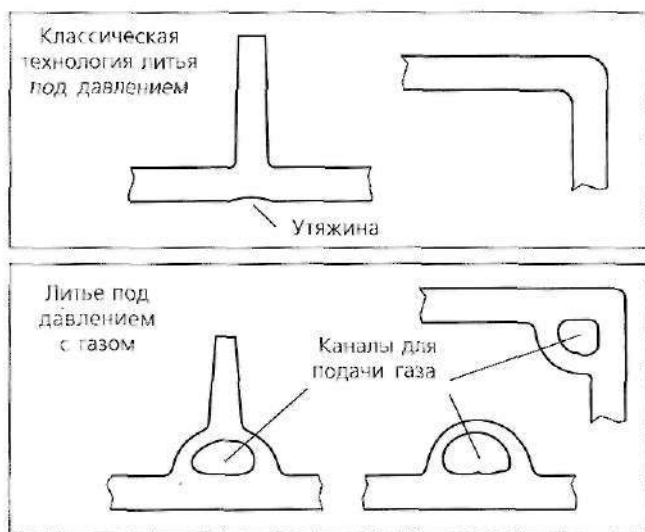


Рис. 2.107. Типичные варианты расположения каналов для подачи газа при литье под давлением с газом; каналы обычно встраиваются в углы, ребра или другие подобные элементы конструкции изделия (снизу)

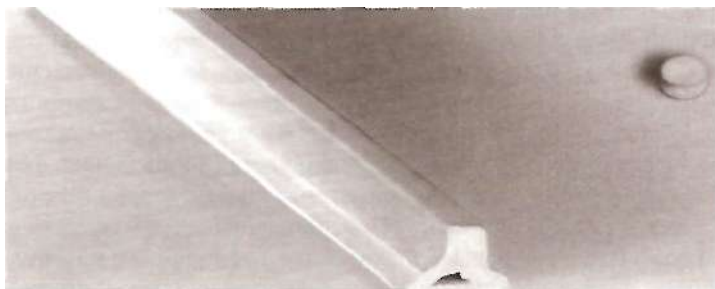


Рис. 2.108. Фотография поперечного сечения типичного канала для подачи газа

что на всех этапах конструирования и технологической подготовки производства важно базироваться на результатах компьютерного моделирования и анализа [114].

2.7.2. Литье под давлением термопластов со вспениванием

Общие положения

Литье под давлением изделий из вспенивающихся термопластов представляет собой модификацию классического литья под давлением: в отлитых изделиях образуется твердый наружный слой (возможно — регулируемой толщины), в сердцевине — ячеистая или пористая структура (рис. 2.109) [116-127]. Литье под давлением термопластов со вспениванием целесообразно выбирать для изготовления крупногабаритных

толстостенных конструкций. Распределение материала по принципу: твердая поверхность/пористая внутренняя часть идеально подходит для изделий, работающих под нагрузкой или испытывающих значительные внутренние напряжения. Прочный наружный слой (или оболочка) испытывает наибольшие напряжения растяжения или сжатия, а по менее прочной пористой сердцевине проходит зона малых напряжений. Вид разреза поперечного сечения изделия с пористой структурой показан на рис. 2.109[116].



Рис. 2.109. Типичный вид разреза изделия, изготовленного литьем под давлением со вспениванием: видны наружные твердые слои термопласта и пористая вспененная центральная часть (с разрешения *General Electric Plastics*)

Литье под давлением со вспениванием обладает рядом преимуществ: можно изготавливать сложные толстостенные изделия без усадочных утяжин и с низким уровнем внутренних напряжений, следовательно, мало склонных к короблению и другим видам деформации. Требования, предъявляемые к величине усилия смыкания литевых форм в большинстве случаев на порядок ниже, чем у классических процессов литья под давлением: это связано с относительно низким давлением в формующей полости. Низкое давление в формующей полости и меньшие усилия смыкания формы позволяют изготавливать формообразующие детали и литевую форму из алюминия или «мягкой» стали, получать крупногабаритные изделия с большой поверхностью в плоскости разъема формы. Перечисленные преимущества делают литье под давлением со вспениванием высокоэкономичным, энерго- и материалосберегающим процессом; он достаточно широко распространен для изготовления таких изделий, как корпуса кассовых аппаратов и компьютеров, большие бункеры-магазины, поддоны и другие крупные изделия, для которых главным эксплуатационным требованием является высокая прочность и жесткость, значительное сопротивление изгибу. Пористая структура сердцевины существенно, по сравнению с монолитным изделием, улучшает тепло- и звукоизоляционные характеристики изделия из того же термопласта. Общий термин «литье под давлением со вспениванием» распространяется на ряд технологий, позволяющих получать пористую структуру. Некоторые из них описываются ниже.

Литье под низким давлением со вспениванием

Литье под низким давлением со вспениванием наиболее распространено для получения пористых изделий из термопластов. Этот процесс может быть осуществлен на стандартном оборудовании для литья под давлением или на специальных машинах. Для этих процессов используются такие термопласты, как ПЭВП (более всего),

ПП, АБС-пластик, ПК, смеси АБС-пластик/ПК и модифицированный ПФО [117–121]. Термопласты, которые применяют для литья под низким давлением со вспениванием, содержат небольшое количество порообразователя, или порофора (вспенивающего агента). В качестве порообразователя обычно применяют химический порообразователь, который имеет температуру разложения, очень близкую к температуре переработки основного материала — термопласта. В определенный момент порообразователь разлагается, выделяя большие количества газа (двуокись углерода, азот и т. п.), и происходит вспенивание с образованием необходимого количества пористого материала. В специальных случаях вместо химического порообразователя используют физические порообразователи или сжатый газ.

Термопласт, применяемый для данного процесса, может поставляться в «полуготовом» виде, то есть с добавлением химического порообразователя, или этот порообразователь добавляется непосредственно на производстве либо в виде концентрированного порообразователя, либо за счет смешения порошка порообразователя с гранулами основного материала — термопласта.

Производственные способы введения порообразователя требуют проведения дополнительных технологических операций и оборудования, они позволяют производителю легко менять и оптимизировать концентрацию порообразователя для каждого конкретного изделия. Термопласт, образующий пористую структуру, может содержать и другие добавки, например, тонко диспергированные неорганические порошки, которые добавляются в качестве центров кристаллизации — для обеспечения равномерного формирования пористой структуры. Литье под низким давлением со вспениванием относится к процессам с коротким впрыском (недоливом), но начинается он с пластикации системы «термопласт/химический порообразователь» в материальном цилиндре машины. В ходе пластикации химический порообразователь разлагается, выделяя газ, большая часть которого на этой стадии остается в растворенном состоянии под давлением. Затем осуществляется короткий впрыск в формующую полость. Продолжительность короткого впрыска обычно на 10–35 % короче нормального и зависит от размеров, в первую очередь, глубины формующей полости и требований к плотности материала изделия после образования пористой структуры. При этом образуется плотный поверхностный слой, поскольку пузырьки газа вблизи поверхности формы разрушаются под воздействием механических сил сжатия [118].

Формующая полость хорошо вентилируется, газы продолжают перемещаться, заставляя впрыснутую дозу расплава заполнять удаленные зоны полости и одновременно вспениваться, создавая пористую структуру. Таким образом, завершается этап заполнения формующей полости. Давление газа продолжает равномерно действовать во всех направлениях, в том числе на слои, прилегающие к формующей поверхности формы, которые в таких условиях способствуют эффективному устранению утяжин на поверхности изделия. По сравнению с классическим литьем под давлением, литье под давлением со вспениванием позволяет значительно уменьшить усадочные напряжения в изделии и его склонность к короблению. Это происходит благодаря относительно равномерному распределению давления в формующей полости, а также вследствие сдвиговой упругой деформации пористой центральной зоны. Но при этом наблюдаются значительные градиенты плотности материала вдоль пути перемещения

потока вспененного расплава, зависящие от особенностей конструкции изделия и условий переработки. К моменту выталкивания изделие должно иметь температуру, при которой приобретает достаточную жесткость, чтобы без деформации выдерживать усилия, возникающие при выталкивании, и чтобы сопротивляться внутреннему давлению газа, которое, в отличие литья под давлением с газом, нельзя уменьшить за счет вентиляции. Если не была достигнута достаточная жесткость, остаточное давление газа может вызывать проявление эффекта роста (увеличения) толщины изделия.

Несмотря на то что процесс литья под низким давлением со вспениванием может быть использован для получения прочных отливок большой толщины без утяжин и почти свободных от внутренних напряжений, по сравнению с классическим литьем под давлением у него существуют определенные недостатки. Чем толще стенки с пористой внутренней структурой, тем дольше цикл литья. Стенка большой толщины требует больших затрат материала по сравнению с тонкостенными изделиями, получаемыми по классической технологии, но с добавлением ребер. Толщина стенок при наличии пористой структуры может изменяться от наименьшей 4,0 (тонкостенное литье с образованием пористой структуры) до 9,0 мм, при этом наблюдается уменьшение плотности материала на 10-35 % (наиболее часто уменьшение плотности материала находится в пределах 15-20 %). Чем ниже плотность материала, тем хуже качество поверхности. Однако довольно сложно добиться большего, чем указанное, уменьшения плотности материала в тонкостенных изделиях с пористой структурой.

Когда изделия с пористой структурой имеют неровную толщину стенок, место выпуска лучше располагать в тонкостенной зоне отливки, поскольку в этом случае газу будет легче заполнить толстостенные зоны. В отличие от классического процесса литья под давлением монолитных изделий, проблемы с преждевременным затвердеванием толстостенной зоны не возникают, поскольку для литья под низким давлением со вспениванием используется короткий впрыск, а уплотнение происходит после заполнения формирующей полости расплавом с газом и под воздействием давления газа. Широкому использованию процесса литья под давлением со вспениванием препятствует относительно невысокое качество поверхности изделия. При заполнении формирующей полости расплавом и контакте с ее поверхностью пузырьки исчезают, но из-за реальных проблем с вентиляцией полости и образованием затвердевшего слоя на поверхности отливки образуются заметные после выталкивания изделий «выцветшие»

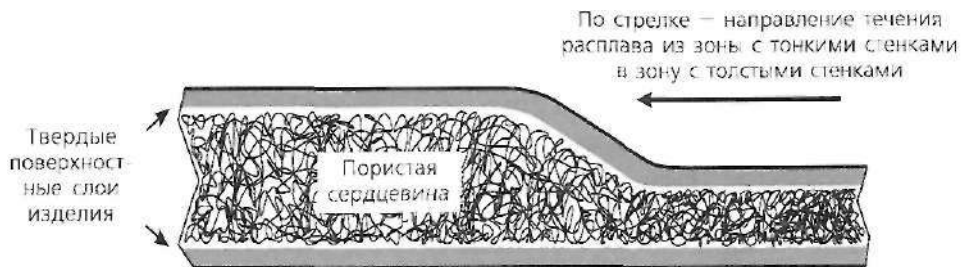


Рис. 2.110. Схема структуры изделия из термопласта с участком клиновидного изменения толщины (между твердыми слоями — пористая структура)

пятна и шероховатые следы, завихрения [122]. Более высокое качество поверхности у тонкостенных изделий с пористой структурой получается за счет относительно большего (на единицу толщины) давления, благодаря чему до некоторой степени сглаживаются шероховатости поверхности. Проблема качества поверхности литых под давлением изделий останется основной в большинстве случаев, хотя, увеличивая скорость впрыска, можно добиться некоторого ее улучшения. В некоторых случаях «завихрения» намеренно усиливают различными технологическими приемами, что позволяет сформировать внешний вид, близкий к текстуре дерева (могут быть также использованы специальные средства для текстурирования поверхности), но не всегда удастся получить специфически структурированную поверхность требуемого рисунка. Во многих случаях изделия, полученные литьем под давлением с пористой структурой, окрашиваются, что позволяет улучшить качество поверхности. Обычно для этого выполняют несколько последовательных шагов: обработку песком/шпаклевание, грунтовку, нанесение основного цвета и текстурирование поверхности. Окрашивание существенно увеличивает стоимость изделия, а также существенно удлиняет производственный цикл, так как необходима длительная выдержка изделий — от окончания литья и до окрашивания, чтобы дожидаться полного удаления газов.

Рекомендации по конструированию изделий с пористой структурой в основном аналогичны рекомендациям для монолитных изделий, получаемых по классической технологии литья под давлением изделий: например, назначение достаточно больших углов уклона, радиусов закруглений и т. п. Следует принимать во внимание и другие факторы, к которым, в частности, относятся формирование линии спая и образование кольцевых завихрений. Целостность линий спая может стать существенной проблемой из-за сложностей в отношении полного удаления газа, вентиляции полости, а также относительно низких давлений в формующей полости. Поэтому особенно важно избегать любых препятствий, затрудняющих течение потока расплава, особенно в тонкостенных зонах изделия (рис. 2.111).

Общая трехслойная композиция структуры отливки усложняет задачи, связанные с конструированием изделия. Механические и другие эксплуатационные характеристики изделия с пористой структурой — особенно ударопрочность — значительно

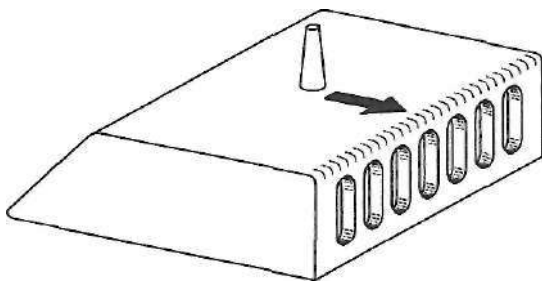


Рис. 2.111. Конструктивные элементы изделий с пористой структурой (поднутрения, решетки, отверстия и т. и.) должны быть ориентированы вдоль направления течения расплава, чтобы не затруднять заполнение формующей полости, как это показано для корпуса с вентиляционными решетками

зависят и от поверхностного слоя, и от структуры пор, плотности материала сердцевины. При конструировании таких изделий, особенно ответственного назначения, целесообразно представлять их подвергающимися изгибающим нагрузкам с максимальной концентрацией напряжений на поверхности. Понятно, что прочностные характеристики пористой сердцевины существенно меньше, чем у плотного поверхностного слоя. Это может создать проблемы при сборке изделий с пористой структурой с помощью самонарезающих винтов.

В отличие от монолитных изделий в изделиях с пористой структурой сложнее рассчитать возможные деформации и напряжения, которые возникают под действием внешних нагрузок. Для расчетов обычно используются значения объемного модуля упругости. Если бы были известны по-отдельности механические характеристики твердого поверхностного слоя и пористой сердцевины, то для прогнозных оценок конструктор мог бы использовать теорию изгиба композиционных слоев (структур). К сожалению, конструктору заранее неизвестны ни толщина, ни плотность каждого слоя. Слои не имеют ясно выраженной границы раздела (фактически это пограничная зона между сплошной поверхностью и пористой сердцевиной). Поэтому любые расчетные схемы дают лишь приблизительные оценки. Вне зависимости от используемых схем конструктору необходимо иметь в виду значительные изменения плотности по объему изделия. Неравномерная плотность материала является большой проблемой для многогнездных литьевых форм при литье под низким давлением, поскольку заполнение гнезд (например, в случае семейных форм) происходит неравномерно.

Иногда для литья под низким давлением со вспениванием выбирают термопласты, наполненные волокнами (например, стеклянными), что придает изделию дополнительную жесткость и прочность [121-125]. Волоконный наполнитель способствует проявлению анизотропии механических свойств; анизотропия усадочных свойств в этом случае выражена в меньшей степени, чем при классическом литье под давлением изделий из таких же материалов. Следует отметить, что с уменьшением концентрации армирующих волокон уменьшается величина продольной усадки.



Рис. 2.112. Механические свойства вспененных пористых термопластических структур, армированных волокнами, зависят как от уменьшения плотности, так и от ориентации волокон

Литье под низким давлением со вспениванием и с противодавлением в формующей полости

Литье под низким давлением со вспениванием и с противодавлением в формующей полости (сокращенно — литье с противодавлением) является модификацией литья под низким давлением со вспениванием (см. выше), но позволяет получать изделия улучшенного внешнего вида и с повышенными механическими, эксплуатационными характеристиками. Литье с противодавлением более сложно, чем литье под низким давлением без противодействия в формующей полости, поскольку требуется дополнительное относительно дорогостоящее оборудование и строгое регулирование всех стадий технологического процесса. Но благодаря уменьшению затрат на последующую дополнительную обработку поверхности изделия, возможно получить существенную экономию [117,120,122,123]. Основное отличие литья с противодавлением от других технологий в том, что в формующую полость подается газ (обычно сжатый азот) до впрыска расплава термопласта с порообразователем. Впрыск расплава в формующую полость, находящуюся под давлением сжатого газа, задерживает расширение газов порообразователя (то есть вспенивание) до того момента, пока большая часть объема впрыска не попадает в полость, после чего газ, создающий противодействие, удаляется. Задержка момента вспенивания требуется для того, чтобы успел затвердеть, сформироваться поверхностный слой до расширения газа (то есть до образования пористой структуры). Несмотря на то что изделие, получаемое литьем с противодавлением, также требует окраски, когда внешний вид изделия является решающим фактором, эта операция упрощается до такой степени, что достаточно наносить только один слой краски. В целом, литьем с противодавлением получают изделия с более равномерной структурой пор и поверхностными слоями большей толщины. Более высокая плотность материала изделия влияет на качество поверхности, а более равномерное по изделию соотношение трещин поверхностный слой/пористая сердцевина приводит к значительному улучшению механических свойств (по сравнению с литьем под низким давлением без противодействия в формующей полости). Например, для защелок и других изделий, полученных по данной технологии, значительное увеличение прочности материала на разрыв обеспечивает дополнительную безопасность и гибкость конструкции [122,123].

Литье с противодавлением требует точного последовательного выполнения операций: нагнетания давления газа, заполнения формы расплавом с порообразователем и вентиляции формующей полости. Литьевые формы для литья с противодавлением должны быть в состоянии выдерживать повышенное давление. Как правило, это достигается за счет применения кольцевых прокладок под поверхности контакта полуформ и пуансона, под толкатели системы выталкивания и т. п. (существующие формы для литья под низким давлением со вспениванием обычно можно приспособлять для литья с противодавлением). Следует отметить, что можно уменьшить протяженность путей течения расплава на 10-20 % из-за дополнительного сопротивления заполнению полости [122]. Существуют некоторые ограничения возможностей, но литье с противодавлением обладает рядом фундаментальных преимуществ по сравнению с литьем под низким давлением со вспениванием, а именно:

- 1) высокое соотношение жесткость при изгибе/масса;
- 2) меньшее количество усадочных утяжин;

- 3) малая склонность к короблению;
- 4) низкое давление в формирующей полости;

В итоге появляется возможность получать изделия с более высоким качеством поверхности и улучшенными механическими характеристиками.

Литье под высоким давлением со вспениванием

Существует несколько более редких, чем литье под низким давлением, технологий литья со вспениванием, например, литье под высоким давлением. Давление в формирующей полости, которое создается для реализации этой технологии, такое же по величине, как и при классическом литье под давлением. Следовательно, требуются значительно большие усилия смыкания полуформ и прочность, жесткость литевой формы, чем назначаемые при литье под низким давлением. Литье под высоким давлением начинается с впрыска вспененного расплава с порообразователем в формирующую полость, которая полностью заполняется и уплотняется, как и при литье под давлением монолитных изделий. После того как произойдет формование сплошного поверхностного слоя, снимается «задержка», расплав начинает расширяться благодаря снижению давления от перемещения пуансона или смещения специальных плит в полуформах. Такой процесс дает возможность получить высококачественные изделия точных массы и размеров, а также добиться качественной поверхности с высокими эстетическими показателями.

К сожалению, литье под высоким давлением со вспениванием может быть эффективно только для изготовления изделий относительно простой геометрической формы, к тому же формирующий инструмент для этой технологии стоит достаточно дорого [116,120].

2.7.3. Многокомпонентное литье под давлением¹

К настоящему времени разработаны и успешно в промышленных масштабах применяются несколько способов литья под давлением многокомпонентных изделий различного назначения. Реализация любого из таких способов требует специально сконструированных литевых машин с двумя или более узлами впрыска. Каждый из этих узлов пластицирует и впрыскивает один из компонентов, например, термопласты различных цветов, марок и т. п.

Изделия двух (или более) цветов используют для клавиш компьютерной клавиатуры, для линз автомобильных фар. По существу, в литевых формах происходит своеобразная сварка, при которой одна часть изделия отливается с использованием одного термопласта, а вторая часть — из другого термопласта, который «наплавляется» на первый после того, как форма или какое-то из изделий произведет необходимое перемещение, чаще всего — вращение (см. раздел 6.4.2.3).

¹ Термин «многокомпонентное литье» введен здесь впервые. Авторский вариант: «*co-injection*» (по аналогии с «*co-extrusion*» в русском техническом лексиконе как соэкструзия), в буквальном переводе был бы недостаточно четок, т. к. содержание термина «многокомпонентное» — многозначно: это два или несколько разных термопластов; это один и тот же, но по-разному окрашенный термопласт, или разные термопласты; это два или несколько разных типов термопластов, технологически совместимых друг с другом и т. д. — *Примеч. науч. ред.*

Другой способ многокомпонентного литья под давлением — двухкомпонентное (сэндвич) литье [128-130]. Эта технология аналогична процессу соэкструзии, но здесь происходит формирование многослойной структуры. Для этого осуществления требуется литьевая машина с двумя узлами впрыска и шнеками, которые совершают возвратно-поступательные движения, снабженными автономными модулями управления впрыском. Во время впрыска оба материала поступают через специальный блок с одним соплом и одной литниковой системой в формующую полость. Сопло представляет собой сложный модуль, который «заставляет» один термопласт обволакивать (не смешиваясь) второй компонент, создавая, таким образом, двухслойную конструкцию с поверхностью из одного материала и центральной частью из другого.

Типичный процесс многокомпонентного литья под давлением начинается с впрыска более прочного компонента, из которого образуется наружный слой изделия. Сразу после начала впрыска этого компонента начинается впрыск другого, в том числе и вспенивающегося компонента, — для заполнения центральной зоны, а затем продолжается впрыск совместно обоих компонентов. В определенный момент подача первого (для наружного слоя изделия) прекращается, а впрыск второго компонента продолжается — до завершения стадии заполнения формующей полости. Слоеная структура отливки создается в процессе заполнения формующей полости за счет того, что разные расплавы пластицируются в разных узлах впрыска, проходят через разные системы впрыска, и поступающие в формующую полость потоки являются ламинарными. Это предотвращает смешение различных потоков-слоев и приводит к тому, что один материал становится как бы упакованным в другой с заранее рассчитанным и воспроизводимым соотношением толщин поверхностный слой/центральная зона [125,127].

Несмотря на обязательное применение специальных литьевых машин для многокомпонентного литья (что влияет на себестоимость готовой продукции), благодаря технологическим преимуществам и высоким эксплуатационным характеристикам изделий, можно получить значительный экономический эффект. Материал для образования поверхностного слоя изделия подбирается с учетом требований к качеству и цвету поверхности, а также в зависимости от необходимых эксплуатационных параметров (износостойкость, химическая стойкость и т. п.). Для заполнения центральной зоны выбирается либо вспенивающийся термопласт с химическим порообразователем — для толстостенных изделий, либо «сплошной», не вспенивающийся, сохраняющий стабильность размеров, либо «жесткий» материал, упрочненный волокнами. Если для центральной зоны выбирается облегченный пористый материал, многокомпонентное литье под давлением дает возможность получать изделия с пористой структурой и плотной поверхностью очень хорошего качества. Для тонкостенных изделий, как правило, используется сплошной материал по всему объему отливки. Многокомпонентное литье под давлением с центральной зоной, заполненной упрочняющими волокнами термопластом, дает возможность существенно улучшить многие эксплуатационные характеристики изделий.

Такая технология переработки применяется для производства:

1) высокоточных изделий со стабильными размерами и высоким качеством поверхности, для поверхностного слоя которых используются базовые термопласты без наполнителей, а для центральной зоны — армированные термопласты;

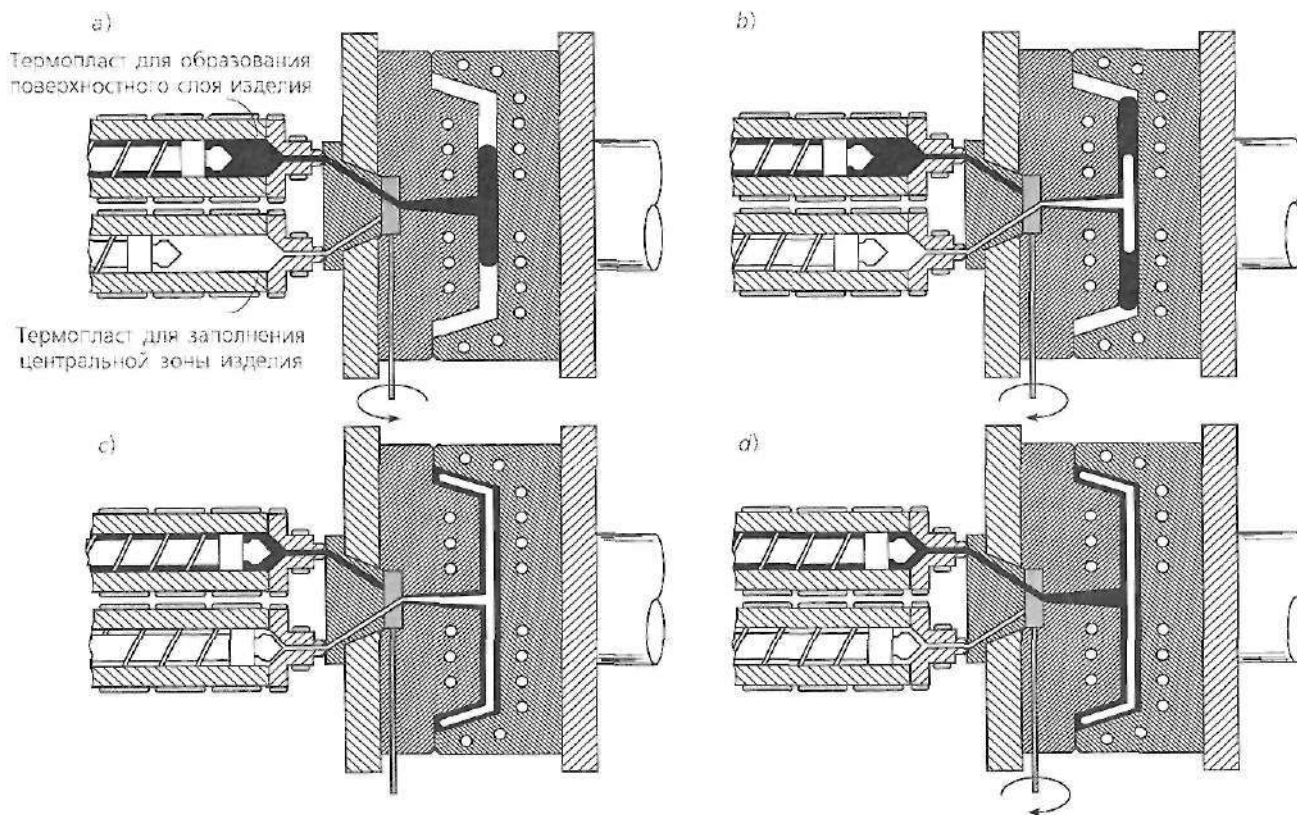


Рис. 2.113. Схема основных стадий многокомпонентного литья под давлением: *a* — на начальной стадии заполнения формирующей полости осуществляется впрыск термопласта для образования поверхностного слоя изделия; *b* — на промежуточной стадии впрыска термопласт, предназначенный для заполнения центральной зоны изделия, поступает в центр формирующей полости; *c* — после завершения впрыска термопласта для центральной зоны (когда она уже почти заполнена) неповрежденный поверхностный слой равномерно покрывает массу, находящуюся в центральной зоне; *d* — после завершения впрыска термопласта для центральной зоны изделия, клапан возвращается в исходное положение, очищается и подготавливается к следующему циклу

2) корпусов электронных приборов с защитой от электромагнитных помех, у которых в центральной зоне материал, армированный металлическими проводящими волокнами, а поверхностный слой — из неаполненного термопласта;

3) изделий с поверхностью высокого качества, в которых для заполнения центральной зоны используется повторно переработанный материал или материал с низкими техническими характеристиками.

Это процесс привлекателен с практической точки зрения, поскольку материал для центральной зоны занимает от 50 до 60% всего объема изделия, что позволяет добиваться существенной экономии при изготовлении многих изделий. Многокомпонентное литье под давлением можно использовать для получения изделий различного назначения, геометрической формы и при этом применять большинство из известных термопластов. Однако существуют некоторые ограничения на их комбинации друг с другом. К параметрам, которые следует учитывать на практике, относятся вязкость расплавов и значения усадки (они должны быть близкими), а также должна учитываться адгезионная совместимость материалов [129]. На практике бывает очень трудно добиться равномерного создания структуры поверхностный слой/центральная зона по всему изделию, особенно в таких областях, где расположены ребра и бобышки, при формообразовании которых вынужденно используются, как правило, только «поверхностный» материал. Многокомпонентное литье под давлением используется уже многие годы, но пока его нельзя назвать широко распространенным, хотя, вне всякого сомнения, преимущества гарантируют более широкое использование.

2.7.4. Литьеовое прессование (компрессионное литье)

В последние годы разработаны различные способы литьеового прессования, позволяющие решать фундаментальные проблемы, возникающие перед классическим литьем под давлением. Основное преимущество компрессионного литья заключается в возможности изготавливать изделия стабильных и точных размеров, без внутренних напряжений, при низких усилиях смыкания/размыкания формы (обычно на 20-50 % ниже, чем при классическом литье под давлением). Они позволяют получать точные тонкостенные изделия даже при использовании вязких марок термопластов и протяженных путей течения расплава. Возможности существенного уменьшения внутренних напряжений в изделиях делает компрессионное литье идеальной технологией для получения оптически однородных изделий, например, отливок для линз [131-133].

По-существу, компрессионное литье очень похоже на трансферное литье, при котором доза пластицированного расплава подается в открытую формующую полость, а затем подвергается сжатию. Различные способы (модификации) компрессионного литья имеют общие стадии: последовательно выполняется впрыск, затем сжатие (компрессия). Впрыск заранее определенного объема расплава производится в частично открытую формующую полость — между двумя полуформами (матрицей и пуансоном) остается зазор, величина которого обычно в два раза больше номинальной толщины изделия; большой зазор позволяет снизить давление литья при заполнении формующей полости и ускорить впрыск материала. Смыкание формы осуществляется после впрыска, при этом расплав выдавливается в незаполненные зоны формующей полости; важно предотвратить вытекание расплава из формы, для чего

используются специальные конструкции форм с отжимными краями, плотно закрывающими полуформы. Существует способ компрессионного литья, в котором стадия сжатия и впрыска происходят одновременно; обе стадии завершаются, когда в термопластавтомате образуется так называемая «подушка» [131].

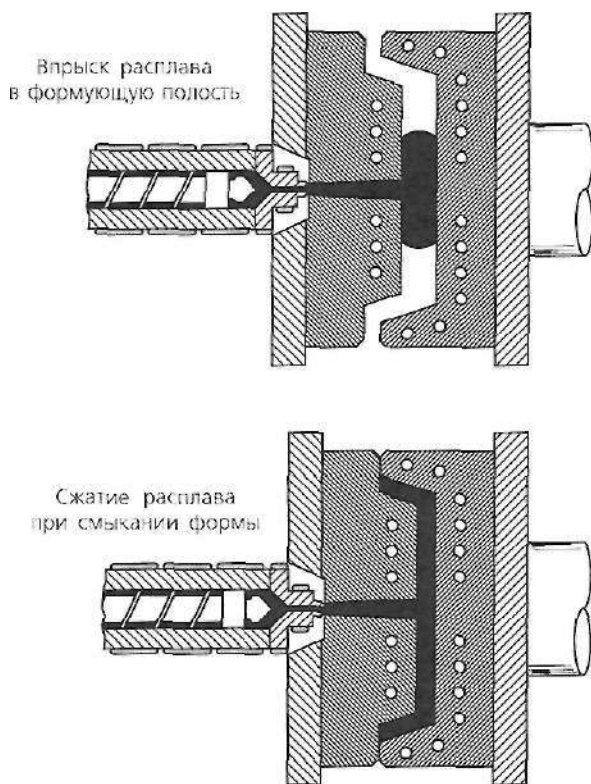


Рис. 2.114. Основная схема компрессионного литья

Компрессионное литье лучше всего применять для получения полых изделий, но также и для изделий различной геометрической формы, при условии расположения мест впуска, гарантирующих сбалансированное заполнение формующей полости. Процесс может быть использован для изготовления оптических дисков и колпаков для автомобильных колес (использование центрального литника для впрыска в изделия круглой формы идеально для получения сбалансированного радиального потока расплава). Потенциальным недостатком компрессионного литья является образование круговых следов или матовой зоны, которые появляются на поверхности изделия из-за резкого прекращения потока расплава (и охлаждения фронта потока), которое происходит между стадиями впрыска и сжатия.

Чтобы, по возможности, уменьшить негативные эффекты, следует применять специальные формы и оборудование для компрессионного литья [131].

2.8. Литература

1. Catoen, B., *Plastics Engineering*, 49, (2), 21 (1993).
2. Menges, G. and Mohren, P., *How to Make Injection Molds*, Hanser, NY (1986).
3. Uou, M. and Suh, N., *Polymer Engineering & Science*, 29, (7), 441 (1989).
4. Fritch, L., *SPE Annual Technical Conference*, 36, 302 (1990).
5. Parkas, R., «Development of Molding Area Diagram Analogs», M. Thesis, Department of Plastics Engineering, University of Massachusetts Lowell (1991).
6. Willey, S. and Ulmer, A., *SPE Annual Technical Conference*, 32, 173 (1986).
7. Thompson, M. and White, J., *Polymer Engineering & Science*, 24, (4), 227 (1984).
8. Cox, H. and Mentzer, C., *Polymer Engineering & Science*, 26, (1), 488 (1986).
9. Siegmann, A., Kenig, S., and Buchman, II., *Polymer Engineering & Science*, 27, (14), 1069 (1987).
10. Cricns, R., Handler, M. and Mosle, H., *Kunststoffe*, 75 (8), 507 (1985).
11. Cloud, P. and Alvord, R., *Plastics Design Forum*, 4, (5), 85 (1979).
12. Moldflow Ply. Ltd., 2 Corporate Drive, Sheldon, CT 06484.
13. Structural Dynamic Research Corporation, 2000 Eastman Drive, Milford, OH 45150.
14. AC Technolgy, 31 Dutch Mill Road, Ithaca, NY 14850.
15. Plastics and Computer Inc., 14001 Dallas Parkway, Suite 1200, Dallas TX 75240.
16. Rauwendaal, C., *Polymer Extrusion*, Hanser Publishers, NY (1990).
17. Mehta, K., *Annual Structural Plastics Conference*, Society of the Plastics Industry, 242 (1993).
18. Technical Bulletin, «Engineering Materials Design Guide», General Electric Plastics, Pittsfield, MA (1989).
19. Gastrow, H., *Injection Molds*, 102 Proven Designs, Hanser Publishers, NY (1983).
20. Miller, E., *Plastics Product Design Engineering Handbook*, Part A, Marcel Dekker, Inc., NY (1981).
21. Tomari, K., Tonogai, S. and Harada, T., *Polymer Engineering & Science*, 30, (15), 931, (1990).
22. Jong, W., and Wang, K., *SPE Annual Technical Conference*, 36, 197 (1990).
23. Lautenbach, S., Wang, K., Chiang, H., and Jong, W., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 372 (1991).
24. Kim, S., and Suh, N., *Polymer Engineering & Science*, 26, (17), 1200, (1986).
25. Fisa, B., and Rahmani, M., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 396 (1991).
26. E. Bernhardt, ed., *CAE for Injection Molding*, Hanser, NY (1983).
27. Janicki, S., and Peters, R., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 391 (1991).
28. Knasnecky, D., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 363 (1991).
29. Yokoi, H., Murata, Y., Oka, K., and Watanabe, H., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 367 (1991).
30. Lalande, F., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 404 (1991).
31. Dharia, A., and Wolkowicz, M., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 1149 (1991).
32. Worden, E., and Kusion, S., *SPE Annual Technical Conference*, 37, 2653 (1991).
33. Brewer, G., *SPE Annual Technical Conference*, 33, 252 (1987).
34. Malloy, R. and Brahmhatt, S., *SPE Annual Technical Conference*, 38, (1992).

35. Technical Bulletin, Cloud, J. and McDowell, P., Reinforced Thermoplastics: Understanding Weld-Line Integrity, LNP Engineering Plastics, Exton, PA.
36. Rahmani, M. and Fisa, B., SPE Annual Technical Conference, 37, 400 (1991).
37. Liou, M, Fang, L., and Ishii, K., SAMPE Symposium, New Materials & Processes, Tokyo, Japan, 1509(1989).
38. Ilagerman, E., Plastics Engineering, 29, (10), 67 (1973).
39. Malguarnera, S., and Manisali, A., SPE Annual Technical Conference, 27, 775 (1981).
40. Wndt, U., Kunststoffe, 78, (2) 10 (1988).
41. Boukhili, R. and Gauvin, R., Plastics & Rubber Processing Applications, 11,(1) 17(1989).
42. Cries, R., and Moslem, H., Polymer Engineering & Science, 23, (10), 591, and (1983).
43. Wright, R., Thermosets, Flanser, NY (1991).
44. Technical Bulletin, Hulls Corporation, Hatboro, PA.
45. Bevis, M., SPE Annual Technical Conference, 38, 442 (1992).
46. Technical Bulletin, Scortec, Inc., Gulph Mills, PA.
47. Kirkland, C, Plastics World, 49, (2), 37, (1991).
48. Malloy, R., Gardner, G., and Grossman, E., SPE Annual Technical Conference, 39, 521 (1993).
49. The Berge.J., Plastics Engineering, 47, (2), 27, (1991).
50. Klockncr Ferromatik Desma, Erlanger, KY.
51. Michaeli, W, and Galuschka, S., SPE Annual Technical Conference, 39, 534(1993).
52. Gardner, G., and Malloy, R., SPE Annual Technical Conference, 40 (1994).
53. Austin, C, SPE Annual Technical Conference, 34, 1560 (1988).
54. Putsch, G. and Mikhail, W., SPE Annual Technical Conference, 36, 355 (1990).
55. Lee, M., et al., SPE Annual Technical Conference, 34, 288 (1988).
56. Santhanam, N. and Wang, K., SPE Annual Technical Conference, 36, 277 (1990).
57. Austin, C, Warpage Design Principles, Moldflow Pry. Ltd., Kilsyth, Victoria, Australia (1991).
58. Liou, M., et al., SPE Annual Technical Conference, 36, 288 (1990).
59. BrallaJ., ed., Handbook of Product Design and Manufacturing, McGravv Hill, NY (1986).
60. Spensor, R., and Gilmore, C, Modern Plastics, 28 (_) 97 (1950).
61. Whelan, A., Injection Molding Materials, Applied Science Publishers, 168 (1982).
62. ASTM D955, Standard Test Method for Measuring Shrinkage from Mold Dimensions of Molded Plastics, Annual Book of ASTM Standards, 8.01 (1991).
63. Nobler, R., Plastics Engineering, 49 (5), 23 (1991).
64. Seep, M., SPE Annual Technical Conference, 37, 238 (1991).
65. Rohm, C and Her, P., SPE Annual Technical Conference, 34, 1135 (1988).
66. Anonymous, Plastics Design Forum, 4, (2), 61 (1979).
67. Bernhardt, E., Plastics Design Forum, 14, (5), 61 (1989).
68. Customs and Practices of the Mold Making Industry: Classification of Injection Molds for Thermoplastic Materials, Society of the Plastics Industry, Washington DC (1989).
69. Chiang, H., ET. al, SPE Annual Technical Conference, 37, 242 (1991).
70. Sanschagrin, B., SPE Annual Technical Conference, 35, 1051 (1989).
71. Gupta, M., and Wang, K., SPE Annual Technical Conference, 39, 2290 (1993).
72. Cloud, P. and Wolverton, M., Technical Bulletin, «Predicting Shrinkage and Warpage of Reinforced and Filled Thermoplastics», LNP Engineering Plastics, Exton, PA.

73. Technical Bulletin, «Valox Injection Molding», General Electric Plastics, Pittsfield, MA (1988).
74. Gallucci, R., et al., *Plastics Engineering*, 49 (5), 23 (1993).
75. Sors, L. and Balazs, *Design of Plastic Molds and Dies*, Elsevier Publishers, NY (1989).
76. Ballman, R. and Shusman, T., *Modern Plastics*, 37, 126 (1959).
77. ASTM D648, Standard Test Method for Deflection Temperature Under Flexural Load, Annual Book of ASTM Standards, 8.01 (1991).
78. ASTM D1525, Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, 8.01 (1991).
79. Burke, C. and Malloy, R., SPE Annual Technical Conference, 37, 1781 (1991).
80. Tobin, W., *Plastics Design Forum*, 14, (5), 25 (1989).
81. Society of the Plastics Industry, Washington, D.C.
82. Technical Bulletin, Mold-Tech Division of Roehlem Industries, Chicopee, MA 01013.
83. Gachter, R., and Muller, H., eds., *Plastics Additives Handbook*, Hanser, NY 300 (1985).
84. Daoust, H., and Stepick, J., *Additives for Plastics*, Springer-Verlag, NY, 39 (1983).
85. Siegman, T., *Kunststoffe*, 73 (), 25 (1983).
86. Hoffmann, H., *Kunststoffe*, SI (10), 59 (1991).
87. Daniels, V., Hamer, B., and Hannebaum, A., *Kunststoffe*, 79 (), 15 (1989).
88. Technical Bulletin, Poly-Plating, Inc., Chicopee, MA 01022.
89. Technical Bulletin, General Manipulate Corporation, Linden, NJ 07036.
90. Technical Bulletin, E / M Corporation, West Lafayette, IN 47906.
91. Technical Bulletin, Carolina Coating technologies, Inc., Conover, NC 28613.
92. Balsam, R., Hayward, D. and Malloy, R., Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference, 39, 2515 (1993).
93. Fallen, M., *Plastics Technology*, 36 (6), 41 (1990).
94. Dower, B., *Injection Molding*, / (2), 42 (1993).
95. Albrecht, E., Hirsch, K., Jasper, K., and Jeschonnek, P., *Automobil — Industrie*, 5, 449 (1990).
96. Hauck, C. and Schneiders, A., *Kunststoffe*, 77 (12), 1237 (1987).
97. Saltier, E., *Modern Plastics*, 71 (0)(1993).
98. Galli, E., *Plastics Design Forum*, 17, (4) 24 (1992).
99. Technical Bulletin, Roehr Tool Corporation, Hudson, MA.
99. Technical Bulletin, Roehr Tool Corporation, Hudson, MA.
100. DME Corporation, Madison Heights, MI.
101. Tarahomi, S., SPE Annual Technical Conference, 37, 1761 (1991).
102. Glanvill, A. and Denton, E., *Injection Mold Design Fundamentals*, Machinery Publishing Company, Ltd. (1963).
103. Shah, S., SPE Annual Technical Conference, 37, 1494 (1991).
104. Shah, S. and Hlavaty, D., SPE Annual Technical Conference, 37, 1479 (1991).
105. Turing, L., SPE Annual Technical Conference, 38, 452 (1992).
106. Wilder, R., *Modern Plastics*, 67 (2), 67 (1990).
107. Toensmeier, P., *Modern Plastics*, 69 (10), 69 (1992).
108. Moore, S., *Modern Plastics*, 70 (1), 26 (1993).
109. Simon, T., Annual Structural Plastics Conference, Society of Plastics Industry, 221 (1992).

- ПО. Tateyama, П., Annual Structural Plastics Conference, Society of Plastics Industry, 223(1992).
111. Medina, P., Annual Structural Plastics Conference, Society of Plastics Industry, 124 (1993).
112. Zubcr, P. and Gennari, A., Annual Structural Plastics Conference, Society of the Plastics Industry, 124(1993).
113. Turing, L., SPE Annual Technical Conference, 39, 74 (1993).
114. Koncke, E. and Cosmo, L., SPE Annual Technical Conference, 39, 79 (1993).
115. Rush, K., Plastics Engineering, 45, (7), 35, (1989).
116. Technical Bulletin SFR-28B, Engineering Structural Foam, General Electric Plastics, Pittsfield, MA 01201.
117. Peach, N., Plastics Design Forum, 19, (8), 19, (1976).
118. Anonymous, Plastics Design Forum, 1, (5), 36, (1976).
119. Farrar, M. and Baronet, D., Plastics Design Forum, 7, (4), 59, (1982).
120. Turner, N. and Koki, G., Plastics Design Forum, 5, (4), 60, (1980).
121. Malloy, R., Kadoka, P. and Horn Berger, L., SPI Structural Plastics Conference, 191 (1992).
122. Johnson, R., Plastics Design Forum, 10, (4), 94, (1985).
123. Anonymous, Plastics Design Forum, 7, (4), 73, (1982).
124. Technical Bulletin ESF-30, Conterpressure Processing, General Electric Pasties, Pittsfield, MA 01201 (1987).
125. Ysseldyke, D., Nimmer, R., and Stokes, V., Annual SPI Structural Foam Conference, 133 (1986).
126. Smoluk, G. and Daruas, R., Modem Plastics, 41, (W), 125, (1964).
127. Semerdjicv, S., Introduction to Structural Foam, Society of Plastics Engineers, Brookfield, CT(1982).
128. Theberge, J., Plastics Engineering, 47, (2), 27, (1991).
129. Anonymous, Plastics Design Forum, 6, (4), 61, (1981).
130. McRoskey, J., Annual SPI Structural Plastics Conference, 120, (1992).
131. Rasch, S., Annual SPI Structural Plastics Conference, 107, (1992).
132. Klepek, G., Kunststoffc, 77, (11), 13 (1987).
133. Masui, S., Hara, T, Matsumoto, M., Annual SPI Structural Plastics Conference, 112., (1992).
134. Himasckhar, K., et al., Advances in Polymer Technology, 12. (3), 233 (1993).
135. Himasckhar, K., et al, ASME Journal of Engineering for Industry, 114, 213 (1992).
136. Santhanam, N.. et al., Advances in Polymer Technology, 11, (2), 77 (1992).

3. Конструирование и выбор материала

3.1. Общие положения

Литье под давлением относится к высокопроизводительным технологическим процессам и может быть использовано для изготовления пластмассовых изделий достаточно сложной геометрической формы. Таким способом могут перерабатываться как термореактивные, так и термопластичные материалы, из которых изготавливаются изделия, удовлетворяющие самым разнообразным требованиям.

При конструировании изделий из пластмасс следует учитывать большое количество эстетических, функциональных и технологических требований. Существует множество способов организации производственного процесса, которые могут быть применены в разработке новых изделий. Исторически сложилось так, что новые изделия проектируются с помощью последовательной технологической подготовки, которая схематически показана на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Проектирование изделия с помощью «последовательной технологической подготовки производства»

Процесс последовательной технологической подготовки производства начинается с идеи, которую формулируют в отделе маркетинга (1). Там и выдвигаются основные требования к новому продукту. Этот отдел передает проект на следующую стадию разработки в отдел инженерного проектирования (2). Инженеры определяют общую форму и внешний вид изделия, а также органолептические свойства его поверхности, и решают вопросы, связанные с эргономикой. Как только получены первые прототипы изделия, их передают в отдел конструирования (3). Здесь осуществляется выбор материалов и тот производственный процесс, который, в конечном счете, будет использоваться для производства. Технологи в своих выводах опираются как на теоретический анализ, так и тестирование прототипа. Следующий этап осуществляют инженеры по изготовлению формующего инструмента (4), которые отвечают одновременно как за ее конструкцию, так и за ее изготовление.

Инженеры могут решить, что изделие предложенной геометрической формы трудно или даже невозможно отлить и его конструкция должна быть изменена. Изменения конструкции должны быть согласованы с другими проектными группами (например, с технологами, конструкторами изделия и т. д.). Процесс согласования может занять массу времени, поскольку изменение на любой стадии разработки может повлечь цепочку изменений на остальных. Наконец, исправленное изделие достигает финальной стадии — производства (5).

Такой подход к разработке изделия достаточно продуктивен, но он проигрывает по времени и затратам более эффективному подходу «параллельного проектирования». К основным недостаткам последовательного подхода к проектированию относятся его высокая стоимость и большие затраты времени, вызванные изменениями конструкции на последних стадиях проектирования. Ввиду ограниченности контактов между конструкторами формующего инструмента и изделия разработчики на ранних стадиях производственного процесса могут не учитывать фактов, значимых на последующих этапах разработки, например, того, что «нулевой уклон» влияет на сложность оснастки.

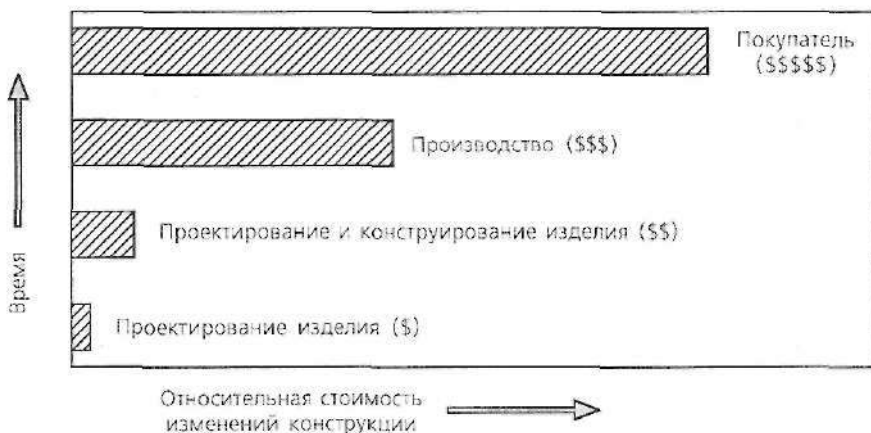


Рис. 3.2. Стоимость и время, связанные с изменениями в конструкции возрастают многократно к моменту окончательной подготовки изделия к производству

В последние годы процесс последовательной технологической подготовки производства очень часто заменяют технологией параллельного проектирования [1—3]. Иллюстрация параллельного проектирования может быть проиллюстрирована поворотом картинки на рис. 3.1 на 90° и удалением стенок (рис. 3.4). Возможно, наиболее важным аспектом этого метода является то, что процесс разработки становится ориентированным на команду и насыщается эффективными связями между отделами маркетинга, конструирования и производства. Очень часто все эти группы имеют доступ к проектированию на всех стадиях. Например, технолог, который отвечает за производство, может помочь принять оптимальное решение при выборе типа литниковой системы или выборе марки материала (с точки зрения процесса изготовления).

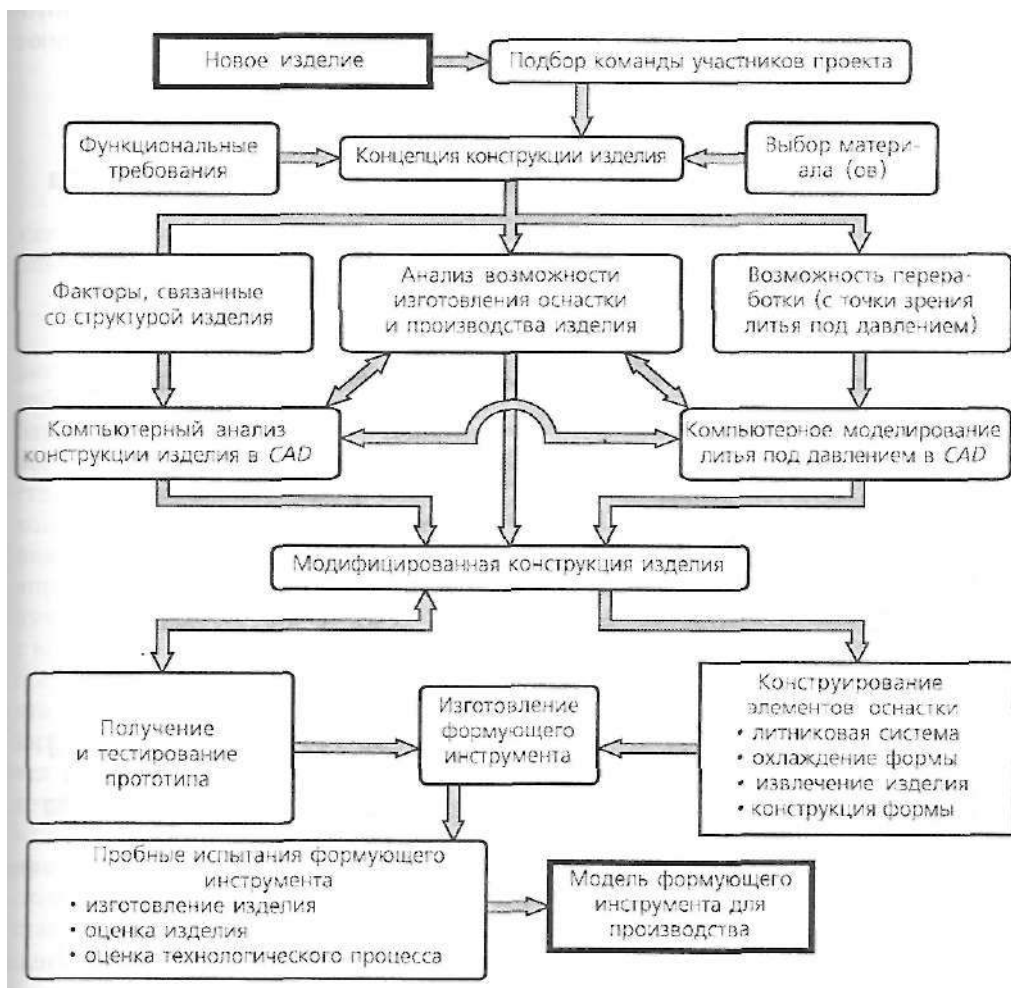


Рис. 3.3. Метод параллельного проектирования позволяет товару быстрее доходить до потребителя и значительно повышает качество товара

Это совершенно невозможно при использовании подхода последовательной технологической подготовки производства, где проблемы производства не принимаются во внимание до изготовления прототипа.

Другим преимуществом параллельного проектирования является возможность одновременной работы конструкторов и технологов. Существует большое количество работы по планированию и инженерной подготовке, которую можно выполнить одновременно. Благодаря технологии параллельной разработки, можно, например, заранее начать заказ стали и других компонентов, необходимых для изготовления формующего инструмента. В результате необходимое оборудование и материалы будут в наличии в тот момент, когда они понадобятся. На рис. 3.3 показано, что можно организовать несколько параллельных и взаимосвязанных производственных потоков [1]. Следовательно, достигается существенная экономия времени по сравнению с последовательным проектированием.

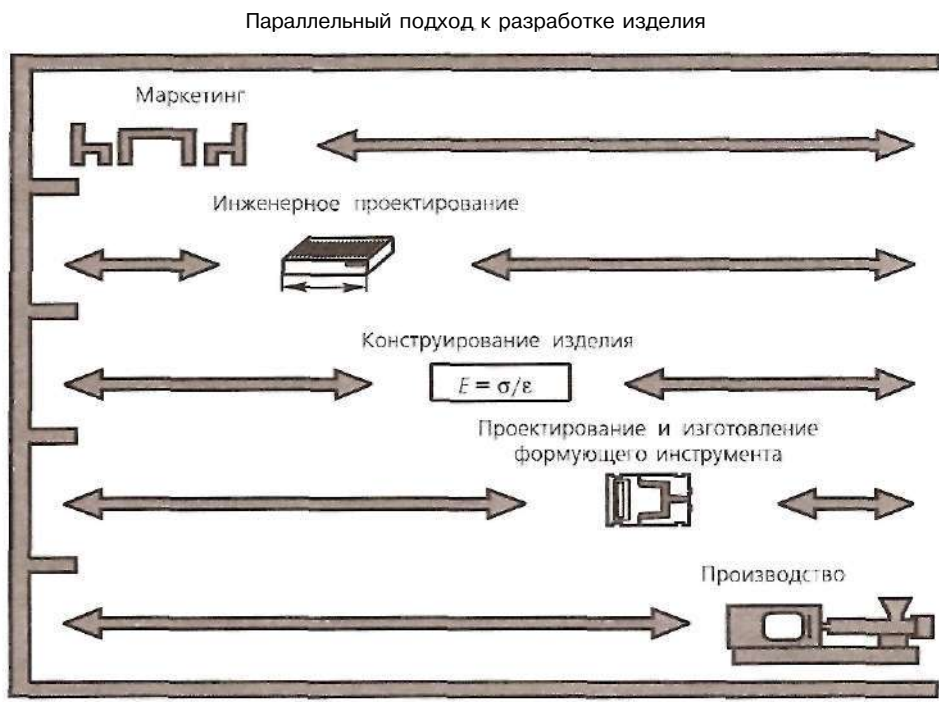


Рис. 3.4. Параллельное проектирование изделия сокращает время разработки, повышает его качество и минимизирует проблемы с эксплуатационными характеристиками

Параллельное проектирование изделия начинается с определения руководителя и подбора членов команды, которые регулярно общаются друг с другом в процессе разработки. Усовершенствованный обмен информацией и параллельные конструкторские потоки ускоряют процесс разработки и повышают общее качество изделия.

3.2. Процесс конструирования изделия из пластмассы

Процесс конструирования изделий из пластмассы лучше всего осуществлять по методу параллельного проектирования, но тем не менее этот процесс делится на логически связанные последовательные этапы. Для наглядности рассмотрим основные этапы проектирования изделий:

- Этап 1: Определение конечных требований к изделию.
- Этап 2: Создание предварительного эскиза.
- Этап 3: Предварительный подбор материала.
- Этап 4: Конструирование изделия в соответствии со свойствами материала.
- Этап 5: Окончательный выбор материалов.
- Этап 6: Изменение конструкции с учетом требований производства.
- Этап 7: Прототипирование.
- Этап 8: Конструирование и изготовление формующего инструмента.
- Этап 9: Производство.

Большая часть работ, связанных с проектированием и разработкой изделий на каждом из этих этапов происходит параллельно, но для удобства мы будем рассматривать каждый из них отдельно.

Этап 1 — Определение конечных требований к изделию

Разработка изделия начинается с тщательного определения технических характеристик и требований, предъявляемых потребителем. Поскольку это первый этап разработки, он является самым важным, так как конструкторы и инженеры будут разрабатывать изделие на основе именно этих технических характеристик. Если заданы не все технические характеристики или они заданы неверно, изделие не будет соответствовать условиям эксплуатации. Технические характеристики — это фундамент конструкторских разработок. Очень важно, чтобы требования потребителя к изделию были бы описаны количественно, а не качественно. Такие определения, как «прочный» или «прозрачный», могут быть истолкованы слишком свободно. Намного лучше сказать, что изделие должно выдерживать удар при падении на бетонный пол с высоты одного метра при температуре окружающего воздуха -20°C , а его прозрачность должна сохраняться на уровне более 88 % в течение 5 лет, чем просто указать, что изделие должно быть прочным и прозрачным. К сожалению, не всегда удается заранее определить и количественно выразить все требования к изделию, особенно, если существует возможность неправильной его эксплуатации. Когда пластмассовая деталь изготавливается для замены уже существующей, например, металлической, можно использовать опыт, накопленный при ее использовании, но это невозможно при разработке совершенно нового продукта. Обычно следует учитывать механические воздействия, условия окружающей среды, требования к размерам, соответствие стандартам и запросы рынка.

Предварительное рассмотрение факторов, связанных со строением и с возможным нагружением

Виды нагрузки, их уровень, длительность пребывания в нагруженном состоянии, частота механических воздействий и т. п. следует зафиксировать в технических

требованиях. Необходимо учесть, что изделие может подвергаться нагрузке в процессе сборки, транспортировки, во время хранения и в процессе эксплуатации. Разработка упаковки для защиты изделия в процессе транспортировки и хранения обычно происходит параллельно с конструированием самого изделия. Конструкторы изделий должны предусмотреть различные случаи — от средних значений нагрузок до самых неблагоприятных условий. Возможно, к наиболее трудным решениям относятся те, которые должны соблюсти баланс между надежностью в случае наиболее неблагоприятного сценария и статистически средними нагрузками, причем с учетом последствий и потерь в случае аварий. Изделия, сконструированные с полной гарантией, что они не выйдут из строя в случае их неправильного использования, по всей вероятности, будут очень дорогими; хотя те, которые разработаны без учета ошибок при эксплуатации, могут потребовать высоких затрат на обслуживание. Конструктор должен уделить значительную часть своего внимания надежности, особенно, когда выход изделия из строя может угрожать здоровью и жизни человека.

Предварительный учет факторов, связанных с воздействиями окружающей среды

Поскольку пластмасса очень чувствительна к условиям окружающей среды, важно определить все те условия, в которых будет находиться изделие в процессе эксплуатации: диапазон температур, относительную влажность, химическую агрессивность окружающей среды. Следует учитывать и те условия окружающей среды, которые присутствуют в процессе сборки и хранения. Высокие температуры при эксплуатации изделия могут стать причиной возникновения проблем, связанных с ползучестью и окислением, а низкие температуры могут привести к снижению противоударных свойств. Все требования к используемым реактивам (даже к очистителям бытового назначения и т. п.) должны быть четко определены вместе с возможным воздействием ультрафиолетового облучения (например, при использовании вне помещений). Проблема состоит в том, чтобы точно определить границы наиболее вероятных ошибок при эксплуатации.

Требования к размерам

Соблюдение размеров деталей из пластмасс имеет особенно большое значение, когда они используются в качестве компонентов при сборке изделия. Критические размеры, качество обработки поверхности, плоскостность и аналогичные им параметры должны быть указаны вместе с реальными значениями допусков.

Следует учитывать, что стоимость изготовления оснастки и затраты на производство изделия во многом зависят от требований к допускам по размерам.

Соответствие техническим условиям/стандартам

Изделия из пластмассы могут использоваться в устройствах, параметры которых строго регулируются. За качеством в этом случае следят специальные организации, которые могут быть созданы как торгово-промышленными ассоциациями, так и государством. Стандартами определяются совершенно разные параметры готового изделия: от свойств материала (марка, горючесть и т. п.) до размеров (фитинги, фиксаторы и т. п.) и эксплуатационных характеристик (например, способность ослаблять электромагнитное излучение). Прототипы изделий часто проходят испытания в соответствующей организации по стандартизации.

Ограничения, накладываемые требованиями рынка (маркетинг)

Существуют также требования, которые формируются потребностями рынка, а также возможностями производства. Все они должны быть сформулированы на начальном этапе разработки изделия. Должны быть указаны и такие параметры, как предполагаемое количество производимых изделий, срок службы (срок замены) и максимальная стоимость изделия. Получив всю информацию, команда разработчиков изделия должна создать конструкцию, которая бы обладала наилучшим соотношением цена/качество. К другим требованиям, которые диктует рынок, относятся эстетические: цвет, размер или форма. Они также должны быть четко определены, причем желательно в количественной форме. Для этой цели может быть полезным изготовление промежуточных моделей (нефункциональных прототипов) в качестве средства для обмена информацией между разработчиками, так как очень трудно количественно сформулировать требования к эстетическим параметрам изделия.

Этап 2 — Создание предварительного эскиза

Как только сформулированы требования к изделию, команда разработчиков изделия может начинать работать с конструкторами изделий по разработке эскизов, отражающих начальную концепцию изделия. Обычно эти эскизы представляют собой трехмерные виртуальные изображения (3D), получаемые с помощью *CAD-систем*. Части изделия, которым следует уделить особое внимание, помечены, и имеют отдельные увеличенные изображения. На этом этапе проектирования следует определить, какие параметры и размеры изделия будут оставаться неизменными, а какие можно изменять. К фиксированным параметрам относятся те, которые нельзя изменить с точки зрения конструктора (например, размеры, которые определяются стандартами, и т. п.), а к переменным относятся те, которые не были определены на начальных этапах конструирования. В качестве примера рассмотрим насадки для садовых шлангов (рис. 3.5).

Задачей конструктора является изготовление насадки целиком из пластмассы. Если десяти конструкторам задать одинаковые характеристики изделия и попросить

Рис. 3.5. Пластмасса очень часто используется для замены какого-либо материала. Изделие в центре по своей форме очень близко к металлическому, которое показано слева от него, а насадка из пластмассы (справа) была разработана при очень незначительном влиянии конструкции из металла



их независимо друг от друга сконструировать насадки, то, вероятно, будут представлены 10 различных конструкций. Однако некоторые элементы у каждой из них будут одинаковыми. Например, внутренние размеры в области, где находится резьба для крепления садового шланга, будут одинаковыми у всех вариантов, поскольку они определяются стандартами. Но другие параметры, к которым относятся общая форма изделия или способ регулировки подачи воды, могут отличаться. Один из вариантов насадки из пластмассы, который показан на рис. 3.5, по виду очень похож на металлический образец (слева). Вероятно конструктор этого изделия из пластмассы находился под влиянием от существующей металлической насадки. С другой стороны, следующее изделие, представленное на рис. 3.5, выполняет ту же основную функцию, но в ней заложены другие принципы управления струей воды. Это изделие имеет совершенно иной внешний вид.

На практике для замены изделия из металла лучше ориентироваться только на технические характеристики изделия, а не копировать существующий аналог. Как только конструктор увидел и оценил функциональные возможности металлического изделия, ему будет сложно избежать искушения просто скопировать существующую конструкцию. Слишком большое внимание к уже существующей конструкции ограничивает творческий и инновационный потенциал разработчика. Кроме того, если перед началом проектирования изучаются конкурентоспособные изделия, возникает опасность нарушения патентов.

Этап 3 — Предварительный подбор материала

Как только были определены требования, предъявляемые к изделию потребителями, конструкторы могут начать поиск марок пластмасс, пригодных для производства. Выбор материала осуществляется путем сравнения свойств подбираемых материалов с комплексом свойств конечного изделия. Поскольку существуют буквально тысячи промышленных марок материалов, найти подходящий вариант для конкретного изделия вполне возможно. На начальном этапе рекомендуется выбрать несколько потенциально пригодных вариантов (возможно от 3 до 6 марок/составов материалов).

Из-за того, что число доступных марок материалов огромно, процесс подбора материала может затянуться. При отборе рекомендуется начинать процесс выбора материалов с тех его свойств, которые не могут быть улучшены за счет конструирования. К таким свойствам относятся: КТР, прозрачность, химическая стойкость и температура размягчения. Например, ПЭВП не может быть использован для производства прозрачных упаковок, поскольку он полупрозрачен или вообще светонепроницаем, а ПК не может использоваться для изготовления бензиновых канистр из-за его неустойчивости к гидрокарбонатам.

Использование для отбора материалов перечисленных выше характеристик позволяет относительно легко устранить целые группы материалов, и значительно сократить число потенциально возможных. Процесс выбора материалов можно ускорить, если для изделия не исключается возможность нанесения покрытия на поверхность. Покрытия используются для повышения химической стойкости, износостойкости, устойчивости к ультрафиолетовому облучению и улучшения внешнего вида изделия. При использовании покрытия становится возможным применять материал.

который в другом случае был бы совершенно непригоден для данного изделия. Армирующие добавки также могут облегчить процесс выбора материала. Они позволяют изменять некоторые свойства пластмасс путем добавления их в расплав или при составлении смесей (компаундов).

В отличие от рассмотренных выше свойств большинство механических свойств изделий из полимерных материалов могут регулироваться при конструировании. При конструировании пластмассового аналога металлической детали упругость материала играет наиболее важную роль. Одна из проблем заключается в том, что сталь обладает высокой жесткостью и устойчивостью к ударам, а жесткие пластмассы весьма хрупки (армированные стеклопластики обладают высокой жесткостью, но являются хрупкими). Во многих случаях высокие эксплуатационные характеристики достигаются у мало армированных или неармированных марок промышленных полимеров. Такие материалы менее жесткие, некоторым присуща ползучесть. Но в ряде случаев эти более ударостойки, и снижение жесткости может быть скомпенсировано за счет геометрии изделия (использование ребер и других элементов).

Этап 4 — Конструирование изделия в соответствии со свойствами выбранного материала

На этом этапе проектирования необходимо иметь несколько марок материалов, пригодных для изготовления конкретного изделия. Отличия в свойствах отдельных марок могут привести к различиям в предлагаемых геометрических формах изделия. Например, конструктор выбирает ПЭВП, ПП и ПА 6.6 для изделия, которое должно выдерживать статические нагрузки и воздействие органических растворителей.

Каждый из трех материалов имеет свои эксплуатационные характеристики. Невозможно сделать окончательный выбор (на основе только экономических соображений) до тех пор, пока изделие из всех перечисленных материалов не будет сконструировано, поскольку расход материала и время производственного цикла будут отличаться в каждом отдельном случае. ПА 6.6 — более дорогой материал (из расчета стоимости единицы веса или объема), но уменьшение толщины стенок и сокращение времени производственного цикла могут снизить влияние высокой стоимости исходного сырья.

Изделия, показанные на рис. 3.6, имеют одинаковую жесткость, поскольку момент сопротивления или момент инерции сечения подобраны таким образом, чтобы компенсировать разные значения модуля упругости каждого материала.

Это простой пример того, как геометрические особенности изделия на практике влияют на его эксплуатационные характеристики.

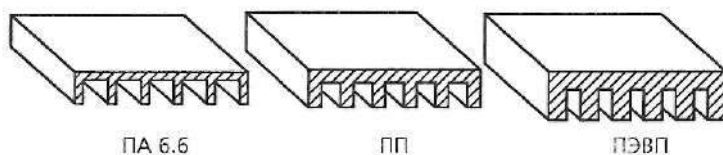


Рис. 3.6. После выбора нескольких материалов, изделия могут быть сконструированы в соответствии со свойствами каждого из них. Толщина стенок будет влиять как на текучесть, так и жесткость изделия

Этап 5 - Окончательный выбор материала

На этом этапе процесса конструирования следует определить один наиболее предпочтительный материал для производства изделия, оставляя оставшиеся варианты в резерве на случай возникновения неожиданных проблем, которые могут появиться на следующих стадиях разработки (например, в ходе прототипирования или производства изделия). Найти «идеально» подходящий пластмассовый материал вряд ли возможно. Каждый выбор имеет свои преимущества и недостатки. Конструктор может выбрать материал, руководствуясь своим предыдущим опытом. Решения, принятые исключительно исходя из стоимости материала и затрат на производство, не учитывают преимуществ, которые могут возникнуть при переработке или в процессе эксплуатации. Оценив материалы с учетом всех этих характеристик, конструктор должен сделать беспристрастный выбор наилучшего из них. Свойствам или характеристикам, которые играют важную роль, может быть присвоен соответствующий рейтинг.

Рассмотрим три материала: ПП, ПЭВП и ПА 6.6, которые должны выдерживать статические нагрузки и быть устойчивы к органическим растворителям.

Отдельные рейтинги, выраженные количественно и связанные с какими-либо свойствами материалов, могут быть в какой-то степени произвольными, но они все же основаны на реальных числовых данных. Эта методика предоставляет собой полуколичественный анализ для выбора наилучшего материала (рис. 3.7).

Свойства или характеристики	Рейтинг*		
	ПЭВП	ПП	ПА 6.6
Перерабатываемость	9	8	6
Сопротивление ползучести	2	4	7
Стойкость к химическому воздействию	10	9	10
Стоимость изготовления единицы продукции**	7	9	8
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
Эксплуатационные характеристики при повышенных температурах	3	5	9
Усредненный рейтинг**	6,3	7,1	8,0

* 10 — максимальный рейтинг (наилучший), 0 — минимальный рейтинг (наихудший).

** Учитывается как потребление материала (с учетом объема изделия), так и время, необходимое для выполнения одного цикла.

Рис. 3.7. Полуколичественный анализ при выборе материала может привести к неточным результатам

Этап 6 — Изменение конструкции изделия для производства

После выбора материала и определения начальной конструкции изделия, возможно некоторое ее изменение с учетом особенностей производства.

Геометрия изделия должна быть разработана с расчетом на изготовление литьем под давлением. Конструкторы должны учитывать то воздействие, какое могут оказывать различные этапы технологического процесса литья под давлением на конструкцию изделия.

Каждый этап литья под давлением, а именно: заполнение формы, уплотнение, выдержка под давлением, охлаждение и выталкивание «предъявляют» свои требования к конструкции (см. главу 2).

Рассмотрим изделие, которое показано на рис. 3.8. Оно было сконструировано с ребрами, предназначенными для «усиления» конструкции в процессе эксплуатации.

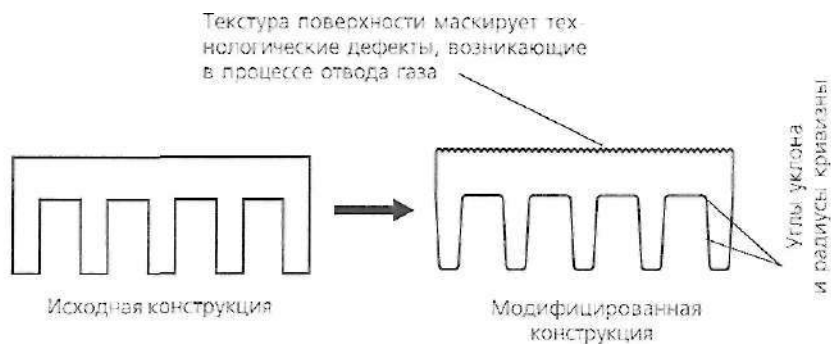


Рис. 3.8. Конструкция должна быть изменена из-за главных и второстепенных требований, выдвигаемых процессом производства (усадка, углы уклона, ускорители потока, и т. д.). Должно быть оценено воздействие этих изменений на эксплуатационные характеристики готового изделия

Изделие должно быть модифицировано за счет закругления углов, что улучшает течение расплава в форме (и уменьшает концентрацию напряжений). Кроме этого, изменение углов уклона облегчает извлечение изделия. Текстурная поверхность улучшит внешний вид изделия, маскируя дефекты, возникающие на противоположных сторонах ребер жесткости из-за усадки материала. Это только некоторые из возможных модификаций конструкции, которые необходимы с точки зрения технологии производства. После того как они сделаны, должно быть оценено воздействие этих изменений на эксплуатационные характеристики конечного изделия. Изменения в конструкции при изменении углов уклона ребер приводят к отклонениям изделия от начальной формы, к существенным изменениям прогибов и напряжений, возникающих из-за приложения внешних нагрузок в процессе эксплуатации.

Карты контроля конструкции, аналогичные той, которая приведена на рис. 3.9, могут применяться на этапах планирования или при окончательной проверке изделия, чтобы гарантировать, что все аспекты производства и сборки были учтены и проверены.

Карта контроля конструкции

Технические требования к выбору материала

НАГРУЗКИ	Величина Срок службы Ударные
ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА	Усталостные Износ Температура Реактивы Влажность Очистители Смазочные вещества Воздействие ультрафиолетового облучения
СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ	Прозрачность Способность к окрашиванию Коробление/Усадка Рентабельность Воспламеняемость Стоимость Тестирование органом сертификации

Рассмотрение элементов изделия

РАДИУСЫ	Острые углы Ребра Бобышки Наличие надписей
ТОЛЩИНА СТенок	Прочность Электрические свойства Воспламеняемость Длина пути течения Слишком тонкая Переход из толстой зоны в тонкую Кад- ровая рамка Ориентация толстой зоны Толстые зоны Зоны с тонкими стенками Резкие изменения толщины
РЕБРА	Радиусы Наклон Высота Расстояние между ребрами Толщина основания
БОБЫШКИ	Радиусы Наклон Внутренний диа- метр/внешний диаметр Толщина основа- ния Длина/диаметр
ЛИНИИ СПАЯ	Близость к приложению нагрузки Прочность в зависимости от нагрузки
НАКЛОН	Наружная поверхность Полировка Глубина текстуры Угол V-об- разной канавки (мин.)
ДОПУСК	Геометрическая форма изделия Мате- риал Конструкция оснастки

Рис. 3.9. Производители материалов предоставляют карты контроля конструкции, чтобы обеспечить учет всех параметров, включая технологические возможности изготовления изделия

• РАДИУСЫ •

НЕДОПУСТИМО



ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО

Радиус 0,0150"



• РАВНОТОЛЩИННОСТЬ •

НЕДОПУСТИМО

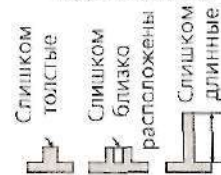


ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



• РЕБРА •

НЕДОПУСТИМО

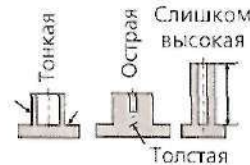


ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



• БОБЫШКИ •

НЕДОПУСТИМО

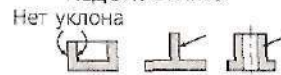


ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



• УКЛОН •

НЕДОПУСТИМО



ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО

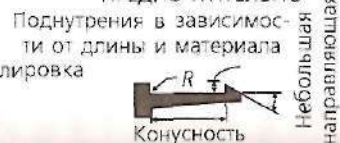


• КРЮЧОК •

НЕДОПУСТИМО



ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



Факторы, связанные со сборкой

ПРЕССОВАЯ ПОСАДКА	Допуски Длительное сохранение свойств Кольцевое напряжение
ЗАСТЕЖКА	Допустимая деформация Усилие при сборке Конический крючок Составная сборка
ВИНТЫ	Нарезанная или формируемая Избегать противодействующих стоков
ОТЛИТАЯ РЕЗЬБА	Избегать скошенных краев и трубных резьб
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ	Концентратор энергии Посадка
СВАРКА	внахлест Толщина стенок Герметик
КЛЕЙКИЕ СОЕДИНЕНИЯ	Соединение внахлест или встык Совместимость Запирающие фильтры для паров
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	Допуски между соединениями Допуски в столбах многостажных изделий Тепловое расширение Осторожное обращение с заклепками и отлитыми вставками Совместимость компонентов

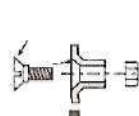
Факторы, связанные с литьевой формой

КОРОБЛЕНИЕ	Охлаждение (углов) Расположение толкателей
ВПУСКНЫЕ ЛИТНИКИ	Тип Размер Расположение
РАЗВОДЯЩИЕ ЛИТНИКИ	Размер и форма Размер центрального литника Сбалансированный поток
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	Поднутрение Острые углы Наклон Извлечение изделия Избегать тонких/длинных пуансонов

Рис. 3.9. Окончание

• ВИНТЫ •

НЕДОПУСТИМО



Нарезание резьбы (не следует использовать ПК и его смеси)

ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



Нарезание резьбы

• ОТЛИТАЯ РЕЗЬБА •

НЕДОПУСТИМО



ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО

1/32" направляющая



• КАДРОВАЯ РАМКА •

НЕДОПУСТИМО

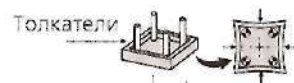


ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



• КОРОБЛЕНИЕ •

НЕДОПУСТИМО



ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО



Эта карта имеет большое практическое значение при работе с изделиями из пластмассы, поскольку существуют проблемы, которые невозможно предсказать заранее (проявление линий спая и прочность в этих местах, коробление, возникновение утяжин и т. д.).

Этап 7 — Прототипирование

Для оценки возможности изготовления и эксплуатационных характеристик данного изделия изготавливается прототип. Прототипирование необходимо, поскольку все процессы по проектированию и оценке эксплуатационных характеристик (например, структурный анализ) до этого момента носили лишь теоретический характер.

Чтобы получить более реалистичные результаты, необходимо отлить прототип изделия из материала, который предполагается использовать. Для изготовления прототипа небольшого размера обычно используется одногнездная литейная форма, а для больших прототипов — «мягкая» оснастка.

Процесс прототипирования может занять большой период времени и оказаться дорогостоящим, однако лучше заранее просчитать все возможные проблемы, связанные с изготовлением и соответствием заданным эксплуатационным характеристикам. Для минимизации затрат на переделку оснастки следует использовать технологии экономного расхода стали (одпогнездные, а не сложные многогнездные формы, «мягкую» оснастку и т. п.). Изготовление прототипа литьем под давлением позволяет проверить инженерные функции и возможность производства изделия, но существуют и другие возможности быстрого прототипирования. Такие прототипы имеют ограниченные функциональные параметры, но пригодны для оценки определенной информации и могут быть получены задолго до изготовления формующего инструмента и более реальных прототипов (см. главу 5).

Этап 8 — Формующий инструмент и Этап 9 — Производство

Как только прототипы формующего инструмента и изделий оценены и модифицированы, можно начинать предварительное изготовление производственной оснастки. Чтобы сэкономить время, работу по изготовлению формующего инструмента очень часто начинают задолго до этого момента. Далее приступают к начальной стадии производства изделий.

3.3. Стандартные тесты для проверки свойств полимерных материалов

Большинство данных о свойствах материала, который выпускается компанией-поставщиком, получают стандартными методами испытаний Американского общества по испытанию материалов (*ASTM*) или Международной организации по стандартам (*ISO*).

Большинство из этих стандартных тестов представляют собой измерение в одной контрольной точке при температуре окружающей среды (например, *ASTM D638*) и имеют очень ограниченное применение для конструирования изделий. Другие тесты содержат процедуры для получения более подробной информации (например, *ASTM D2990*). Следует также заметить, что некоторые свойства не соответствуют стандартам *ASTM* или *ISO*, существующим сегодня (например, стандартные испытания для получения РУГ-диаграмм).

Кроме того, большинство технических параметров, используемых для конструирования изделия, получают с использованием нестандартных (внутрифирменных) испытаний.

3.4. Механические свойства полимерных материалов

3.4.1. Общие положения

Существует очень небольшое количество вариантов применения изделий из пластмассы, при котором их структурная целостность неважна. Большинство изделий из пластмассы подвергаются различным механическим нагрузкам в процессе сборки или эксплуатации, и их структурная целостность имеет первостепенное значение.

Изделия могут быть сконструированы с учетом конкретных условий эксплуатации (нагрузок, напряжений, деформаций), если:

1) условия приложения нагрузки при испытаниях близки к реальной ситуации в процессе эксплуатации (включая те, которые возникают при неправильном использовании изделия), и они могут быть оценены;

2) механические свойства пластмассы могут быть описаны достаточно точно.

Однако характеристики механических свойств пластмассы зависят от большого количества параметров, связанных с условиями окружающей среды и процессом производства. Время действия нагрузки, ее величина, температура, химические свойства окружающей среды, воздействие ультрафиолетового излучения, степень ориентации, внутренние напряжения (зависящие от условий переработки), линии спая и аналогичные им, будут влиять на характеристики механических свойств материала. Из-за большого количества переменных поставщики материалов не в состоянии полностью определить эксплуатационные характеристики каждой имеющейся марки материала при

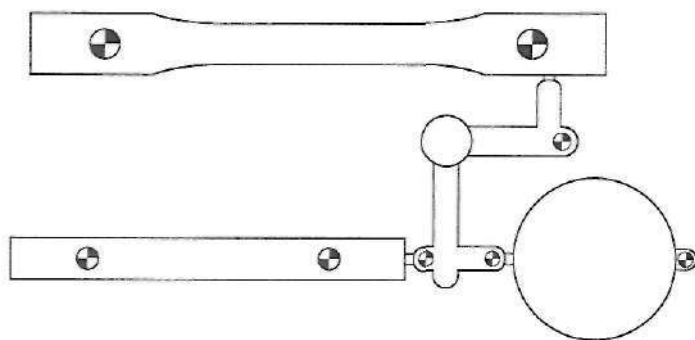


Рис. 3. Ю. Геометрия контрольных образцов, используемых для оценки свойств пластмассовых изделий. Отметим, что большинство испытаний (например, при определении механических свойств), как правило, дают информацию о свойствах изделия, а не о свойствах материала

всех возможных условиях переработки. Однако они могут предоставить данные об общих характеристиках механических свойств. В случае, если они являются критическими для данных условий эксплуатации, должна быть найдена или получена дополнительная информация для выполнения более точной и полной оценки требуемых характеристик.

3.4.2. Кратковременные зависимости напряжения от деформации

Зависимости напряжения от деформации достаточно легко получить для большинства полимерных материалов.

Как следует из названия, кратковременные испытания проводятся в течение ограниченного периода времени (обычно нескольких минут) в лабораторных условиях. Данные, полученные из кратковременных испытаний, не дают полного описания характеристик механических свойств, однако они могут служить основой для выбора материала.

Данные кратковременной зависимости напряжения от деформации, которые предоставляются поставщиками материалов, обычно получают с помощью стандартных процедур тестирования (обычно используются универсальные испытательные машины с постоянной скоростью движения зажима). Большинство данных кратковременных зависимостей напряжения от деформации получают при стандартных условиях, т. е. при комнатной температуре и относительной влажности 50 %. Из-за температурной зависимости свойств большинства пластмасс, более точный набор эксплуатационных характеристик можно получить при проведении тестов в широком температурном диапазоне. Полимерные материалы вязкоупруги, и поэтому при нагружении характеристики их механических свойств меняются во времени. Скорость деформирования, которую получают во время процедуры тестирования, будет влиять на вязкостное поведение, а следовательно, и на результаты тестирования. Большинство кривых кратковременной зависимости напряжения от деформации получают при относительно небольших скоростях деформирования. При более высоких скоростях деформирования (например, при воздействии ударных нагрузок) материалы имеют большую твердость и хрупкость, а при не-

больших скоростях деформирования, они проявляют большую эластичность и текучесть. Воздействие высоких скоростей

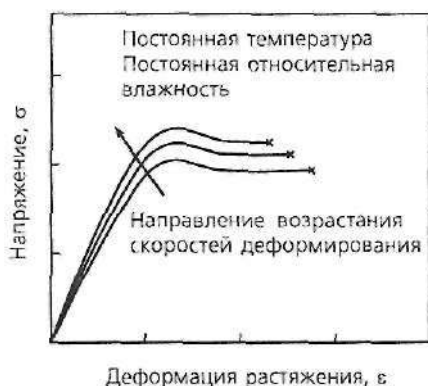


Рис. 3.11. Механические свойства полимерных материалов зависят от внешних факторов, таких как температура и относительная влажность, а также от других факторов, к которым относится, например, скорость нагружения

деформирования аналогично понижению температуры, и наоборот, снижение скоростей деформирования аналогично по воздействию повышению температуры¹.

Относительная влажность существенно влияет на свойства таких гигроскопичных материалов, как ПА. Вода ведет себя как пластификатор, и материал в условиях повышенной влажности становится пластически деформируемым². Очень важно, чтобы данные тестирования материалов, которые используются для их выбора, были бы получены при одних и тех же условиях (то есть при одной и той же скорости деформирования). Данные, которые сообщают производители материалов, обычно получают с помощью процедур тестирования в соответствии со стандартами *ASTM* или *ISO*, в которых определены условия испытаний. Данные, полученные из диаграмм растяжения, используются в основном для выбора материалов на начальной стадии проектирования, но эти данные могут быть полезными и для конструирования, если условия испытаний эквивалентны условиям эксплуатации.

Но даже в этом случае влияние таких факторов, как условия переработки, старение и воздействие химических веществ на механические свойства материала должны учитываться отдельно.

По сравнению с большинством металлов и пород дерева пластмасса обладает меньшей жесткостью (то есть количественно имеет меньшие значения модуля упру-

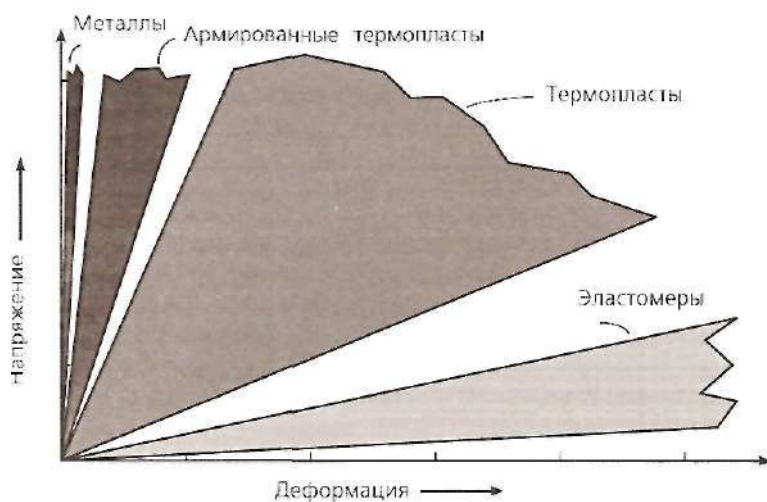


Рис. 3.12. Зависимости напряжения от деформации у пластмасс могут существенно различаться. По сравнению с металлами, полимерные материалы, как правило, обладают существенно меньшими значениями модуля упругости, особенно при повышенных температурах

¹ Здесь автор в простейшей форме излагает принцип температурно-временной аналогии для полимерных материалов.— *Примеч. науч. ред.*

² Влияние влаги на эластические свойства ПА заключается не только в эффекте пластикации — *Примеч. науч. ред.*

гости). Например, ПК без добавок в 85 раз менее жесткий, чем углеродистая сталь и примерно в 28 раз менее жесткий, чем алюминий [5]. Однако, в отличие от металлов или дерева, различные марки полимерных материалов имеют большой диапазон изменения значений жесткости — от эластичных эластомеров до очень жестких пластмасс, армированных волокнами. Обычно марки полимерных материалов молено классифицировать по характеру их кратковременной и долговременной зависимости напряжения от деформации. Они могут быть как эластичными (мягкими и гибкими, с большой растяжимостью), так и текучими (со средними значениями жесткости) или жесткими/стеклоподобными (с повышенной жесткостью и линейной зависимостью изменения размеров от величины нагрузки). Зависимость напряжения от деформации количественно отражает механические свойства материалов при данной температуре, влажности и скоростях деформирования в процессе тестирования.

Нормальным напряжением σ называют отношение приложенной нагрузки FK площади поперечного сечения A контрольного образца:

$$\sigma = F/A. \quad (3.1)$$

Линейной деформацией s называют деформацию материала, которая является следствием приложенной нагрузки. Деформация определяется как относительное изменение длины AL деленное на исходную длину L_0 :

$$s = AL/L_0 \quad (3.2)$$

Для металлов деформация обычно измеряется в следующих единицах: 10^{-6} дюйм/дюйм или см/см. Поскольку большинство пластмасс имеют большую текучесть

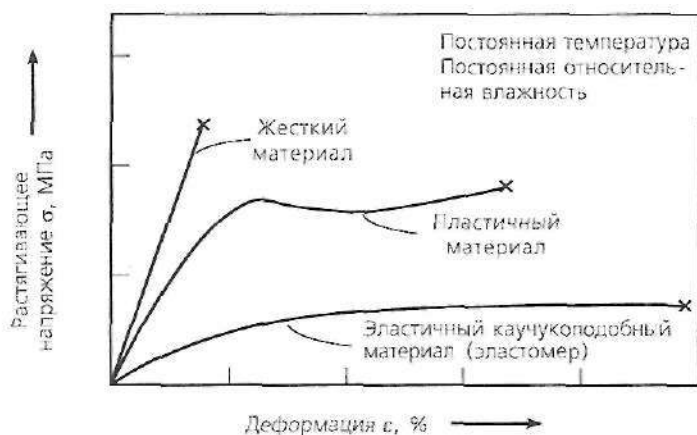


Рис. 3.13- Кратковременные зависимости напряжения от деформации обычно используются для первоначального отбора материалов. Кривые могут быть использованы в процессе проектирования, если уровни деформации по величине близки тем, которые ожидаются в условиях эксплуатации будущего изделия. Полимерные материалы обычно можно разделить по свойствам на жесткие, пластичные или эластичные с точки зрения их реакции на приложенную нагрузку

и большие разрывные значения относительного удлинения, то деформация обычно выражается как процент удлинения (то есть деформация $\times 100$ %). Следующие единицы представления деформации являются эквивалентными:

$$1000 \text{ ЦЕ} = 1000 \times 10^{-6} \text{ см/см} = 0,001 \text{ см/см} = 0,1 \text{ \%}.$$

На графике зависимости напряжения от деформации есть несколько характерных особенностей или точек, которые представляют практический интерес для конструктора. Ниже дано описание характеристик графика, изображенного на рис. 3.14 [5-7].

- **Предел пропорциональности.** Предельная пропорциональность как упругих, так и вязкоупругих материалов определяется максимальной нагрузкой, которую в состоянии выдерживать материал без отклонения от линейной диаграммы растяжения.

- **Предел упругости.** Это точка на графике зависимости напряжения от деформации, которая соответствует максимальному напряжению, которое материал в состоянии выдержать при нагружении и затем восстановить свои исходные размеры после снятия напряжения. Восстановление происходит не сразу, величина предела упругости может быть выше предела пропорциональности.

- **Предел текучести (σ_T).** Начальное значение напряжения на графике зависимости напряжения от деформации, при котором увеличение деформации не приводит к возрастанию напряжения (то есть значение напряжения в точке, где угол наклона касательной к кривой становится равным нулю). Предел текучести наблюдается не у всех полимерных материалов.

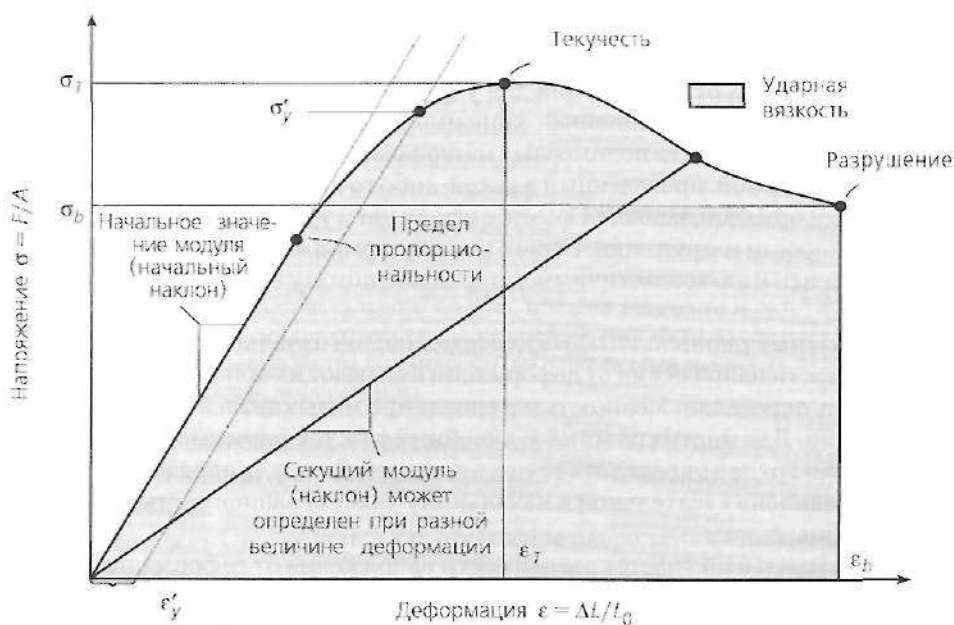


Рис. 3.14. Характерные точки или особенности на графике зависимости напряжения от деформации, которые представляют интерес для конструкторов

- *Деформация текучести (ϵ_p)*. Величина деформации, соответствующая пределу текучести. Часто приводится в процентах (то есть деформация текучести $\times 100$).
- *Предел прочности (σ_p) (разрушающее напряжение)*. Напряжение в материале в момент его разрушения.
- *Предельная (разрушающая) деформация (ϵ_p)*. Величина деформации в точке разрушения материала. Часто приводится в процентах, как предельное удлинение (то есть разрушающая деформация $\times 100$).
- *Допустимый предел текучести (σ_y)*. Используется для некоторых пластмасс, обладающих высокой текучестью или имеющих высокие значения деформации текучести. Определяется по линии, проведенной параллельно линейному участку зависимости напряжения от деформации при заданной величине допустимой (обратимой или необратимой) деформации, σ_y — напряжение в точке пересечения этой параллельной прямой и кривой зависимости напряжения от деформации называют допустимым пределом текучести при заданной деформации.
- *Истинные напряжения и деформации*. В большинстве случаев для значений напряжения используют термин «условные технические напряжения». Они определяются по приложенной нагрузке и величине начальной площади поперечного сечения. Когда материалы подвергаются сжатию, сдвигу или растяжению, значения площади поперечного сечения меняются, особенно при больших деформациях. Истинные значения напряжения определяются путем деления приложенной нагрузки на значение площади поперечного сечения в каждый момент тестирования. Однако, как правило, приводятся значения условного напряжения и условной деформации, которые и используются на практике.
- *Модуль упругости (Юнга)*. Модуль упругости определяется по наклону зависимости напряжения от деформации для упругого материала (то есть для материала, у которого наблюдается линейная зависимость напряжения от деформации). Поскольку для большинства полимерных материалов такая линейность не наблюдается, наклон касательной, проведенный в какой-либо точке к кривой зависимости напряжения от деформации, меняется вместе с изменением уровней напряжения и деформации или скорости нагружения. Строго говоря, термин «модуль упругости» не может быть применен к вязкоэластичным материалам, потому что для них не выполняется закон Гука.
- *Начальный (тангенциальный) модуль*. Наклон начального (линейного) участка зависимости напряжения от деформации называют начальным модулем. Начальный модуль определяет жесткость материала при малых значениях напряжения или деформации. Для многих пластмасс линейный участок зависимости напряжения от деформации трудно определить точно, а начальный модуль определяется через тангенс угла наклона касательной к начальному участку зависимости напряжения от деформации.

Когда начальный участок зависимости напряжения от деформации не является линейным, то в качестве альтернативного метода определения модуля используется секущий модуль (обычно при деформации, равной 1 %) в качестве величины, более полно отражающей жесткость материала. Следует с осторожностью относиться к значениям модуля, определенных при кратковременных испытаниях для различных

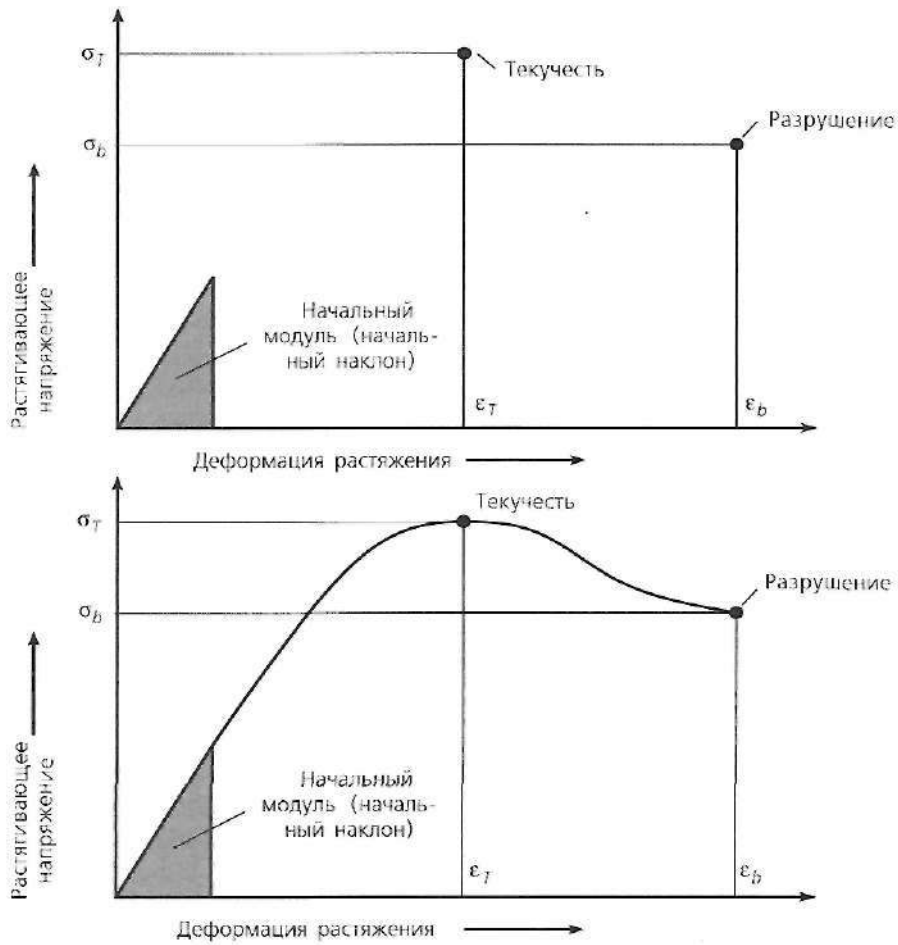


Рис. 3.15. Когда даны значения начального модуля, предела текучести и разрушающего напряжения, удлинения, соответствующие пределу текучести и разрушению, то можно оценить общие свойства полимерного материала (при заданных значениях температуры и уровне деформации)

марок материалов, полученных от разных поставщиков, потому что эти значения очень зависят от конкретной методики проведения испытаний и от метода вычисления этой величины.

- **Секущий модуль.** Определяется как отношение напряжения к деформации в любой точке зависимости напряжения от деформации. Значения секущего модуля представляются в зависимости от деформации. Расчет секущего модуля необходим при проведении инженерных расчетов для эластомеров или пластичных полимеров (например, если эти материалы при эксплуатации могут испытывать большие деформации).

• *Ударная вязкость* (площадь под кривой зависимости напряжения от деформации). Дает возможность оценить общую ударную вязкость материала при заданной температуре и скорости нагружения.

Если конструктор не располагает реальным графиком зависимости напряжения от деформации, следует обратиться к табличным данным, в которых приведены такие основные свойства материала, как начальный модуль, предел текучести, относительное удлинение, соответствующее пределу текучести, пределу прочности и относительное удлинение при разрыве. При наличии этих данных возможно грубо оценить кратковременную зависимость напряжения от деформации (рис. 3.15).

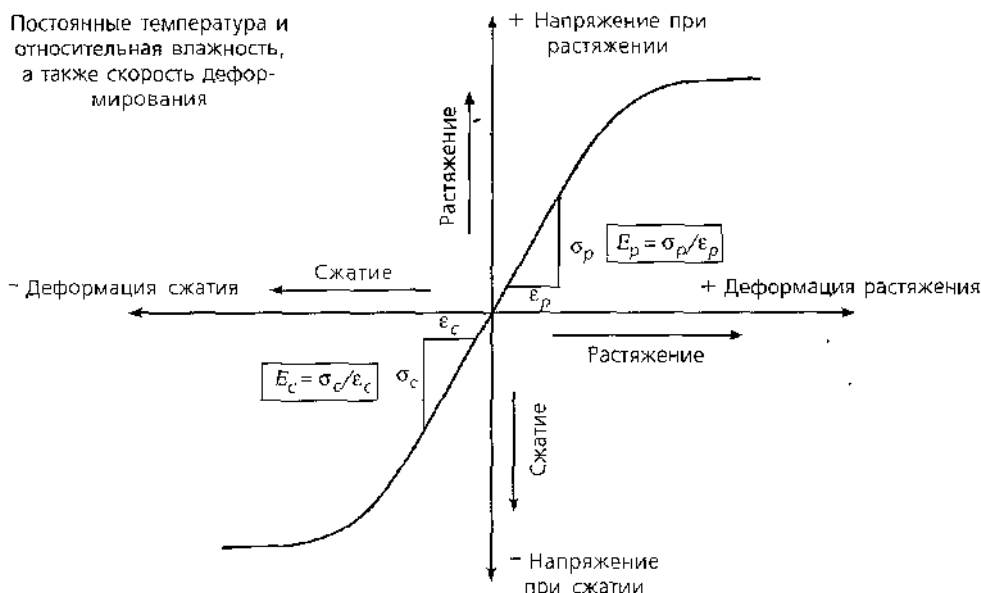


Рис. 3.16, Зависимости напряжения от деформации при растяжении и сжатии для пластмасс могут быть как однотипными, так и в некоторых случаях, существенно различными

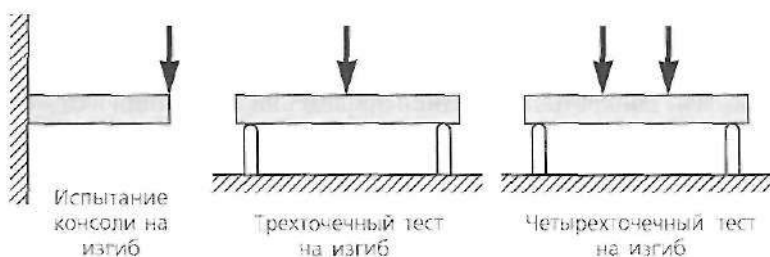


Рис. 3.17. Для определения изгибных свойств пластмасс используются различные испытания

Сравнение поведения полимерного материала при растяжении и сжатии

Кривые кратковременной зависимости напряжения от деформации обычно получают, растягивая контрольные образцы, что приводит к возникновению растягивающих напряжений и деформаций. Для большинства полимерных материалов без наполнителей поведение при сжатии аналогично их поведению при растяжении, но существуют материалы, поведение которых при сжатии будет сильно отличаться. Особенно это заметно у образцов из армированных пластмасс. Лучше получить дополнительные данные о свойствах таких материалов при сжатии, чем считать, что их поведение при сжатии аналогично поведению при растяжении.

Прочность и модуль при изгибе

Поставщики материалов обычно предоставляют данные о кратковременной зависимости напряжения от деформации при изгибе. Свойства при изгибе особенно важны, поскольку очень большое число изделий из пластмассы в процессе эксплуатации испытывают изгибающие нагрузки. Следует отметить, что результаты тестирования на изгиб еще в большей степени зависят от используемого оборудования и геометрической формы образца. Тестирование на изгиб проводится на относительно длинных тонких образцах, имеющих прямоугольное сечение. Условия испытаний и способы нагружения могут быть консольными (одна опора, одна нагрузка), трехточечными (две опоры, одна нагрузка) или четырехточечными (две опоры, две нагрузки).

В процессе тестирования изучается максимальный прогиб образца как функция приложенной нагрузки. В отличие от испытаний при одноосном растяжении или сжатии при изгибе у контрольных образцов одна часть поверхности сжимается, а другая растягивается. При этом существует нейтральный слой, разделяющий области растяжения и сжатия, на котором напряжения или деформации равны нулю. Значения напряжений и деформации при изгибе могут быть рассчитаны на основе экспериментальных данных, а также с помощью соответствующих уравнений. Эти формулы получены исходя из предположения, что материал изотропный, упругий, и деформации его малы. В качестве характеристик свойств материалов при изгибе приводятся модуль изгиба, определенный по начальному наклону зависимости нагрузки от прогиба, и прочность на изгиб. Для хрупких материалов прочность на изгиб соотносится с максимальным разрушающим напряжением растяжения или сжатия внешнего слоя образца. Для более пластичных материалов прочность на изгиб соответствует пределу текучести внешнего слоя или рассчитывается как напряжение во внешних поверхностных слоях при заданной деформации этих слоев (обычно при 5 % деформации внешних слоев)-

Прочность и модуль при сдвиге

Модуль сдвига G полимерного материала определяется по наклону начального участка зависимости напряжения от деформации сдвига.

$$G = m/y. \quad (3.3)$$

Значения таких характеристик, как предел текучести при сдвиге, предел прочности при сдвиге, деформация текучести при сдвиге и предельная разрушающая

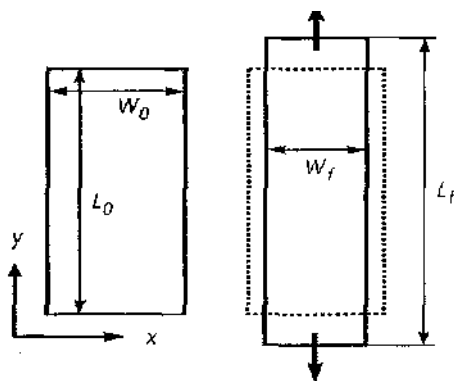
деформация при сдвиге могут быть получены с помощью прямого анализа зависимости напряжения сдвига от деформации сдвига. Способы получения указанных характеристик во многом аналогичны определению соответствующих характеристик материала при сжатии и растяжении. Если предположить, что материал изотропный и упругий, то можно вычислить модуль сдвига пластмассы с помощью модуля упругости, E , и коэффициента Пуассона, ν .

$$G = E / [2(1 + \nu)]. \quad (3.4)$$

Поскольку полимерные материалы являются вязкоупругими, начальные значения модулей растяжения, сжатия или изгиба, которые обозначаются буквой E в уравнении (3.4), используются на практике для определения приближенной величины модуля сдвига.

Коэффициент Пуассона

При растяжении или сжатии изделия из пластмассы (или контрольного образца) происходят одновременно деформирующие как вдоль оси приложения нагрузки (продольная деформация), так и перпендикулярно оси нагрузки (поперечная деформация). Коэффициент Пуассона определяется как отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной в области упругости материала. Знак минус означает, что деформация в поперечном направлении происходит в направлении, противоположном направлению продольной деформации. Например, когда изделие растягивается в продольном направлении, то его ширина и толщина (поперечные размеры) уменьшаются.



Коэффициент Пуассона, ν

$$\nu = \frac{- \text{Поперечная деформация}}{\text{Продольная деформация}}$$

$$\nu = \frac{-\epsilon_x}{\epsilon_y} = \frac{-W/W_0}{\Delta L/\Delta L_0}$$

Рис. 3.18. Коэффициент Пуассона определяет отношение значений поперечной и продольной деформации материала. Этот коэффициент используется во многих уравнениях для взаимосвязи таких параметров материалов, как модуль сдвига и модули растяжения (сжатия)

Для большинства обычных материалов коэффициент Пуассона колеблется в пределах от 0,0 до 0,5. Существует несколько уникальных материалов, которые расширяются в поперечном направлении под действием растягивающего напряжения. Материал, у которого коэффициент Пуассона равен 0,0, не сжимается в поперечном

направлении при растяжении (или не испытывает поперечного расширения при сжатии). Материал, у которого коэффициент Пуассона 0,5 будет сжиматься в поперечном направлении (из-за продольного растяжения), но в результате деформирования объем и плотность материала не меняются. Любой материал с коэффициентом Пуассона между 0,0 и 0,5 меняет объем и плотность при деформировании. Значение коэффициента Пуассона для данного материала может быть определено непосредственно из испытаний на одноосное растяжение или сжатие (с помощью поперечного и продольного экстензометров) или может быть вычислено, если известны значения модулей упругости или сдвига

$$\nu = [\text{E} / 2 \text{G}] - 1. \tag{3.5}$$

Так же как значения модуля упругости и модуля сдвига, коэффициент Пуассона зависит от таких параметров, как температура, уровень деформации или напряжения, а также скорости деформирования.

Таблица 3.1. Типичные значения коэффициента Пуассона [6]

Материал	Значения коэффициента Пуассона
Алюминий	0,33
Углеродистая сталь	0,29
Идеальная резина	0,50
Термопласт	0,20–0,40
Термопласт с наполнителем или армированный	0,10–0,40
Материал с пористой структурой	0,30–0,40

Значения коэффициента Пуассона используются для установления взаимосвязи значений модулей упругости и сдвига, а также для проведения конструкторских расчетов.

3.4.3. Механические свойства, зависящие от времени. Ползучесть

Механические характеристики пластмасс зависят от большого числа факторов, к которым относятся время, уровни напряжения или деформации, а также такие характеристики окружающей среды, как температура и влажность воздуха (для гигроскопичных полимеров). Набор кратковременных зависимостей напряжения от деформации, которые приведены на рис. 3.11, показывает, что при более высоких скоростях деформирования пластмассы становятся более жесткими и хрупкими. При низких скоростях деформирования полимерные материалы в большей степени проявляют такие свойства, как упругость или пластичность, что связано с вязкостными эффектами. Подобным эффектам следует уделять особое внимание в тех случаях, когда изделие испытывает нагрузки в течение продолжительного периода времени (то есть статические нагрузки). Ситуация, в которой изделия из пластмассы непрерывно подвергаются длительным нагрузкам (возникающим в процессе эксплуатации

и/или из-за собственного веса изделия), довольно типична. В таких случаях в изделии возникает как упругая деформация в начальный момент времени из-за приложенной нагрузки, так и деформация, увеличивающаяся во времени из-за вязкостных свойств материала (то есть ползучесть). Кроме того, при продолжительной эксплуатации следует отдельно учитывать изменение свойств материала, связанное с его старением. Все изделия, которые показаны на рис. 3.19, подвергаются длительному нагружению и должны быть сконструированы с учетом деформации, возникающей вследствие ползучести.

Чтобы сконструировать изделия, которые будут подвергаться нагрузкам в течение продолжительного периода времени, конструкторы должны получить и использовать данные о ползучести. В результате опасность разрушения изделий и существенного изменения их формы в течение срока эксплуатации (срок службы должен быть указан в процессе начальной стадии проектирования, поскольку деформации, связанные с ползучестью, зависят от времени) сводится к минимуму. Данные о текучести, которые используются в проектировании, должны соответствовать тип¹ напряжений или условиям окружающей среды, в которой изделия находятся в процессе эксплуатации.

Модуль ползучести, зависящий от времени и температуры, $E_c(t, T)$, определяется уравнением

$$E_c(t, T) = \sigma_0 / \epsilon(t, T), \quad (3.6)$$

где σ_0 означает постоянное напряжение, а $\epsilon(t, T)$ деформация, зависящая от времени и температуры.

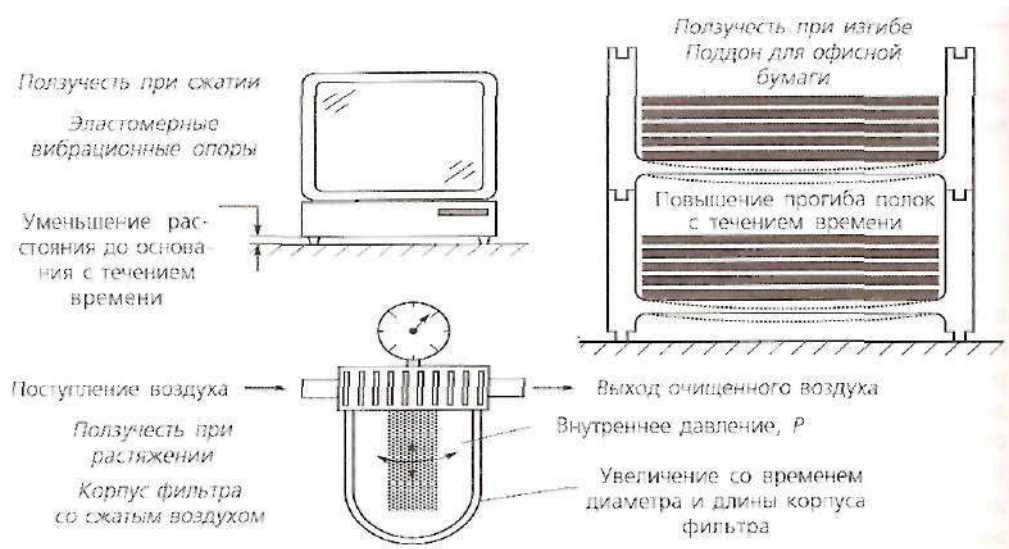


Рис. 3.19. Типичные варианты использования изделия из пластмассы, в которых они подвергаются постоянному напряжению в течение продолжительного периода времени (то есть варианты, в которых проявляется ползучесть)

К сожалению, величину эксплуатационной нагрузки, ее длительность и условия окружающей среды бывает трудно предсказать на долгий период времени. Может оказаться трудным найти данные тестирования, точно коррелирующие с конкретными условиями эксплуатации, особенно когда нагрузки носят прерывистый характер, и требуется учитывать периодическое восстановление материала в момент разгрузки. Из-за этого возникают трудности, связанные с точной оценкой эксплуатационных характеристик изделия, в котором происходит ползучесть. В ряде случаев в целях безопасности лучше предположить наличие непрерывной нагрузки при максимальной ожидаемой рабочей температуре. Ползучесть пластмассы часто анализируют с помощью модели, сочетающую пружину (упругий элемент) и поршень (вязкий элемент). Модель, которая изображена на рис. 3.20, может быть использована для общего описания ползучести пластмассы, испытывающей растягивающую нагрузку. Четырех-элементная модель, показанная на рисунке, представляет собой сочетание элементов Максвелла и Фойгта-Кельвина. При приложении к поршню растягивающего усилия упругий элемент 1 мгновенно растягивается, что приводит к возникновению мгновенной упругой деформации обратно пропорциональной жесткости пружины и прямо пропорциональной величине нагрузки (это приводит к накоплению энергии).

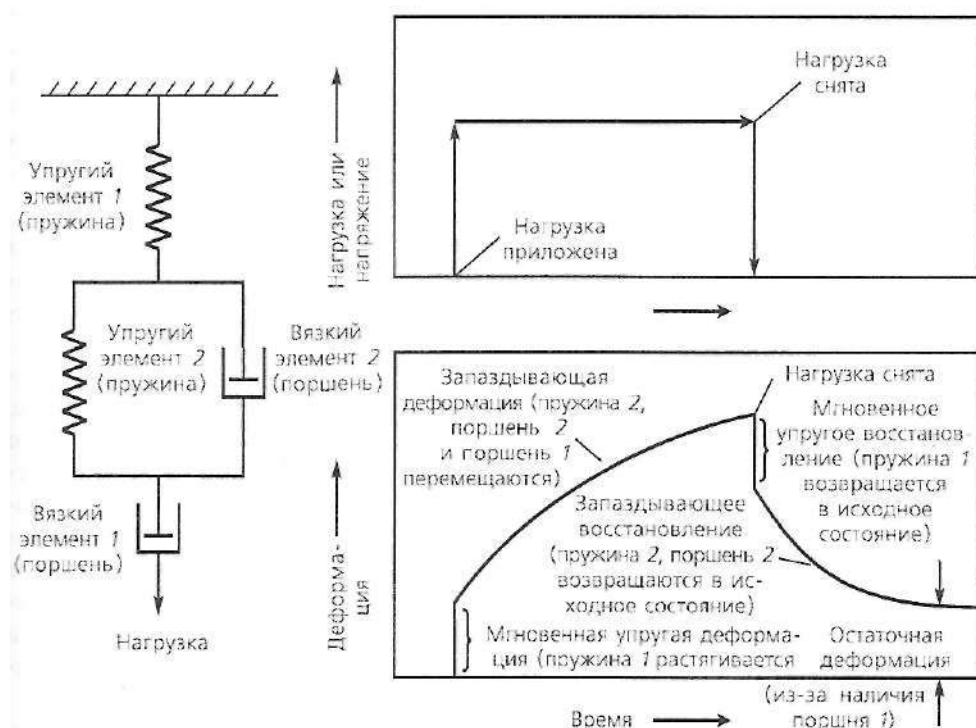


Рис. 3.20. Пружина (упругий элемент) и поршень (вязкий элемент) обычно используются для описания механических свойств полимерных материалов

Упругий элемент 2 не может удлиниться мгновенно, поскольку его перемещение ограничивается вязкостью поршня. Дальнейшее нагружение приводит к продолжению деформации по мере перемещения поршня 1, поршня 2 и растяжения пружины 2. Таким образом, представляется ползучесть или запаздывающая деформация. В некоторой точке растяжения пружина 2 (а следовательно, и поршень 2) достигнет равновесия, но поршень 1 будет продолжать перемещаться от действия приложенной нагрузки. При разгрузке вследствие накопленной пружинной 1 энергии происходит мгновенное упругое восстановление, за которым следует запаздывающее восстановление, связанное с возвращением в исходное состояние пружины 2. Следует учесть, что эта часть восстановления регулируется поршнем 2. Перемещение поршня 1 необратимо и представляет собой остаточную деформацию. Несмотря на то что реальные ползучесть и эластичность при восстановлении большинства пластмасс представляет собой более сложный процесс, эта модель дает возможность лучше понять природу вязкоупругого поведения. В действительности, когда пластмассы нагружаются, наблюдается мгновенная упругая деформация, за которой следует первый, второй и третий этапы ползучести [8].

На первом этапе процесс ползучести связывается с уменьшением ее скорости во времени, и этот процесс частично обратим. Ползучесть на втором этапе происходит с постоянной скоростью, а на третьем этапе перед разрушением наблюдается возрастание скорости ползучести. Скорость ползучести зависит от материала, напряжения и температуры, так же, как и значения разрушающей деформации при ползучести. Здесь следует заметить, что разрушение (или течение) будет происходить при значениях напряжения ниже соответствующих значений разрушающих напряжений, полученных при проведении кратковременных испытаний.

Испытание на ползучесть

Производители материала получают данные о ползучести, проводя испытания на отлитых контрольных образцах при различных уровнях напряжения (обычно производят измерения при четырех и более значениях напряжения) и наблюдая за изменением деформации как функции от времени.

Выбираются наиболее характерные для условий эксплуатации значения температуры. Испытания могут проводиться при растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге. В идеальном случае, для точного изучения процесса ползучести рассматриваемого материала, испытания должны проводиться в течение многих лет, но из-за понятных ограничений испытания обычно проводятся в течение более коротких периодов времени. Для конструкторов важно знать, являются ли используемые ими данные экспериментальными или эти данные получены расчетным путем из результатов кратковременных испытаний. Возможно теоретически рассчитывать кривые ползучести и прогнозировать разрушения при ползучести, но подобными результатами следует пользоваться осторожно — их достоверность обычно ограничивается одним логарифмическим порядком [9].

Экспериментальные данные используются для построения графика «кривой ползучести», то есть зависимости деформации от логарифма времени при постоянных значениях температуры и относительной влажности и при разных уровнях напряжения (то есть

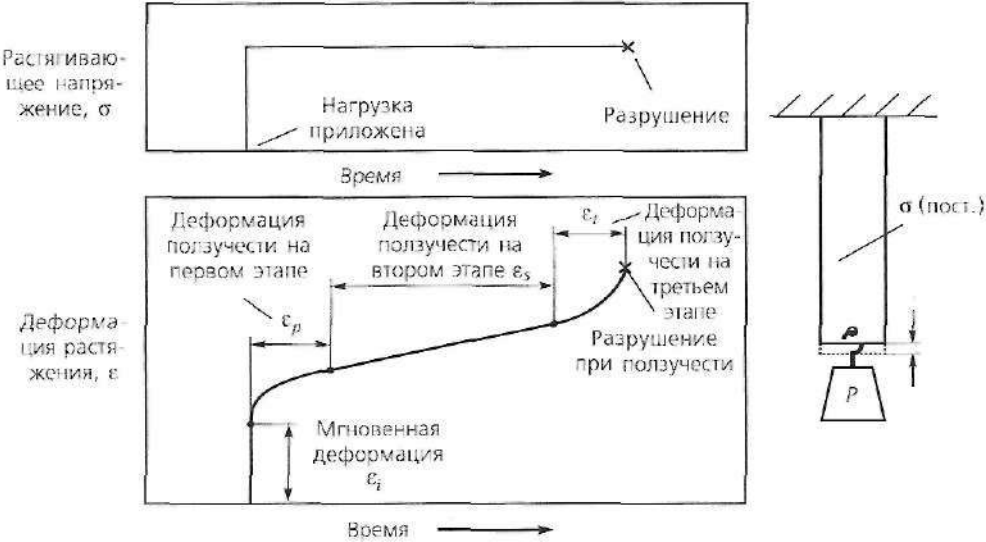


Рис. 3.21. Деформации полимерных материалов при их нагружении могут включать как упругую деформация, так и деформацию ползучести

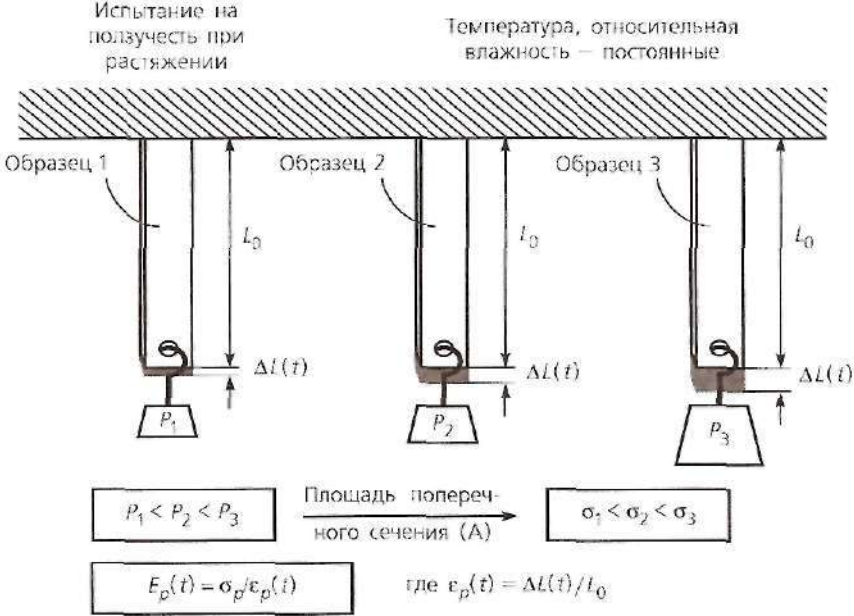


Рис. 3.22. Данные о ползучести получают из серии испытаний при различных нагрузках или напряжениях, испытывая и фиксируя изменение деформации во времени

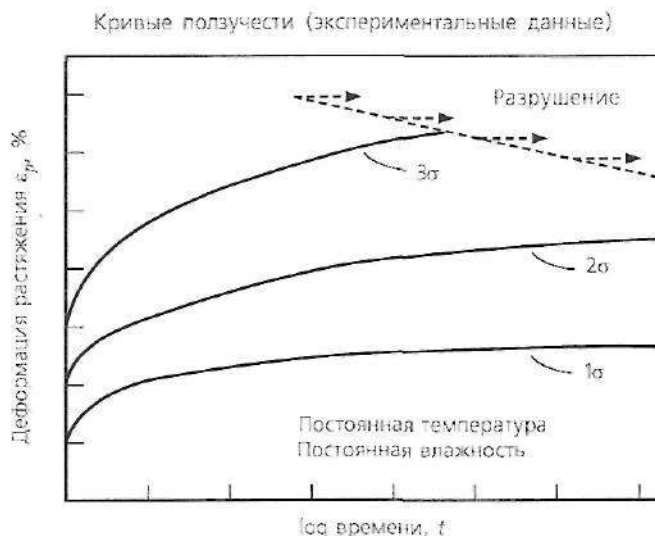


Рис. 3.23. Экспериментальные данные из испытаний ползучести используются для построения зависимости деформации от логарифма времени при различных уровнях напряжения. На этом графике постоянны температура и относительная влажность

для получения «кривой ползучести»). Наклон кривой ползучести отражает стабильность размеров изделия из данного полимерного материала в зависимости от величины напряжения. Повышение уровня напряжения и температуры приводит к возрастанию ползучести.

Скорость ползучести для полимеров с наполнителями или армированных волоками существенно ниже, чем у исходных материалов, при условии хорошей взаимосвязи полимера с наполнителями. На рис. 3.24 показано, что значения деформации ползучести для ПА 6.6, армированного стекловолокнами, существенно ниже, чем у чистого ПЛ 6.6 даже в случае, если па армированный материал действуют более высокие напряжения. Ползучесть может быть уменьшена при использовании для армирования графитовых волокон (рис. 3.25) [10]. Кроме того, на ползучесть армированных полимерных материалов влияют линии спая и ориентации волокон. При тестировании ползучести также следует проверять образцы на текучесть, разрушение, трещинообразование, сморщивание и побеление под воздействием нагрузок.

Результаты испытаний разрушения при ползучести (или текучести) обычно используются для построения кривых, показывающих зависимость напряжения при разрушении или текучести от логарифма времени при различных температурах (рис. 3.26).

В процессе ползучести может произойти как пластичное, так и хрупкое разрушение, которое обычно различается по внешнему виду (на макроскопическом уровне). При пластическом разрушении наблюдаются такие виды макроскопической пластической деформации, как течение, образование шейки и т. п., в результате которых

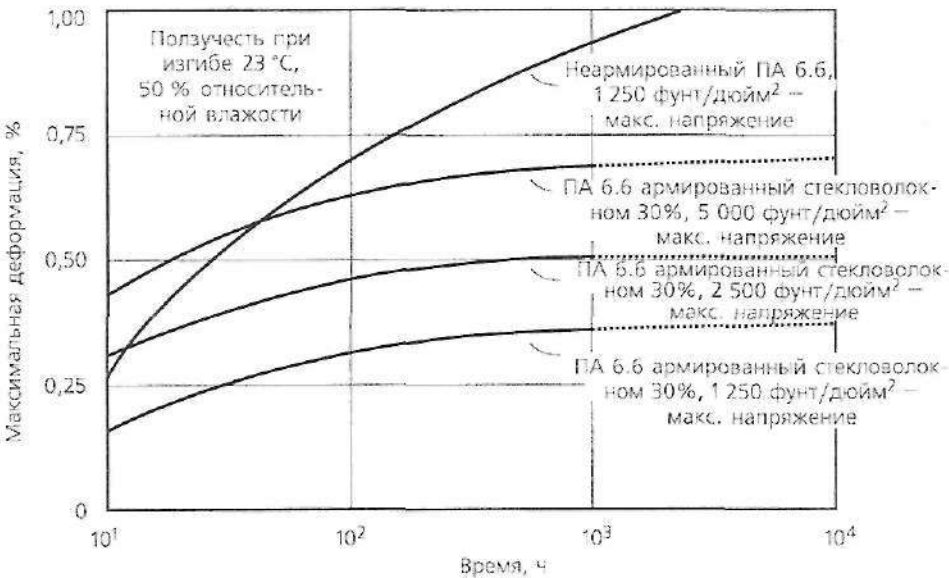


Рис. 3.24. Сопротивление ползучести существенно улучшается при армировании полимерного материала

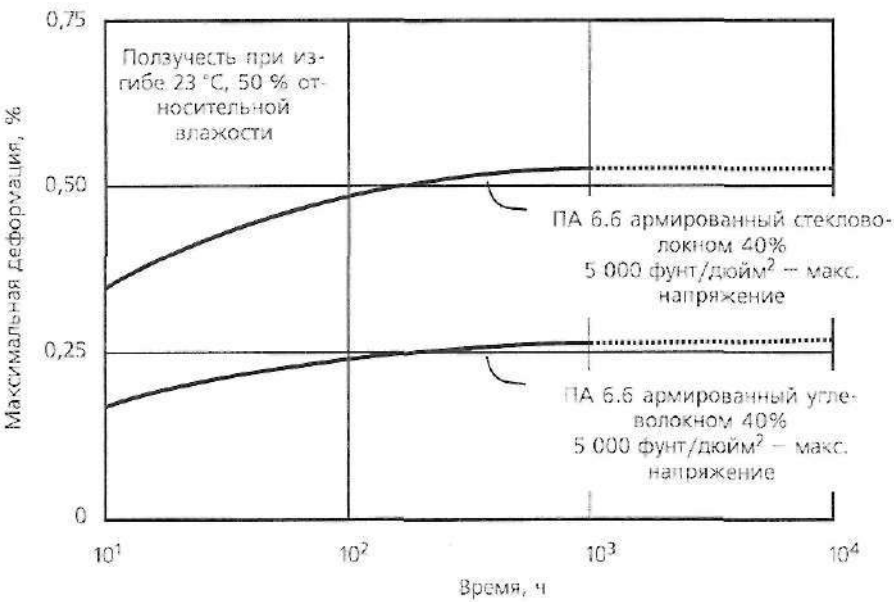


Рис. 3.25. Стекланные или углеродные волокна обычно используются для уменьшения ползучести полимерного материала

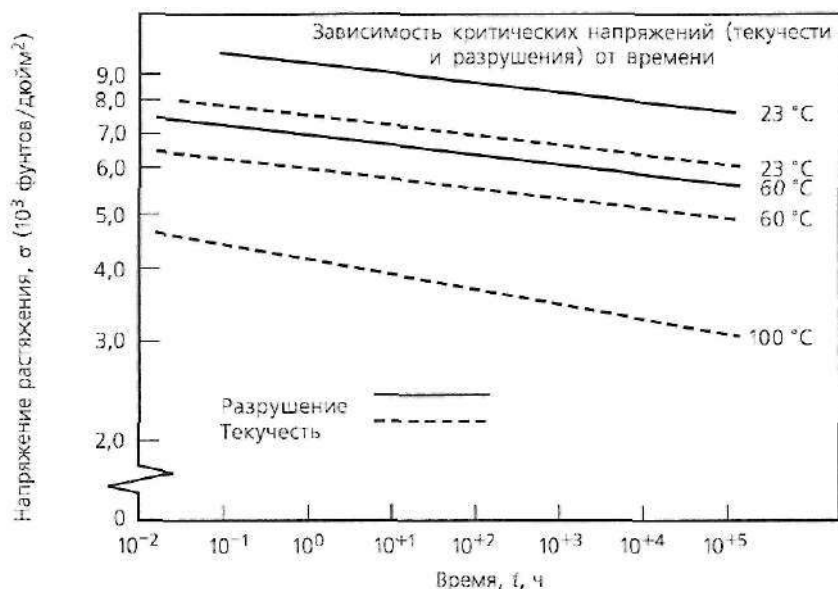


Рис. 3.26. Напряжение, вызывающее у изделия текучесть или разрушение при ползучести, зависит от длительности нагружения и от температуры. Величины напряжения, вызывающие текучесть и разрушение при ползучести, приведены для ПК при различных температурах

происходит изменение формы. Хрупкие разрушения не приводят к большим деформациям, а только вызывают незначительные локальные пластические деформации в области разрушения [11].

Микротрещины (волосяные трещины)

У многих пластмасс разрушения начинается с образования микротрещин. Трещины являются плоскостными дефектами, образующими взаимопроникающую сетку пустот внутри высокоориентированных полимеров. Образование микротрещин — это процесс образования пустот, который сопровождается увеличением объема (рис. 3.27) [11].

Образование микротрещин начинаются с образования микропор под действием растягивающего напряжения. Затем эти поры начинают увеличиваться в размере и удлиняться в направлении действия растягивающего усилия, принимая форму тонких волокон (фибрилл), которые формируют поверхность покрытую трещинами. Появление микротрещин само по себе не означает разрушение в условиях статического нагружения, но может привести к хрупкому разрушению, если в процессе эксплуатации материал подвергается ударным, динамическим нагрузкам, особенно в присутствии агрессивных химических веществ.

Даже вода или мягкие моющие средства могут оказывать негативное воздействие на механические свойства изделий из пластмасс, которые подвергаются механическим нагрузкам [12].

Побеление при нагружении

Побеление при нагружении — это общий термин, который используется для описания явления, проявляющегося в виде помутнения или побеления в прозрачных или полупрозрачных полимерных материалах. Побеление обычно является результатом появления микропор, которое вызвано отслоением наполнителей или волокон, а также локализованным разрушением вблизи таких включений, как частицы каучука или других противоударных модификаторов [10].

Кривые ползучести

Кривые ползучести, аналогичные показанным на рис. 3.23–3.25, представляют собой графическое изображение экспериментальных данных, полученных после испытаний на ползучесть. Эти экспериментальные данные также могут быть предоставлены и в более удобном для конструкторов виде.

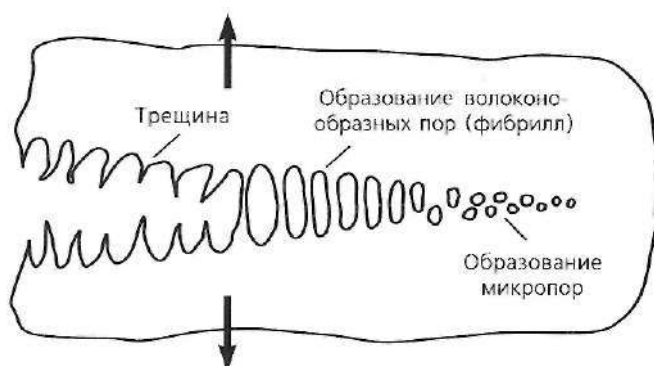


Рис. 3.27. Микропоры и микротрещины могут в конечном счете приводить к растрескиванию и хрупкому разрушению



Рис. 3.28. На снимке показано образование трещин в изделии из акрила

Кривые ползучести, аналогичные показанным на рис. 3.29, обычно получают при стандартных значениях времени (обычно 1, 10, 100, 1000 ч и т. д.), чтобы затем получить зависимость напряжения от деформации в этих временных интервалах. На основе этих данных составляются графики изохронных зависимостей напряжения от деформации, как показано на рис. 3.30 [12]. Эти кривые используются вместо кривых кратковременных зависимостей напряжения от деформации, когда осуществляется проектирование изделий, эксплуатирующихся при долговременных статических нагрузках.

Изохронные зависимости напряжения от деформации обычно получают при разных температурах, что дает возможность конструктору учесть влияние как времени, так и температуры на значение релаксирующего (изменяющегося) модуля ползучести полимера. Эти значения модуля ползучести обычно используются вместо модуля Юнга в классических расчетных уравнениях для прогнозирования деформаций или изменения формы, вызванных длительным нагружением. Следует отметить, что значения этого модуля зависят от времени, температуры и уровня приложенной нагрузки. На изохронных зависимостях напряжения от деформации (рис. 3.30-3.32) показаны пределы образования микротрещин или начало растрескивания для полимеров при различных температурах. Критическое значение напряжения на рисунке обозначено точкой пересечения изохронной кривой с пунктирной линией, обозначающей начало образования микротрещин. Например, на изохронной зависимости напряжения от деформации для ПК при 60 °С и 50 % относительной влажности (рис. 3.31), видно, что микротрещины будут появляться примерно через 10 ч после приложения нагрузки величиной 4000 фунт/дюйм² (74 МПа). Приблизительно 10 000 ч потребуется для

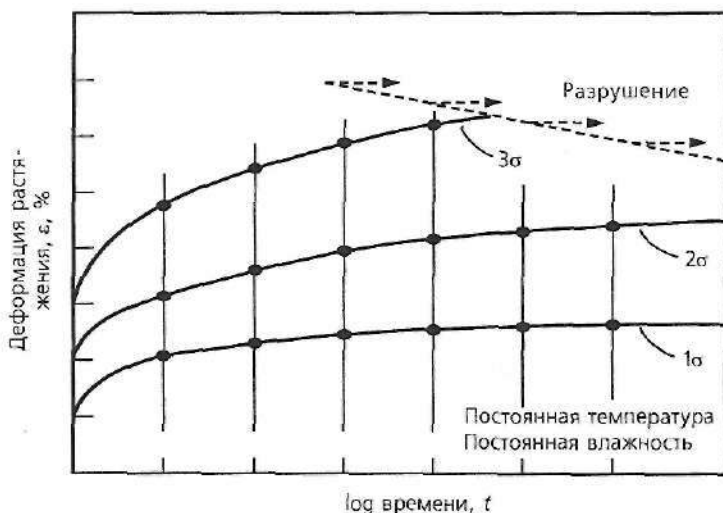


Рис. 3.29. Кривые ползучести обычно пересекают при определенных значениях времени (1, 10, 100, 1000 ч и т. д.), чтобы иметь данные для построения изохронной зависимости напряжения от деформации. Точки пересечения соответствуют одинаковым значениям времени ползучести

того, чтобы появились микротрещины при нагрузке величиной 2000 фунт/дюйм² (36 МПа). Следует учитывать, что информация о предельных значениях напряжений и деформаций, приводящих к образованию микротрещин, не всегда должна служить критерием при определении конструкторами верхнего предела допустимого напряжения.

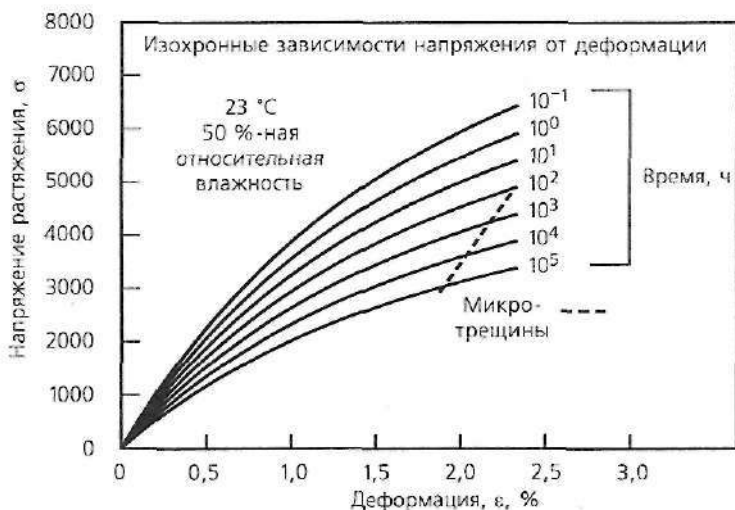


Рис. 330. Набор изохронных зависимостей напряжения от деформации для ПК при комнатной температуре и относительной влажности 50 %

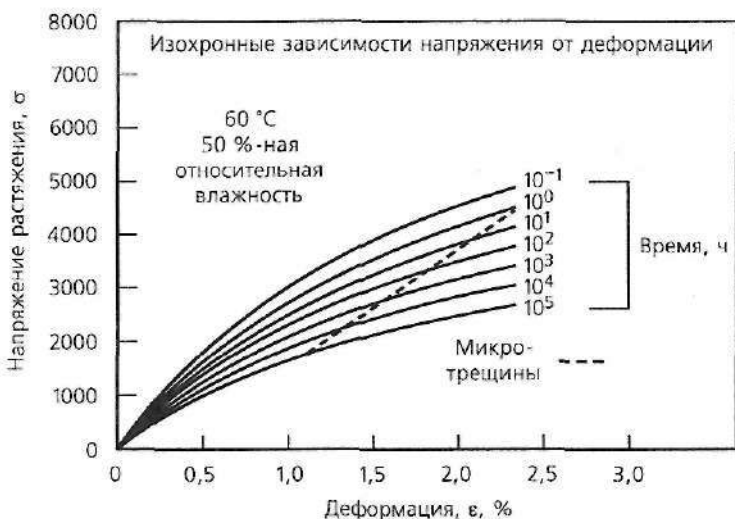


Рис. 331. Набор изохронных зависимостей напряжения от деформации для ПК при 60 °C и 50 % относительной влажности

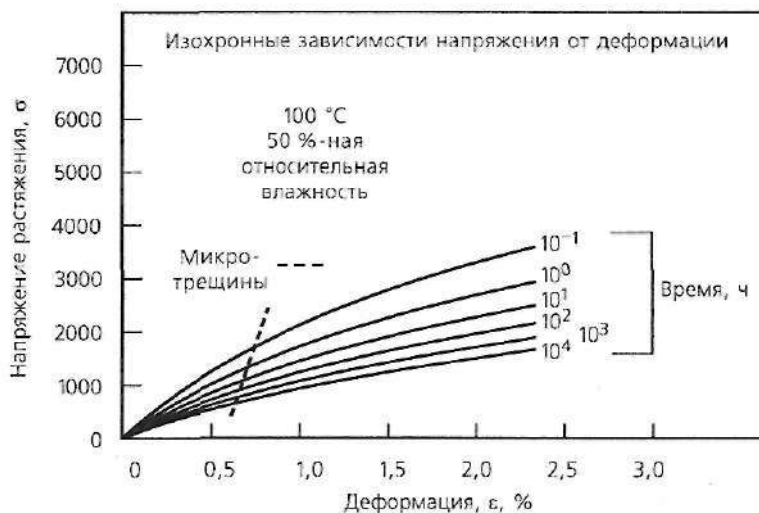


Рис. 3.32. Набор изохронных зависимостей напряжения от деформации для ПК при 100 °C и 50 % относительной влажности

Данные о ползучести могут быть предоставлены в виде графиков, представляющих значения модуля ползучести в определенные периоды времени при разных напряжениях (рис. 3.33, 3.34). Из кривых четко следует влияние уровня напряжения на значения релаксирующего модуля [12].

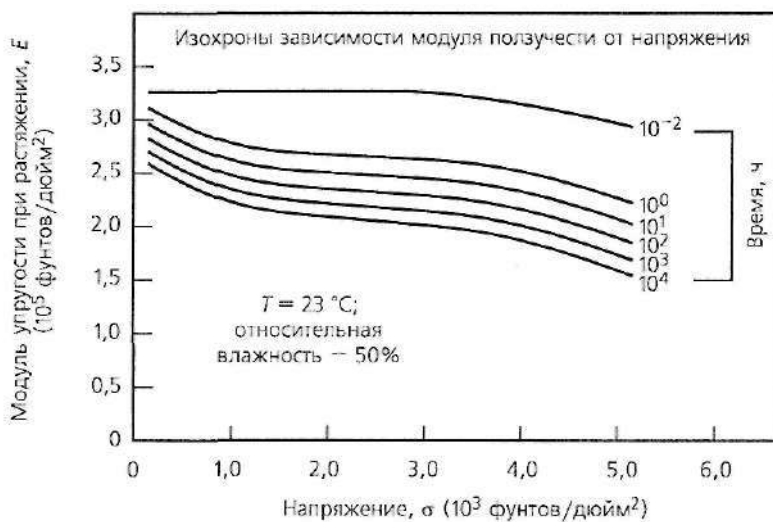


Рис. 3.33. Зависимость модуля ползучести от напряжения при заданных значениях времени для ПК при комнатной температуре и относительной влажности 50 %

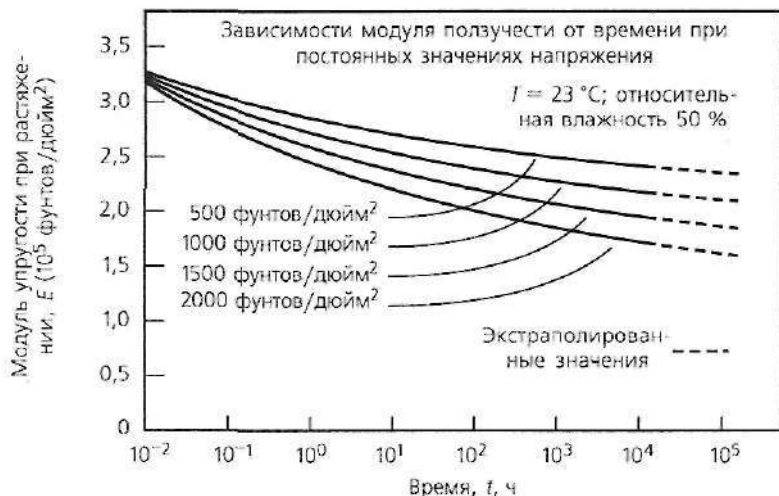


Рис. 334. Зависимости модуля растяжения при ползучести от логарифма времени при различных уровнях нагрузки. Экстраполяцию на большие времена следует проводить в пределах одного логарифмического порядка

Данные о ползучести часто предоставляются в виде графиков зависимостей модуля ползучести от логарифма времени при различных уровнях нагрузки. Подобный графический способ представления данных очень удобен, поскольку он:

а) дает возможность конструкторам определить значения модуля ползучести при различных значениях времени;

б) облегчает задачу экстраполяции кривой на большие периоды времени.

Однако следует еще раз заметить, что экстраполированными данными следует пользоваться осторожно, и они должны быть ограничены одним логарифмическим порядком.

3.4.4. Механические свойства, зависящие от времени. Релаксация напряжений

Данные о ползучести используются для конструирования изделий из пластмассы, испытывающих постоянную нагрузку или напряжение в течение продолжительного периода времени. Данные же о релаксации напряжения необходимы в тех случаях, когда изделие во время эксплуатации испытывает продолжительное время постоянную деформацию. Когда изделия из пластмассы подвергаются растяжению, сжатию, изгибу или сдвигу при фиксированных значениях деформации или изменению формы, то значения напряжения, связанные с этой деформацией, уменьшаются во времени из-за вязкости материала. Релаксация напряжений аналогична ползучести в том, что модуль релаксации $E_R(t, T)$ уменьшается со временем:

$$E_R(t, T) = \sigma(t, T) / \epsilon_0. \quad (3.7)$$

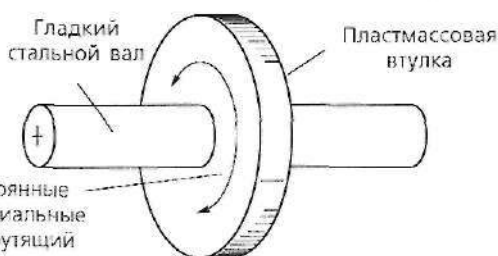
где значение деформации постоянно, а значение напряжения является функцией как времени, так и температуры.

Характеристики релаксации напряжения полимера играют очень важную роль, например, в случаях его применений, показанных на рис. 3.35. Часто при эксплуатации изделия существенное значение имеют силы трения, возникающие при прессовом соединении. Так, в случае прессовой втулки, возможности передачи крутящего момента определяются площадью контакта, коэффициентом трения и величиной напряжения. По мере того как релаксируют напряжения в пластмассовой втулке, возможность передачи крутящего момента уменьшается. В случае кольцевого соединения для предотвращения утечки необходимы сжимающие нормальные напряжения. Как только происходит релаксация напряжений, возможность утечки увеличивается.

Релаксация растягивающих напряжений

Прессовое соединение зубчатого колеса, шкива или втулки

Возникают постоянные кольцевые и радиальные деформации; крутящий момент из-за проскальзывания уменьшается во времени



Релаксация сжимающих напряжений

Кольцевое уплотнение для водопроводной арматуры

Сжатое кольцевое уплотнение, постоянная деформация, релаксация напряжений со временем, возможна утечка



Релаксация напряжений при изгибе

Отлитая скрепка для бумаги или экструдированный зажим

Листы бумаги

Напряжения при изгибе возникают из-за определенной толщины стопки листов бумаги, сжимающее усилие со временем уменьшается

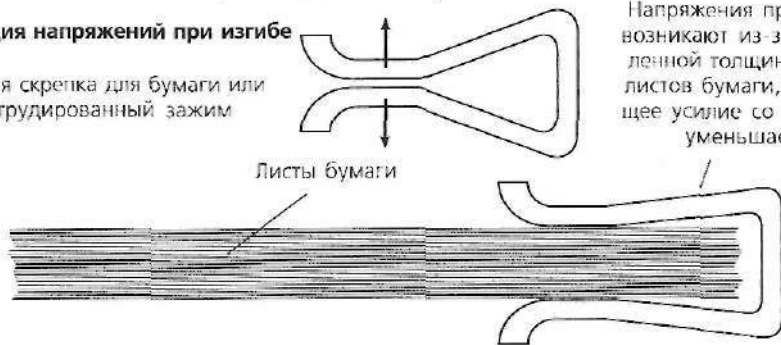


Рис. 3.35. Типичные примеры условий использования изделий из пластмассы, при которых они находятся постоянно в деформированном состоянии. В этом случае необходимы данные о релаксации напряжений (в большей степени, чем данные о ползучести)

Характеристики релаксации напряжения полимерного материала играют очень важную роль, когда части изделия при сборке предварительно нагружаются или содержат пластмассовые пружинистые компоненты. Чтобы сконструировать изделия для данных вариантов эксплуатации, необходимо воспользоваться данными по релаксации напряжения при соответствующих значениях деформации, температуры и времени, которые предоставляются поставщиками материалов.

Данные по релаксации напряжений получают при фиксированном значении деформации отлитого образца, после чего производят измерение уменьшения напряжения со временем. Испытания могут быть проведены при растяжении, сжатии, сдвиге и изгибе. Данные по релаксации напряжений могут быть использованы для построения изохронных зависимостей напряжения от деформации, которые аналогичны тем, которые были получены при обработке экспериментальных данных для ползучести [12].

Данные по релаксации напряжений могут быть также предоставлены в форме зависимости модуля релаксации от логарифма времени при различных постоянных значениях деформации (рис. 3.37) [12].

К сожалению, информация о релаксации напряжений не так доступна, как в случае ползучести, во многом из-за относительной сложности оборудования.

Если данные по релаксации напряжений недоступны, можно приблизительно оценить уменьшение напряжения по данным о ползучести, однако на практике этого делать не рекомендуется [6,7]. Установлено, что модули ползучести и релаксации могут быть аналогичными при небольших изменениях времени и низких уровнях деформации.

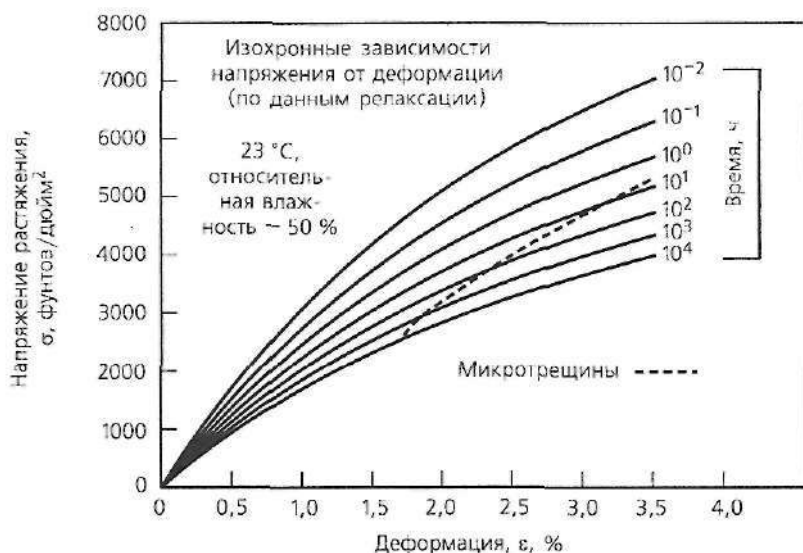


Рис. 336. Как и данные по ползучести, данные по релаксации напряжений используются для построения изохронных зависимостей напряжения от деформации. На графике приведены данные по релаксации ПК при комнатной температуре и относительной влажности 50 %

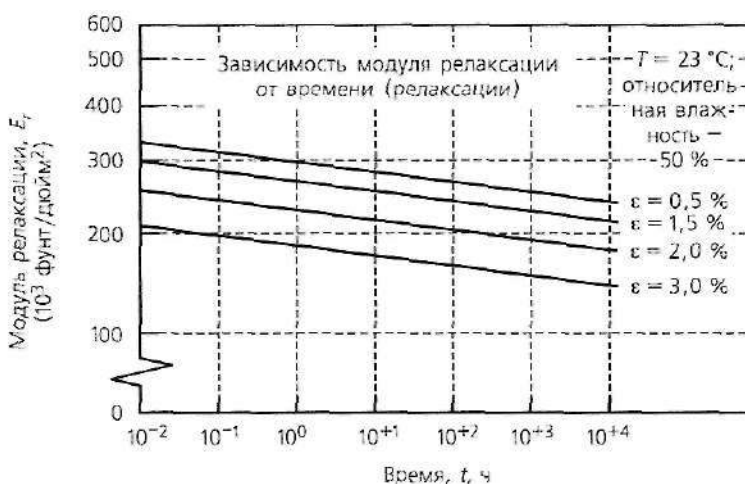


Рис. 337. Зависимости модуля релаксации от времени при различных постоянных деформациях для ПК при комнатной температуре и относительной влажности 50 %

ции, но при увеличении времени и высоких уровнях деформации разность значений этих двух модулей возрастает [12].

3.5. Ударная прочность полимерных материалов

Ударная прочность определяется как возможность материала выдерживать большие по величине импульсные нагрузки [6]. Удар приводит к относительно высокой нагрузке, обычно большей, чем в условиях обычного тестирования механических свойств. В ряде случаев ударную нагрузку изучают, бросая изделия на жесткую поверхность или подвергая их воздействию брошенного тела. В этих случаях изделия из пластмассы должны быть в состоянии рассеять энергию, связанную с воздействием ударной нагрузки. Этого можно достигнуть как за счет конструкции изделия (например, за счет использования больших радиусов кривизны в углах изделий, амортизирующих креплений и т. п.), так и за счет правильного выбора материала. Ударные характеристики пластмасс в значительной степени зависят от скорости ударного воздействия, температуры, типа нагружения, формы образца, его толщины и других параметров. Ударные характеристики могут сильно отличаться от партии материала к партии, кроме того, следует учитывать, что проблемы с ударной прочностью обычно возникают, когда пластмассы используются при низких температурах. (Проблемы, связанные с ползучестью и релаксацией напряжений, возникают в большей степени при повышенных температурах.)

Стандартные методы испытаний, обычно использующиеся для оценки ударной прочности пластмасс, как правило, не дают всех ударных характеристик. Данные о поведении материала при ударных нагрузках, полученные с помощью стандартных



Рис. 338. Ударная прочность у большинства полимерных материалов возрастает с увеличением температуры

испытаний, используются для оценки «относительной устойчивости» к удару и чувствительности материала к надрезу, необходимые при начальном отборе материала. Некоторые, используемые на практике методы испытания на прочность к удару, описаны ниже [5—7,12].

Испытания по Изоду

Наиболее часто используемое испытание на удар — это испытание на маятниковом копре по Изоду. Здесь измеряется энергия, необходимая для разрушения надрезанного консольного образца маятником, отклоненным на фиксированную высоту. В образце предварительно делается надрез, выполняющий роль концентратора напряжений и места образования трещины.

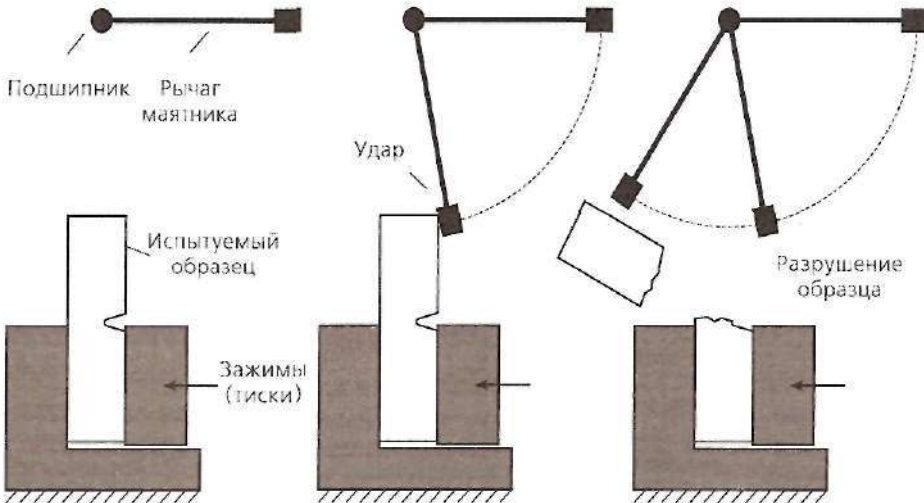


Рис. 339. Метод испытаний по Изоду — это испытание на удар на маятниковом копре при консольном закреплении образца

Результаты метода ударных испытаний по Изоду характеризуют свойства надрезанных образцов, которые могут существенно отличаться от свойств ненадрезанных реальных изделий (в особенности при других скоростях удара и температурах). Испытание также можно проводить на образцах без надрезов, с надрезами на внутренней стороне и при разных радиусах закругления линии надреза. Такие испытания относятся к нестандартным.

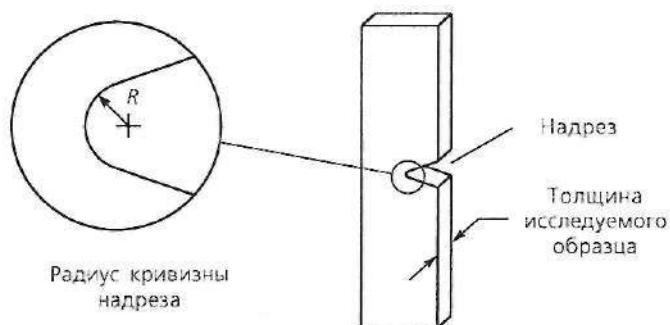


Рис. 3.10. Толщина образца, радиус кривизны надреза и способ нанесения надреза, значительно влияют на результаты испытаний при ударе

Ударная прочность полимерных материалов возрастает при увеличении температуры и радиуса кривизны надреза. Поэтому очень важно следить за значениями радиусов кривизны у пластмассовых изделий, чтобы снизить эффект концентрации напряжений. Однако на практике радиусы кривизны зависят от наличия пор, утяжин или усадочных напряжений [5,12].

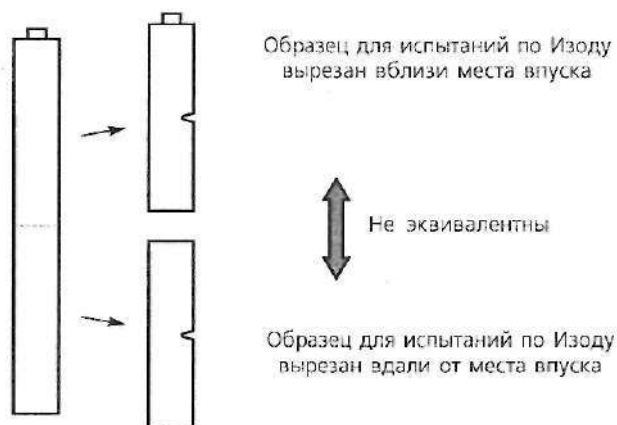


Рис. 3.41. Процедура подготовки образца оказывает сильное воздействие на результаты испытания на ударную прочность

Значения ударной прочности по Изоду зависят от очень большого числа параметров, связанных с технологическими особенностями производства изделия и способами получения надреза. Можно отлить образец прямо с «надрезом», то есть в форме аналогичной контрольному образцу с механическим надрезом. Но такой образец, как правило, дает более высокие значения прочности, чем образцы, изготовленные механической обработкой, что связано с поверхностными эффектами [13]. Преимущество образца, отлитого с надрезом, заключается в том, что края надреза получают сглаженными. Толщина контрольного образца также является важным параметром при испытании на ударную прочность; толщина влияет на количество микропор в образце. Кроме того, для некоторых марок материалов ударная прочность возрастает с увеличением толщины образца до критического значения, т. к. происходит изменение механизма разрушения — от пластического к хрупкому. Также наблюдалось значительное уменьшение ударной прочности в случае превышения критического значения толщины образца [5, 12].

Испытание по Шарпи

Испытание по Шарпи — это испытание на удар на маятниковом копре, аналогичное испытанию по Изоду, но вместо консольного закрепления контрольные образцы устанавливаются на две опоры вблизи торцов, после чего ударом в среднюю часть образца между опорами ударит маятниковый копер [5-7].

Ударное (скоростное) растяжение

Испытания на ударное растяжение является способом испытания образцов на ударную прочность, но в отличие от испытаний по Изоду и Шарпи здесь используется небольшой образец в форме «двойной лопатки», который подвергается растягивающему напряжению вдоль одной оси.

Площадь под кривой, отражающей зависимость напряжения от деформации

Площадь под кривой, отражающей зависимость напряжения от деформации, является характеристикой ударной вязкости материала при определенной скорости растяжения, что было показано ранее (рис. 3.14).

В случае, когда пластмассовые образцы испытываются при высоких скоростях деформирования (то есть когда они подвергаются таким скоростям растяжения, которые близки к удару), площадь под зависимостью напряжения от деформации (то есть ударная вязкость) характеризует сопротивление удару. Величина ударной вязкости измеряется либо по площади под зависимостью напряжения от деформации до предела текучести, либо с учетом площади под всей этой зависимостью вплоть до разрушения материала.

Испытание на удар падающим грузом

Второй наиболее часто встречающейся группой методов испытания на удар является падение стрелы или копра с определенной высоты и ударяющих по образцу в форме диска, закрепленного в специальном держателе (рис. 3.10). В некоторых случаях это испытание используется для оценки ударных характеристик готовых изделий. Простейшим методом испытаний падающим грузом считается использование копров с полусферическими головками для оценки усилия или энергии, необходимой для разрушения образца при падении с заданной высоты (в этом случае начальная скорость при ударе остается постоянной).

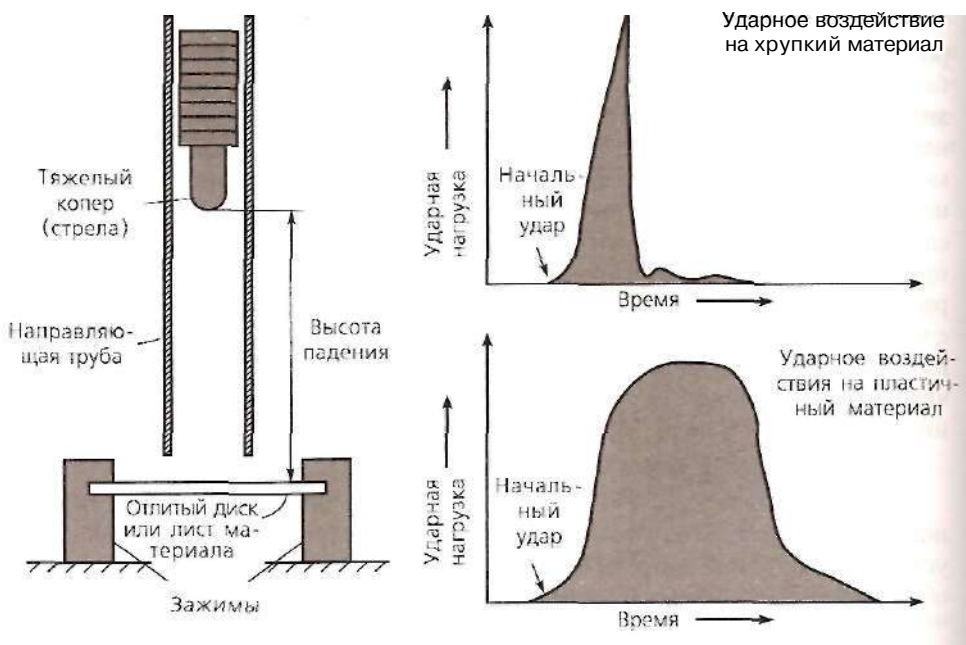


Рис. 3.42. Типичная схема испытания падающим грузом для хрупких и эластичных материалов

В более сложных случаях тестирования на удар используются специальные копры и стрелы. В измерительной установке с использованием метода падения применяются как тензодатчики, так и датчики перемещения, чтобы получить данные об ударной нагрузке и деформациях в процессе воздействия копра на образец (рис. 3.42 [6]).

3.6. Усталостные свойства

Знание усталостных свойств материала необходимо при конструировании изделий, подвергающихся многократному или циклическому воздействию нагрузки.

К таким изделиям относятся шестерни, головки фиксаторов или другие компоненты, находящиеся под периодическим воздействием нагрузок или деформации. В изделиях, испытывающих циклические ударные воздействия и обладающих низкими усталостными свойствами, могут развиваться микротрещины или другие дефекты, которые со временем понижают прочность материала и приводят к его возможному разрушению [5-7, 12]. Тесты на усталость обычно проводятся путем приложения к отлитому образцу переменного напряжения одинакового по абсолютной величине, но разного направления, или между нулевым и максимальным положительным или отрицательным значениями. Тесты обычно проводятся на изгиб, скручивание или растяжение при заданной частоте, температуре и амплитуде нагрузки. Напряжение, при котором материал будет разрушаться от усталости, уменьшается

с увеличением числа циклов. Это говорит о том, что существуют напряжения, ниже которых усталостное разрушение маловероятно вне зависимости от числа циклов [6, 7] (рис. 3.43 [10]).

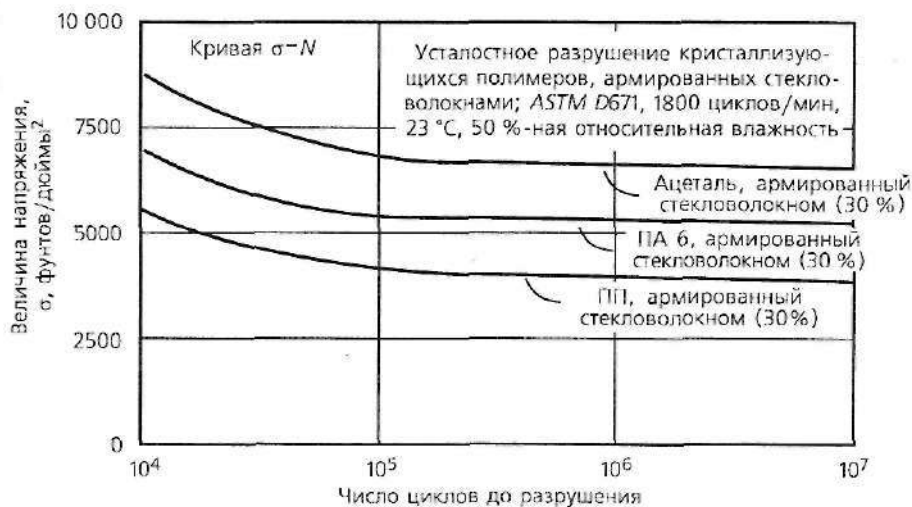


Рис. 3.43. Кривые усталостной прочности $\sigma-N$ (σ - напряжение, N - число циклов до разрушения, далее: $\sigma-N$) для некоторых армированных волокнами полимерных материалов

Поскольку пластмассы являются вязкоупругими (и очень чувствительными к температуре) материалами, их усталостные свойства существенно зависят от частоты, амплитуды, геометрической формы и температуры. При повышении частоты или амплитуды пластмассовые изделия будут сильнее разогреваться и быстрее разрушаться. При проектировании изделий, которые предполагается эксплуатировать в условиях циклической нагрузки, рекомендуется выбирать материалы с высокой усталостной прочностью, а сами изделия конструировать тонкостенными (см. раздел 4.9.2), чтобы максимально увеличить рассеяние тепла. Все тесты должны проводиться с использованием отлитых образцов (для учета остаточных напряжений) в условиях (частота, температура и т. д.), которые воспроизводят реальные условия эксплуатации изделия [6,7].

3.7. Температурные свойства полимерных материалов

3.7.1. Термомеханические свойства материалов

По сравнению с большинством металлов, свойства пластмассы очень чувствительны к изменениям температуры. Поскольку многие свойства материалов зависят от температуры, конструкторам очень важно правильно оценить как максимальные, так

и минимальные температуры, которым подвергаются изделия в условиях эксплуатации. Большинство полимерных материалов становятся хрупкими в диапазоне низких температур и размягчаются выше определенного значения температуры. Конструкторы должны найти (или получить экспериментально) данные о механических свойствах в диапазоне температур, соответствующего условиям эксплуатации. Термомеханическое поведение пластмассы наиболее удобно описывать с помощью зависимостей модуля жесткости от температуры. Аморфные полимеры имеют зависимости модуля жесткости от температуры, аналогичные кривой, приведенной на рис. 3.44.



Рис. 3.44. Зависимость модуля от температуры для аморфного полимера

Аморфные полимеры размягчаются постепенно по мере возрастания температуры и фактически не имеют четкой температуры плавления (из-за того, что молекулы полимера распределены хаотично). При низких температурах аморфные полимеры являются жесткими и стеклообразными. В области критической температуры или, если говорить более точно, выше узкого температурного диапазона, аморфные полимеры становятся эластичными. Эту температуру называют температурой стеклования, T_g — она связана со значительным увеличением подвижности сегментов полимерных цепочек. При температурах выше T_g полимерный материал становится высокоэластическим и остается таким вплоть до достаточно высоких температур, при которых материал переходит в жидкое состояние (то есть при температурах переработки).

Термины «низкая» и «высокая» температура означают диапазоны температур относительно температуры стеклования. Такие жесткие аморфные полимеры, как ПС или ПК, имеют значения T_g значительно выше комнатной температуры, поэтому при комнатной температуре они являются жесткими. При повышенных температурах предпочтительней использовать ПК, так как его температура стеклования $T_g = 150^\circ\text{C}$, то есть выше, чем у ПС ($100\text{--}105^\circ\text{C}$) [14]. С другой стороны, аморфные эластомеры (иногда слабосшитые) находятся в эластичном состоянии при комнатной температуре, так как их значения T_g находятся ниже комнатной температуры.

Температурная зависимость модуля жесткости таких кристаллизующихся полимеров, как ПА или ПП, сильно отличается от аморфных полимеров типа ПС. В отличие от аморфных полимеров, кристаллизующиеся полимеры имеют достаточно определенную



Рис. 3.45. Температурная зависимость модуля для аморфных и частично кристаллических полимеров

температуру плавления, T_m (или температурный диапазон плавления), которая связана с фазовым переходом из твердого кристаллического состояния в аморфный расплав. Здесь следует заметить, что подобные материалы являются частично кристаллическими — в них одновременно присутствуют аморфные и кристаллические области. Кристаллические области полимера остаются относительно жесткими до температуры плавления, аморфные сохраняют жесткое состояние до температуры стеклования. У многих частично кристаллических полимеров значение температуры стеклования ниже комнатной температуры, а температуры плавления намного выше. Например, ПЭВП имеет T_g ниже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а T_m около $137\text{ }^{\circ}\text{C}$. Материал остается в жестком состоянии при температуре намного выше этого значения T_g , что определяет его высокую устойчивость к ударным нагрузкам при низких температурах, но высокую ползучесть при температурах выше T_g . Частично кристаллические полимеры, обладающие высокой степенью кристалличности, остаются весьма жесткими при температурах, близких к температурам плавления, что дает возможность использовать их в широком температурном диапазоне. Добавление наполнителей или армирование полимерного материала приводит к увеличению модуля жесткости при данной температуре, но, как правило, не изменяет областей температурных переходов (то есть T_g или T_m). Во многих случаях влияние температуры на механические свойства пластмасс аналогичны воздействию временного фактора. С качественной точки зрения короткие времена воздействия (или высокие скорости деформирования) аналогичны влиянию низких температур, а длительные воздействия (низкие скорости деформирования) — высоким температурам [6,14]. Диаграммы зависимости напряжения от деформации на рис. 3.46, полученные при одном и том же значении скорости деформирования, но при разных температурах, аналогичны зависимостям напряжения от деформации, приведенных на рис. 3.11, полученных при различных скоростях деформирования.

При низких температурах или высоких скоростях деформирования полимерный материал становится более твердым и хрупким, а при более низких скоростях деформирования или высоких температурах — более пластичным. Подобная

температурно-временная взаимосвязь может быть использована для количественной оценки долгосрочного поведения линейных аморфных полимеров (оценки процессов ползучести или релаксации напряжений), если имеются кратковременные зависимости, полученные в этом диапазоне температур (рис. 3.47 [15,14]).

Такая концепция известна под названием «температурно-временной суперпозиции» и используется для оценки долгосрочного механического поведения полимерных материалов кратковременные эксперименты при различных температурах. На рис. 3.47 представлены данные, полученные экспериментально при 25 °С и являющиеся

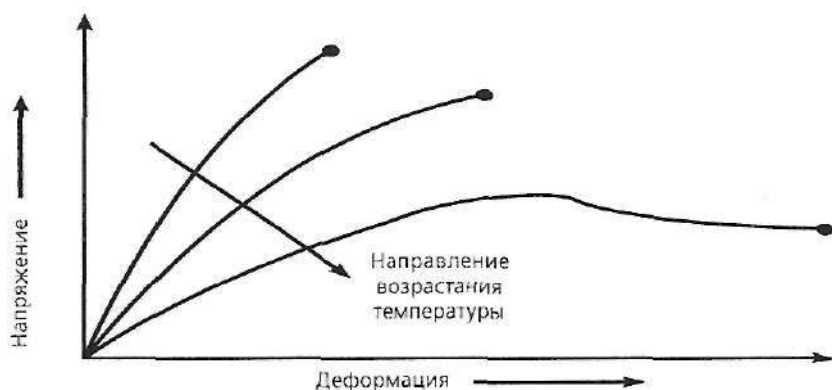


Рис. 3.46. Кратковременные зависимости напряжения от деформации при различных температурах. При высоких температурах полимерные материалы становятся более мягкими и пластичными

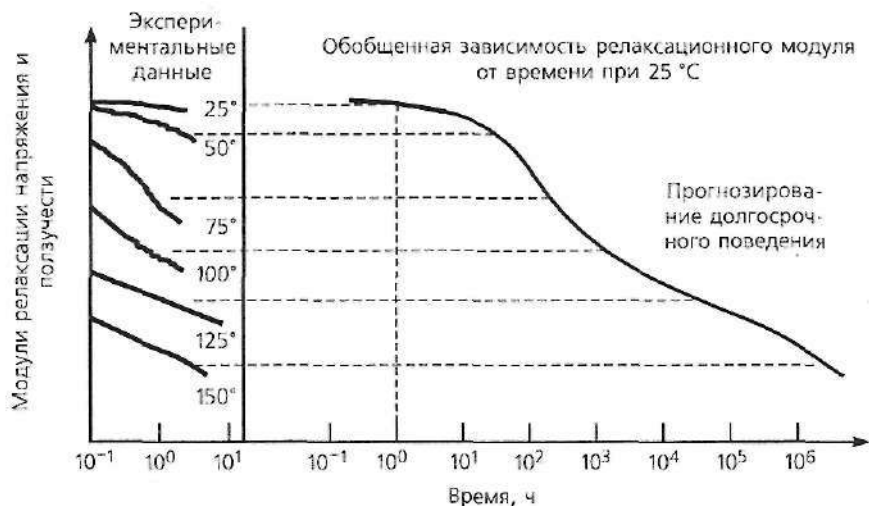


Рис. 3.47. Долгосрочное изменение механических свойств линейных аморфных полимеров можно оценить по кратковременным испытаниям при различных температурах, используя принцип температурно-временной суперпозиции

базовыми. Зависимости, полученные при более высоких (в некоторых случаях — более низких) температурах, которые смещаются вдоль оси времени для создания обобщенной зависимости релаксационного модуля от времени при 25 °С. Эта методика дает возможность оценить свойства линейных аморфных полимеров, хотя экспериментально полученные данные долгосрочной зависимости являются более надежными.

3.7.2. Деформационная термостойкость под нагрузкой и температура размягчения по методу Вика

Существует несколько стандартных кратковременных тестов, которые обычно используются для определения механических свойств пластмасс при повышенных температурах. Большинство тестов известны как испытания «деформационной термостойкости под нагрузкой» (температуры прогибания). Часто этот тест называют «определение температуры тепловых деформаций». Испытание деформационной термостойкости дает приблизительную оценку значения температуры, при которой нагруженный образец прогибается на фиксированную величину (обычно при напряжении составляет 1,82 МПа).

Для аморфных полимеров значение температуры прогибания близко по величине к температуре стеклования. Для частично кристаллических полимеров такое совпадение не наблюдается.

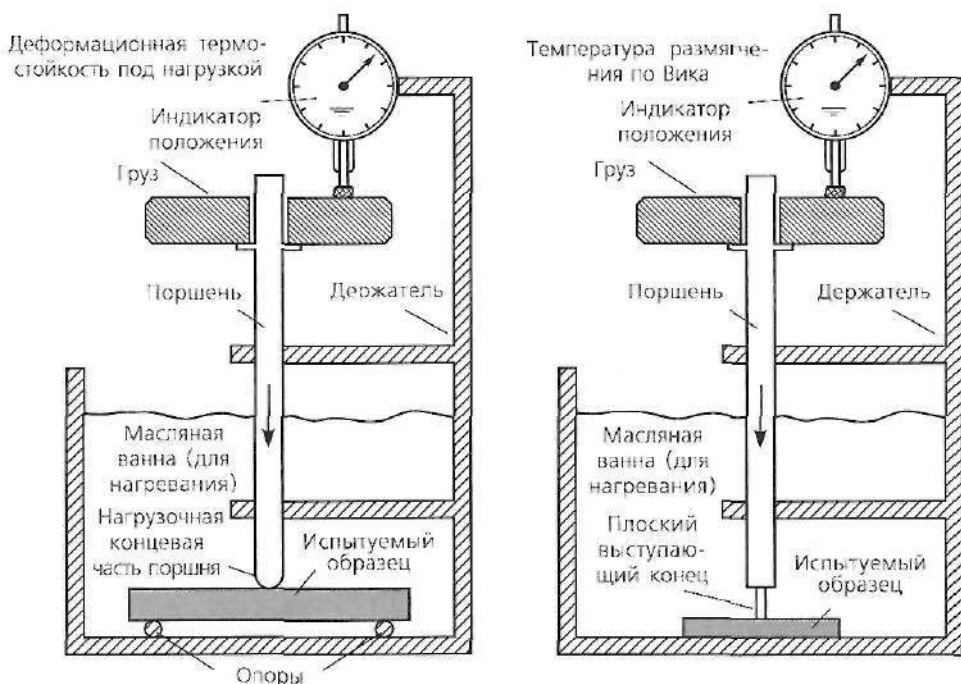


Рис. 3.48. Схемы испытаний и используемые для этого приборы при исследовании деформационной термостойкости под нагрузкой и температуры размягчения по Вика

Целью испытания термостойкости является определение значения температуры, при которой полимер достигает определенного значения модуля при изгибе (971 МПа при 1,82 МПа изгибающего напряжения). Однако при таком испытании не может быть выявлен характер зависимости модуля жесткости от температуры (испытание дает только одно значение модуля). Поэтому такое испытание применяется исключительно для первоначального отбора материала и не должно быть использовано для окончательного принятия решения [5,7].

К одной из разновидностей испытания деформационной термостойкости под нагрузкой относится измерение температуры размягчения по Вика. В отличие от испытаний на изгиб, испытание по Вика (установка показана на рис. 3.48) состоит в измерении температуры, при которой слабо нагруженный плоский штырь проникает вглубь образца на определенную величину. Цель такого эксперимента состоит в установлении возможности нагретого материала выдерживать нагрузки в течение короткого периода времени при контакте с другими объектами [6, 7]. Это испытание обычно используется для моделирования процесса литья в целях определения минимального значения температуры, при которой отливка может быть извлечена из формы. Велика вероятность того, что толкатели будут деформировать изделие, если оно будет извлекаться при температурах выше температуры по Вика. Оба результата тестов по Вика и определение температуры прогиба под нагрузкой могут быть использованы в качестве приблизительной оценки способности термопласта противостоять деформациям и короблению при повышенных температурах.

3.7.3. Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР)

Как и большинство других материалов, пластмассы расширяются при нагревании и сжимаются при охлаждении, то есть имеют положительный КЛТР. По сравнению со многими другими материалами, полимерные материалы имеют относительно высокие значения КЛТР, но эти значения сильно различаются. Изменения объема, связанные с заданными изменениями температуры (или давления) характеризуют кривые на PVT-диаграмме, аналогичные кривым, приведенным на рис. 2.60 *a, б*. Тем не менее при конструировании изделия именно КЛТР используется наиболее часто. Значения КЛТР чаще всего измеряются напрямую (а не вычисляются из PVT-диаграмм), так как отливки могут не обладать изотропными свойствами. Величина КЛТР определяется как отношение изменения линейного размера к начальной величине этого размера при изменении температуры на один градус. Величины КЛТР имеют размерность в $1/^{\circ}\text{C}$, или $\text{см}/\text{см}^{\circ}\text{C}$. Последние единицы измерения более предпочтительны, так как они указывают на то, что рассматривается именно коэффициент линейного, а не объемного теплового расширения. Величина КЛТР для отливок может изменяться существенно в направлении вдоль и поперек потока, особенно у полимерных материалов, армированных волокнами. Ориентированные волокна ограничивают изменения размеров в направлении вдоль потока (стекловолокно, например, обладает очень низким КЛТР). В направлении поперек потока КЛТР может возрасти из-за изменения истинного объема. КЛТР меняются с изменением температуры и могут считаться постоянными в очень малом температурном диапазоне. Значительные изменения

(возрастание) величины КЛТР наблюдаются, при температурах близких к температурным переходам (T_g или T_m). Это особенно важно для кристаллизующихся полимеров, часто используемых при температурах, близких к температуре стеклования.

Типичные значения КЛТР для различных полимерных материалов приведены в табл. 3.2 [6, 7]. При конструировании изделий, которые в дальнейшем будут собираться из нескольких деталей, желательно использовать материалы, имеющие близкие по величине значения КЛТР.

Большие трудности возникают при конструировании изделий, состоящих как из полимерных, так и из металлических деталей, поскольку КЛТР пластмасс, как правило, значительно выше, чем у металлов. Конструкции изделий, содержащих пластмассовые и металлические детали, должны иметь отверстия или прорези с зазорами, чтобы компенсировать изменение размеров в диапазоне температур эксплуатации.

Таблица 3.2. Типичные значения КЛТР [7]

Стандартные материалы	КЛТР, 10^{-5} см/см/°C	Стандартные материалы	КЛТР, 10^{-5} см/см/°C
Длинноцепной полимер*	0,6	АБС*	3,1
Стекло	0,3–0,7	ПП*	3,2
Сталь	1,1	Сульфид полифенила	3,6
Бетон	1,4	Ацеталь*	4,0
Медь	1,6	ЭС	5,4
Бронза	1,8	Полиэфирамид	5,6
Латунь	1,8	ПК	6,5
Алюминий	2,2	Акрил	6,8
Полиэфирамид*	1,5–3,2	АБС	7,2
ПА*	2,3	ПА	8,1
Термопластичный полиэфир*	2,5–7,5**	Ацеталь	8,5
		ПП	8,6
Магний	2,5	Термопластичный полиэфир	12,4
ПК*	2,0–4,0		
Цинк	3,1	ПЭ	13–17

* Типичные марки армированные стекловолокном.

** Наивысшее значение КЛТР в направлении поперек потока.

3.7.4. Старение при повышенных температурах

Под воздействием высоких температур в течение продолжительного периода времени во многих случаях пластмассы становятся хрупкими или теряют окраску. Изменения свойств материала может произойти из-за удаления добавок, например, пластификатора или химических изменений, таких как окисление. Термическая стабильность полимера оценивается с помощью помещения ряда отлитых образцов в печи с заданной температурой (обычно это производится при повышенной температуре для ускорения тестирования) в течение длительного периода времени. Образцы

периодически извлекаются из печи для оценки их свойств. Извлеченные из печи образцы изучают визуально и оценивают их физические, механические, электрические, оптические, химические и др. свойства. Результаты испытаний затем представляют в виде графиков, указывающих изменение свойств во времени при указанной температуре старения. Такой тип испытаний позволяет оценить термическую стабильность в конкретных условиях, связанных с условиями испытания.

3.7.5. Горючесть

Горючестью называют параметр, характеризующий поведение материала в условиях возгорания. Горючесть материала важно учитывать не только в изделиях, связанных с электрооборудованием, но также в тех случаях, когда изделия из пластмассы используются в замкнутом пространстве, например, в жилой комнате, где могут находиться как источники открытого пламени, так и обогрева. Некоторые из наиболее признанных методов испытания измеряют воспламеняемость, дымообразование и температуру возгорания [6]. Многие производители материалов предлагают устойчивые к воспламенению марки материалов, которые либо сами по себе обладают устойчивостью к горению, либо подобное свойство обеспечивается введением в материал соответствующих добавок. Но даже устойчивые к воспламенению марки материалов могут быстро гореть при соответствующих условиях связанных с доступом кислорода [5].

Испытание *UL 94* обычно используется для классификации или присвоения рейтинга материала с точки зрения его способности к воспламенению. В зависимости от результатов тестирования материалам могут быть присвоены следующие классы воспламеняемости *V-0*, *V-1*, *V-2,5V* или *HB*. Основу системы классификации формирует способность образцов поддерживать горение после прекращения воздействия открытого пламени. Материалам, которые быстро гаснут и не разбрызгивают горящих частиц, присваивается более высокий рейтинг. Рейтинг присваивается в зависимости от толщины материала (1,6 или 3,2 мм), что может помочь конструкторам в подборе толщины стенок изделий [6]. Однако при конструировании необходимо учитывать, что горючесть зависит не только от толщины, но и от геометрии изделия. Рейтинг «*V-0*» означает самую огнестойкую марку, а рейтинг «*//B*» — наименее огнестойкую. Рейтинг, полученный на основе второго теста, добавляется к первому, если материал проходит первый тест успешно. Комбинация *V-0* и *5 V* определяет наивысший рейтинг *UL 94*, а *HB* является самым низким [5]. Поскольку шкала рейтинга воспламеняемости *UL* весьма мала, результаты подобных тестов не всегда точно отражают свойства изделий в реальных условиях возгорания [5].

К другим тестам на воспламеняемость относятся:

1. Тест на определение ограниченного кислородного индекса, который определяется как минимальное количество кислорода, выраженное в процентах от объема смеси кислорода и азота, поддерживающей горение материала при комнатной температуре.
2. Тест на задымление, по которому определяют плотность дыма, возникающего в процессе горения [5].

3.8. Свойства текучести расплава

Свойства текучести расплава зависят от температуры, давления и скорости сдвига, а также от молекулярной массы, молекулярно-массового распределения, структурных свойств и наличия добавок. К наиболее распространенным тестам для измерения объемных свойств текучести расплава полимера, измерение показателя текучести расплава (или индекс расплава в случае ПЭ). Он имеет большое практическое значение, поскольку большинство марок материалов выбираются в соответствии с их показателем текучести расплава (ПТР). Результаты испытания текучести расплава дают только приблизительную оценку средней молекулярной массы полимера (для конкретного семейства материалов), которая по величине обратно пропорционально ПТР. Высокие значения ПТР означают низкую молекулярную массу, а низкая скорость — большую [5].

Значение ПТР определяется с помощью экструзионного иластометра. После загрузки пластмассовых гранул и их предварительного нагрева в течение определенного периода времени скорость потока (в единицы граммы/10 мин) измеряется при определенных значениях температуры и нагрузки.

Пластмассы, у которых низкие значения ПТР, являются более устойчивыми к механическим нагрузкам, дольше сохраняют свои свойства при повышенных температурах, чем полимеры с высоким значением ПТР. Однако марки с более высокими

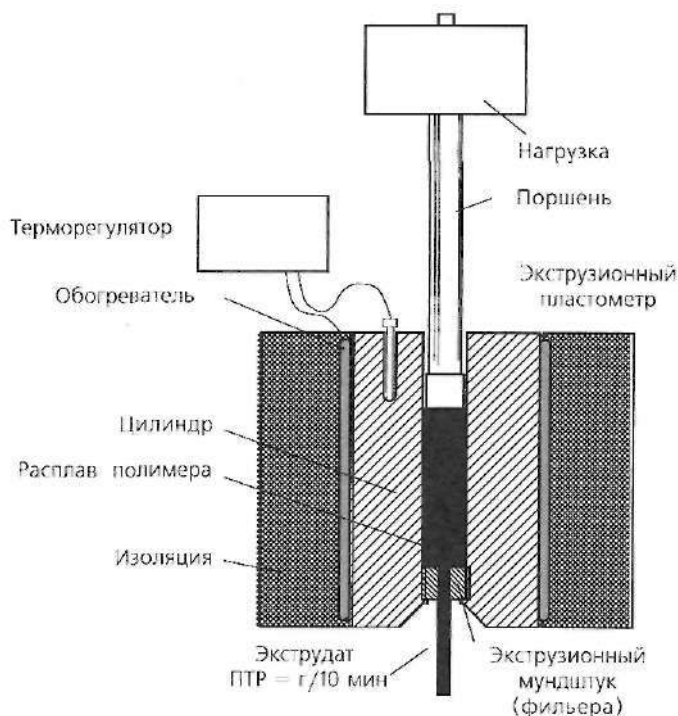


Рис. 3.49. Экструзионный иластометр используется для оценки ПТР полимерного материала

значениями ПТР более технологичны, меньше зависят от способа переработки. Изделия, изготовленные из пластмасс, имеющих более высокие значения ПТР, являются более изотропными из-за более низкой ориентации свойствами, чем те, которые производятся из более вязких марок материалов.

Часто этот фактор усложняет выбор марки материала. Значение ПТР является лишь приблизительным критерием перерабатываемости пластмассы, поскольку при проведении теста текучесть определяется только в одной контрольной точке. Следовательно, этот метод не позволяет полностью описать вязкостные свойства текучести полимерного материала. В действительности, скорости течения расплавов, определенные на основе значений ПТР, по величине на порядок меньше, чем значения, которые наблюдаются при заполнении литейной формы.

Рассмотрим материал со значением ПТР, равным 6,0 г/10 мин. В результате проведенного теста общее количество вещества весом 6,0 г прошло через отверстие, которое имеет геометрическую форму, аналогичную форме впускного литника (например, точечный литник в трехплитной литейной форме). Аналогичный объем материала в процессе литья под давлением пройдет через впускной литник за секунды (а не за минуты). Такое расхождение по времени очень существенно, поскольку большинство расплавов полимерных материалов являются псевдопластическими (наблюдается уменьшение вязкости с увеличением скорости сдвига). Возможно, что две марки полимерных материалов, имеющие одинаковые значения ПТР, будут иметь очень разные вязкости расплавов при скоростях сдвига. Для того чтобы полностью описать сдвиговое поведение течения расплава полимера, тесты должны проводиться при различных скоростях сдвига, температурах и давлениях.

Легче всего и чаще всего скорость сдвига определяется с помощью капиллярного реометра (см. раздел 2.2.2).

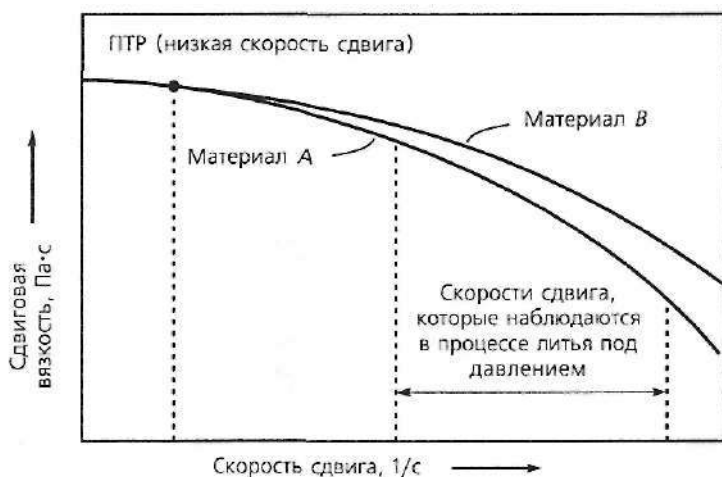


Рис. 3.50. ПТР не может адекватно характеризовать свойства потока полимерного материала, поскольку значение текучести измеряется только в одной контрольной точке и является измерением при низком значении скорости сдвига

3.9. Источники информации о свойствах пластмасс

Выбор пластмассы при конструировании изделия должен быть основан на сравнении свойств, предъявляемых к проектируемому изделию, с комплексом свойств тех пластмасс, которые уже имеются на рынке. Существует более 15 000 промышленных марок пластмасс [16]. Разработчик должен выбрать одну или несколько марок материалов, комплекс свойств которых будет соответствовать эксплуатационным требованиям предполагаемого изделия. Материал, выбранный окончательно, должен максимально соответствовать требованиям по соотношению цена/качество. Бывают случаи, когда нет доступных промышленных материалов, соответствующих эксплуатационным требованиям. В этом случае можно:

- 1) изменить конструкцию изделия в целях снижения эксплуатационных требований;
- 2) снизить эксплуатационные требования или ограничения на стоимость материала;
- 3) поработать с поставщиком материала/составителем смесей в направлении разработки «новой» марки материала.

Очень трудно поддерживать базу данных, содержащую сведения о всех новых марках материалов и их стоимости, так как происходит изменение как марок материалов, так и цены на них. Даже если конструктор будет иметь в своем распоряжении полную базу данных, придется потратить очень много времени на рассортировку информации «вручную» (если только область поиска «материалов-кандидатов» не будет существенно сужена).

На стадии выбора материала конструкторы обычно консультируются с представителями поставщиков. Кроме того, для помощи при выборе материала можно использовать уже существующие базы данных [16-22]. Базы данных могут быть доступны в виде каталогов (буклеты, диски или в режиме он-лайн). Компьютерная база данных очень легко обновляется, что дает значительные преимущества для автоматического поиска в заданных рамках. Базы данных обычно делятся на три главных категории:

- базы данных производителей материалов (фирменные базы данных);
- универсальные базы данных (принадлежащие третьим сторонам);
- базы данных специальных свойств (в которых собраны материалы, обладающие специальными свойствами, например, предельной химической стойкостью, обычно также принадлежат третьим сторонам).

Лучше всего работать с несколькими поставщиками материалов или использовать несколько фирменных баз данных, что позволяет рассмотреть как можно большее число материалов. Поскольку все поставщики материалов представляют данные в различных формах, а процедуры тестирования/методы подготовки образцов не всегда совпадают, то прямое сравнение данных, полученных от разных поставщиков, не всегда возможно. Таблицы свойств материалов часто имеют отметку о том, что свойства перечисленных материалов нельзя считать техническими характеристиками [5].

Универсальные базы данных пластмасс являются альтернативой фирменных баз данных. В них собирается информация от различных поставщиков. Компьютерные базы данных дают возможность поиска подходящего материала среди тысяч возможных вариантов. Такое представление данных также упрощает сравнение и выбор марок материалов, поставляемых разными производителями [17].

Таблица 3.3. Список некоторых баз данных материалов

Компания	Продукт	Материалы	Типы данных	Форматы
<i>ASM International Materials Park, OH</i>	<i>Mat, DB</i>	Более 8000 марок пластмасс, а также другие материалы	Свойства	Компьютерные и опубликованные
<i>BASF Corp. Parsippany, NJ</i>	<i>CAMPUS</i>	Материалы <i>BASF</i>	Свойства, рейтинги, химическая стойкость	Компьютерная база
<i>D.A.T.A. Business Publishing Englewood, CO</i>	<i>D.A.T.A. Plastics Digest</i>	Более 10 000 марок термопластичных, термореактивных и эластомерных материалов	Свойства, рейтинги	Опубликованные
<i>Dow Plastics Midland, MI</i>	<i>591 Ways to Succeed</i>	Материалы <i>Dow Plastics</i>	Свойства, рейтинги, химическая стойкость	Компьютерные и опубликованные
<i>GE Plastics Pittsfield, MA</i>	<i>Engineering Design Data- base (EDD)</i>	Стеклопластики и пенопласты	Свойства, рейтинги, конструкторские данные	В режиме он-лайн
<i>Hoechst Celanese Corp. Chatham, NJ</i>	<i>Fast Focus</i>	Материалы <i>Hoechst</i> и эквиваленты	Свойства, рейтинги, химическая стойкость	Компьютерные
<i>IDES, Inc. Laramie, WY</i>	<i>Prospector</i>	Более 10 000 марок термопластичных, термореактивных, пленочных и эластомерных материалов	Свойства, рейтинги, конструкторские данные, химическая стойкость	Компьютерные и в формате Макинтош
<i>Information Indexing Inc. Garden Grove, CA</i>	<i>CenBase Materials</i>	Более 10 000 марок пластмасс	Свойства, конструкторские данные и химическая стойкость	Компьютерные и опубликованные
<i>LNP Engineering Plastics Exton, PA</i>	<i>EPOS</i>	Материал компании <i>LNP</i>	Свойства, рейтинги, конструкторские данные, химическая стойкость	Компьютерные
<i>McGraw Hill Inc/ Polydata New York, NY</i>	<i>DataPlas</i>	7000 промышленных термопластов	Свойства, рейтинги, химическая стойкость	Компьютерные
<i>Miles Pittsburgh, PA</i>	<i>CAMPUS</i>	Материалы компании <i>Miles</i>	Свойства, рейтинги, химическая стойкость	Компьютерные
<i>Plaspec Yardley, PA</i>	<i>Plaspec</i>	Более 10 000 марок термопластичных, термореактивных и эластомерных материалов	Свойства, рейтинги, химическая стойкость	В режиме он-лайн

Окончание табл. 3.3

Компания	Продукт	Материалы	Типы данных	Форматы
<i>Plastics Design Library</i> <i>New York, NY</i>	<i>Chemical Compatibility and ESCR</i>	Более 60 групп пластмасс	Химическая стойкость	Опубликованные
<i>Prime Alliance</i> <i>Des Moines, Iowa</i>	<i>Prime Alliance Database</i>	Более 700; <i>BASF, Miles, Mobil, Monsanto, Rexene</i>	Свойства, рейтинги	Компьютерные
<i>Rapra Technology Ltd.</i> <i>Shropshire, England</i>	<i>Plascams</i>	Содержит базовые материалы	Свойства	Компьютерные и опубликованные

Процедуры тестирования в настоящее время стандартизированы, но нужно учитывать, что образцы, полученные компрессионным формованием, будут давать результаты, отличные от образцов, полученных литьем под давлением. Такие переменные параметры процесса переработки пластмасс, как температура расплава, длительность цикла, содержание влаги, температура оснастки, скорость впрыска и аналогичные им, могут оказывать значительное влияние на свойства отлитых образцов.

Толщина, тип контрольных образцов, расположение впускных литников и конфигурация литниковой системы играют не менее важную роль.

Базы данных поставщиков обычно содержат список, состоящий из 30–40 различных свойств материалов (большинство из них основаны на стандартных методах *ASTM* или *ISO*) и описаний марок (основные добавки, сертификаты контролирующих органов, характеристики процесса переработки и т. п.). Тем не менее такие базы содержат разные наборы свойств для разных материалов. Например, существует более 30 различных методов получения данных об ударной прочности полимерного материала [18]. Совокупность данных иногда основана на несовместимых методах контроля, и в результате получаются свойства, которые нельзя сравнивать напрямую. В некоторых случаях совокупность данных для конкретного материала бывает неполной.

Зачастую базы данных содержат обширные списки свойств, но большинство из них являются кратковременными или представляют результаты измерений, полученных в одной контрольной точке (обычно это измерения при комнатной температуре и 50 % относительной влажности). Как правило, в базах данных приводятся значения начального модуля упругости, предела текучести при растяжении или предела прочности, ударная вязкость по Изоду, твердость по Роквеллу, температуры начала термической деформации или термостойкость при изгибе и т. п. Некоторые фирменные базы данных предлагают информацию о функциональных свойствах, но проблемы, связанные со способом получения данных и соответствие их формата стандартам, все еще остаются окончательно не решенными. Признавая этот факт, европейские производители материалов работают вместе над разработкой стандартного набора базовых свойств и форматов представления данных. Подобный стандартный набор был представлен в 1988 году под названием «Предварительный выбор материалов с помощью компьютерных систем в соответствии с унифицированными стандартами» (*CAMPUS*) [16, 18, 20]. Формат баз данных *CAMPUS* представляет собой унифицированную систему тестирования и представления баз данных. Здесь используются

более строгие методы, предложенные *ISO*. Существует некоторый разброс в способах получения образцов для тестирования, но наборы данных, соответствующие требованиям *CAMPUS*, стандартизированы.

Исходная версия компьютерной базы данных *CAMPUS* {version 1} была создана на основе 30 стандартных измерений в одной точке и давала возможность конструктору автоматически выбирать материалы с требуемыми механическими, тепловыми и электрическими свойствами. Этой версией данных можно пользоваться только для начального отбора материалов, поскольку в ней содержатся лишь самые необходимые их функциональные характеристики.

Следующая версия программного обеспечения, *CAMPUS* {version 2}, уже включала в себя:

- 1) данные измерений в одной контрольной точке для начального отбора;
- 2) характеристики механических свойств, зависящих от времени/температуры;
- 3) реологические данные;
- 4) данные компьютерного анализа по заполнению литевой формы, которые можно использовать как для подбора технологического процесса, так и конструкции изделия.

Развитие базы данных *CAMPUS* представляет собой первый шаг на пути распространения международных стандартов среди поставщиков материалов. Базы данных предоставляют полный список всех свойств материалов, и создают прочную основу для выбора материала или его отсева.

К функциональным данным, которые приведены в базе данных *CAMPUS* {version 2}, относятся:

- Изотермические зависимости растягивающего напряжения от деформации в широком диапазоне температур для оценки кратковременного механического поведения (до предела текучести).
- Зависимости секущего модуля от деформаций растяжения, полученные из изотермических зависимостей напряжения от деформации.
- Изохронные зависимости растягивающего напряжения от деформации, как правило, для 6-ти значений температур (обычно при 23,60 и 100 °C) для оценки долгосрочных механических эксплуатационных характеристик.
- Зависимости модуля ползучести при растяжении от времени, полученные из изохронных зависимостей напряжения от деформации.
- Зависимость модуля сдвига от температуры в очень широком диапазоне температур для оценки жесткости материала в зависимости от температуры.
- Зависимость сдвиговой вязкости от скорости сдвига в широком диапазоне температур переработки как характеристика реологических свойств полимера (с различными вариантами аппроксимации кривых).

После выбора материала необходимы дополнительные более подробные конструкторские данные, которые могут быть получены от производителей материалов. Предполагается, что в дальнейшем версии базы данных *CAMPUS* будут включать данные о химической стойкости, стойкости к воздействию ультрафиолетового излучения и погодных условий, тепловом старении, а также PVT-диаграммы различных пластмасс [16,20].

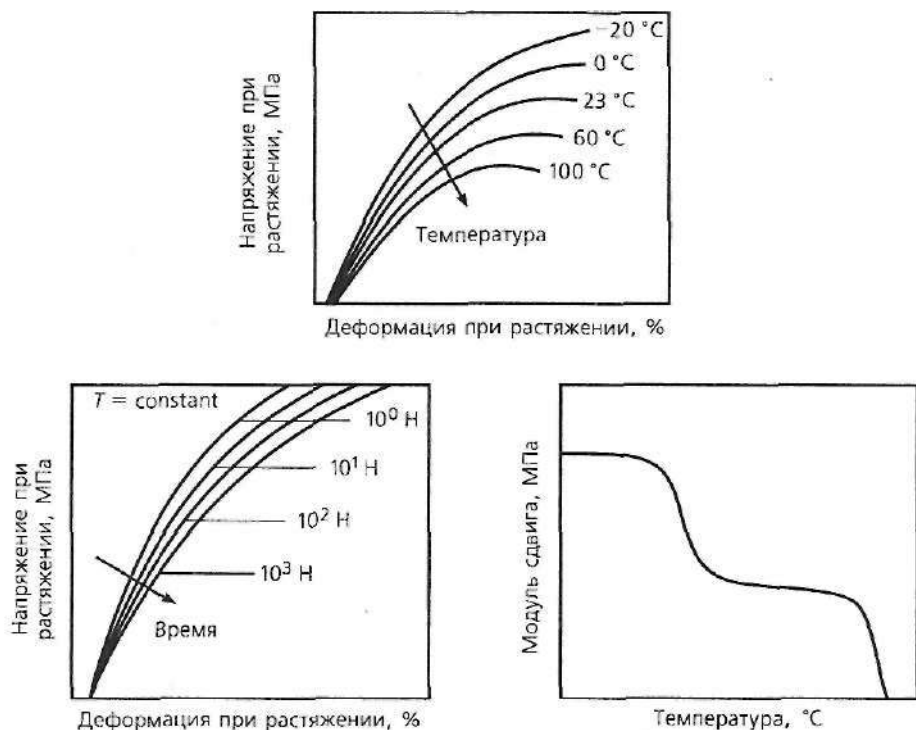


Рис. 3.51. Некоторые данные, предоставляемые в базе данных CAMPUS (version 2)

3.10. Оценка материалов с использованием готовых отлитых образцов

Чаще всего варианты материалов для данного конкретного изделия подбираются путем оценки свойств. После того как область поиска материалов сужена, желательно согласовывать с поставщиками материала возможность провести испытания прототипа. Это очень важно при выборе нового незнакомого материала. Один из производителей [23] разработал универсальный прототип (*Evaiuator®*), представляющий собой устройство из двух отлитых деталей, которое можно использовать для оценки свойств применяемых чистых и армированных промышленных термопластов.

Evaiuator® может помочь конструктору изделий из пластмассы в разных аспектах работы. Он позволяет органолептически оценить твердость, прочность и внешний вид различных термопластов. Изделия могут иметь различную толщину стенок и отливаться с различным расположением мест впуска. Наличие двух частей дает возможность использовать в *Evaiuator®* бобышки для винтов, выступающие головки и защелки, что позволяет собрать/соединить изделие шестью различными способами. Уникальный образец дает обширную информацию за относительно небольшую цену.

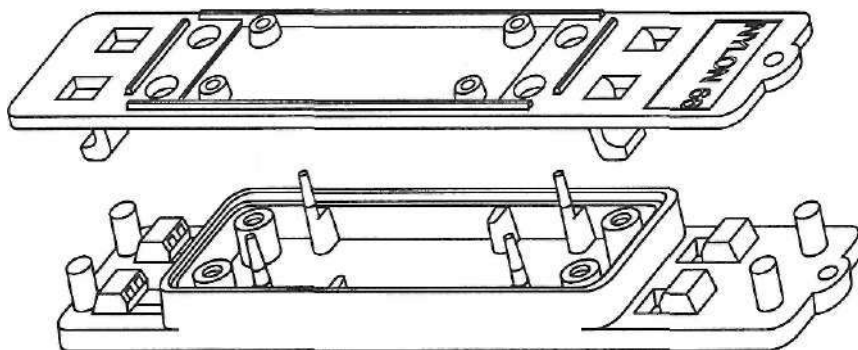


Рис. 3.52. *Evaluator*® является универсальным прототипом, который можно использовать для оценки как свойств эластомера, так и свойств изделий из него

Evaluator® считается универсальным прототипом, который можно использовать для сравнения свойств полимера, сборочных единиц и расположения впускных литников.

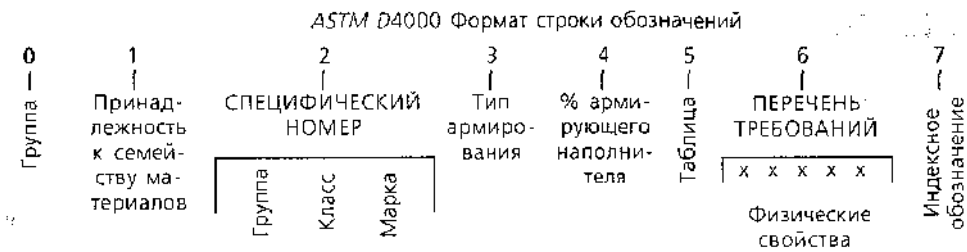
3.11. Стандартные обозначения пластмасс

Поставщики материалов определяют материалы следующим образом:

- Торговая марка: описывает принадлежность материала определенному типу.
- Марка: конкретная структура, молекулярная масса, молекулярно-массовое распределение и набор добавок.
- Партия: для каждой конкретной партии продукции (обычно эта информация не предназначена для конструктора).

Обозначения торговой марки и марки материала не дают информации о химическом составе материала, добавках или физических свойствах (обычно в виде кодового обозначения включается лишь ПТР). Торговые марки у одних поставщиков не имеют сходства с обозначениями других поставщиков, так как среди производителей материалов не существует единых стандартов.

Существует стандарт *ASTM D4000* («*Standart Classification System for Specifying Plastic Materials*»), в котором предпринята попытка классифицировать самые разные пластмассы — без наполнителей, с наполнителями и армированные [24]. Система классификации и строка символов (технические условия на материалы) предназначена для предоставления универсального средства идентификации полимерных материалов, используемых для изготовления изделий, аналогично тому, как обозначается сталь (например, сталь 1030 означает общее обозначение марки стали, которую можно приобрести у большого количества производителей). Система классификации основана на предположении, что пластмассы могут быть разделены на широкие группы по типу их химического строения и основным свойствам.



- 0 - Одна цифра, свидетельствующая о принадлежности к более широкой группе, используется при необходимости.
- 1 - Две или более букв для идентификации семейства материалов на основе сокращений, приведенных в D 1600.
- 2 — Три цифры обозначают определенную химическую группу, модификацию или класс, а также марку вязкости или степень модификации. Таблица базовых свойств, которая содержит информацию о свойствах материала.
- 3 - Одна цифра, обозначающая способ армирования.
- 4 - Две цифры, обозначающие процент армирования.
- 5 — Одна цифра, которая обозначает таблицу со списком физических характеристик и методов тестирования.
- 6 — Пять цифр, обозначающие определенный физический параметр, который содержится в таблице свойств.
- 7 — Индексные обозначения специальных требований, основанные на применении материала и указывающие на специальные тесты.

Рис. 353. Строка обозначений по стандарту ASTM ZM000

Эта система классификации идентифицирует пластмассы за счет использования стандартных обозначений. Такое описание материала упрощает конструктору выбор альтернативных материалов. Система классификации основана на принадлежности к обширной группе материалов, подгруппам внутри этой обширной группы, наличии наполнителей/армирующих добавок и физических свойствах.

Пример материала с армирующими добавками, классифицированного в соответствии с данным стандартом:

Материал: ZM000 PA 120C33Л 53380

Технические характеристики:

- PA 1 20 — ПА 66 термостабилизированный по техническим условиям D 4066
- G33 — армированный стеклом на 33 %, номинальный
- A — Таблица Л (D4066) требований к свойствам
- 5 — предел прочности на разрыв, 175 МПа минимум
- 3 — модуль изгиба, 7500 МПа минимум
- 3 — ударная прочность по Изоду, 75 Дж/м минимум
- 8 — Деформационная термостойкость, 235°С минимум
- 0 — Не указан

Эта система классификации не является безупречной, но она предоставляет наиболее стандартный формат идентификации разных материалов. В настоящее время он широко не используется, но весьма вероятно, что система обозначений такого типа будет со временем популярной, а базы данных материалов и тестирование образцов станут более стандартизированными процедурами.

3.12. Литература

1. Nagarsheth, P., SPE Annual Technical Conference, 35, 220 (1989).
2. Woodruff, D., Business Week, April 30, 110 (1990).
3. Kelley, D., Plastic Design Forum, 12, (1), 80, (1987).
4. Technical Bulletin, «Material Properties Needed for Engineering Design», The Dow Chemical, Midland, MI.
5. Technical Bulletin, «Basic Design Manual, Polycarbonate», The Dow Chemical, Midland, MI.
6. Technical Bulletin, «Engineering Materials Design Guide», General Electric Plastics, Pittsfield, MA.
7. Technical Bulletin, «Designing with Plastics», Hoechst Celanese, Chatham, NJ (1989).
8. Rietveld, J., «Viscoelasticity», Engineered Materials Handbook, Vol. 2, Engineering Plastics, ASM, 412, (1988).
9. Throne, J., and Progelhof, R., «Creep and Stress Relaxation», Engineered Materials Handbook, Vol. 2, Engineering Plastics, ASM, 658, (1988).
10. Newby, G. and theberge, J., Machine Design, March 8 (1984).
11. So, Pa, «Fractography», Engineered Materials Handbook, Volume 2, Engineering Plastics, American Society of Metals, 805, (1988).
12. Technical Bulletin, «Polycarbonate Design Manual», Miles Corporation, Pittsburg, PA.
13. Rucinski, P., «An Evaluation of Molded-in and Machined-in Notches for Izod Impact Testing», MS Thesis, Department of Plastics Engineering, University of Massachusetts Lowell (1993).
14. Deanin, R., «Polymer Structure, Properties and Applications», Cahnners, Boston, MA (1972).
15. Aklonis, J., MacKnight, W. and Shen, M., «Introduction to Polymer Viscoelasticity», Wiley Interscience, NY (1972).
16. LeVerae, L., Plastic Design Forum, 18, (1), 36, (1993).
17. Dieckmann, D., Plastics Engineering, 45, (11), 29, (1989).
18. Mehta, K. and Oberbach, Society of Plastics Engineers RETEC, Rochester, 51, (1991).
19. Klein, A., Plastics Design Forum, 14, (2), 39, (1989).
20. Kennedy, J., Bornschlegl, E. and Tullman, R., SPE Annual Technical Conference, 36, 1736, (1990).
21. Friedman, M., Plastics Design Forum, 11, (4), 61, (1986).
22. MacDermott, C., «Selecting Thermoplastics for Engineering Applications», Marcel Dekker, Inc., NY (1984).
23. Technical Bulletin, The Evaluator®, The Corr Company, Windsor, VT 05089.
24. ASTM D4000, «Standard Classification System for Specifying Plastic Materials», Annual Book of ASTM Standards, 8.0, (1990).

4. Структурное проектирование

4.1. Общие положения

Конструкция отлитого изделия из пластмассы зависит от требований, предъявляемых к характеристикам и эксплуатационным свойствам, внешнему виду и технологическим параметрам производства. Эксплуатационные характеристики изделия включают в себя стабильность размеров и способность выдерживать внешние нагрузки и деформацию. Кроме того, следует учитывать деформации и усилия, возникающие в процессе производства и при сборке изделия. Основная цель структурного проектирования — разработка конструкции изделия, способной выдерживать нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации. Все расчеты выполняются с учетом ограничений, накладываемых свойствами материала и технологическими требованиями. Поскольку довольно сложно предсказать, в каких именно условиях изделие будет подвергаться нагрузке, расчеты конструкции, как правило, проводятся для двух вариантов эксплуатации: стандартного и наихудшего. При стандартном варианте эксплуатации для расчетов используются показатели, соответствующие работе в нормальных условиях. При наихудшем варианте рассчитываются характеристики конструкции изделия в наиболее неблагоприятных условиях. В работах по структурному проектированию используется принцип предельных состояний [1].

Следует помнить, что даже при правильном структурном проектировании не возможно полностью избежать проблем при эксплуатации. Если изделие было сконструировано правильно, но отлито с технологическими ошибками, все достоинства безоговорочного структурного проектирования будут перечеркнуты.

4.2. Методология проектирования

Конструктор изделия из пластмассы может решать проблемы структурного проектирования одним или несколькими способами:

- на основе предшествующего опыта (сделать обоснованное предположение или использовать эмпирические правила);

- использовать экспериментальный подход в процессе разработки надежной конструкции с помощью анализа прототипа;
- использовать аналитический подход, применяя уравнения, описывающие соотношения между напряжением и деформацией.

Все эти способы имеют свои преимущества и недостатки, и в большинстве случаев процесс проектирования изделия представляет собой комбинацию элементов каждого из них.

4.2.1. Проектирование с использованием предшествующего опыта

Развитие индустрии пластмасс идет таким быстрым темпом, что стала ощущаться нехватка опытных специалистов. Исторически сложилось так, что проектирование пластмассовых изделий основывалось на накопленных ранее «эмпирических правилах». Подобный опыт, полученный на основе практической работы, незаменим в любой сфере деятельности, но абсолютизировать эмпирический принцип было бы неверно. Использование накопленных эмпирических сведений может быть достаточно успешным при работе со знакомыми материалами и стандартными геометрическими формами. Но когда перед конструктором поставлена задача изготовления изделия, имеющего совершенно новую форму, или возникает необходимость применить незнакомый полимерный материал, предыдущий опыт может быть малопригоден или непригоден совсем.

Изделия, сконструированные с использованием только этого подхода, могут иметь явно ошибочную конструкцию, способствующую преждевременному разрушению изделия в процессе сборки и эксплуатации. Кроме того, с помощью этого метода может получиться функционально пригодное, но сложное по конструкции изделие. Эксплуатационные характеристики такого изделия могут рассматриваться в качестве ориентира для будущих более рационально сконструированных изделий. Сложное по конструкции изделие может успешно эксплуатироваться, но иметь ряд недостатков:

- конструкция изделия неоправданно усложнена;
- используется больше материала;
- слишком толстые стенки, которые могут вызывать технологические сложности при изготовлении;
- завышенная стоимость изделия.

4.2.2. Проектирование с помощью экспериментального подхода

При проектировании изделий необходимая информация может быть получена с помощью прототипирования. Такой подход называется экспериментальным и представляет собой наиболее консервативный способ конструирования изделий. Структурное проектирование, основанное исключительно на анализе прототипа, приведет к получению надежной конструкции, при учете того, что:

- 1) качество прототипа характеризует качество изделия;
- 2) ожидаемые условия эксплуатации могут быть смоделированы и оценены.

Но этот подход достаточно дорог и может занять много времени, особенно при оценке таких долгосрочных эффектов, как ползучесть или устойчивость к воздействию окружающей среды. Проверка изделий на основе прототипов с точки зрения структуры, размеров и условий окружающей среды может быть осуществлена, если прототип изготовлен из того же материала (с содержанием всех примесей) и по той же технологии производства (см. главу 5). Технология прототипирования, необходимая для получения изделий, близких к реальным, требует относительно высоких затрат и занимает недели или даже месяцы. И стоимость, и время изготовления прототипов, связанные с необходимостью выполнения нескольких вариантов (включая модификацию формирующего инструмента), могут оказаться слишком большими, при этом эксплуатационные характеристики прототипов не будут полностью отражать аналогичные характеристики готового изделия. Разработка изделия только на основе экспериментальных данных (прототипов) не всегда обоснована с практической точки зрения и может рассматриваться как примитивная инженерная практика, поскольку многие из базовых конструкций можно предсказать заранее с помощью соответствующего анализа.

Следует заметить, что стадию прототипирования нельзя исключить совсем, поскольку экспериментальную проверку инженерного проекта рекомендуется проводить всегда (или его могут потребовать некоторые сертификационные органы). Стоимость и временные затраты, связанные с прототипированием или разработкой оснастки, могут быть существенно снижены за счет включения структурного инженерного анализа в ранние стадии процесса разработки изделия (см. рис. 3.4).

4.2.3. Проектирование с использованием аналитического подхода

Методы аналитического расчета конструкций дают возможность конструктору рассчитать напряжения или деформации, которые наблюдаются при механических воздействиях на изделие. В результате такого анализа могут быть приняты решения, многие из которых не кажутся очевидными. Инженерный анализ может предоставить только оценку того, каким образом будет вести себя изделие под нагрузкой. Но большое количество допущений относительно свойств материала, симметричности его формы и предельных состояний приводит к упрощению конечной модели. Кроме того, теоретические соотношения получают с помощью математических процедур, которые часто также требуют упрощений [2].

Классические формулы для напряжений и деформаций

Одним из самых простых способов анализа конструкции является использование уравнений, которые были получены на основе предположения об изотропности и однородности материала. Расчет конструкций при одноосных и многоосных напряжениях возможен для полимерных материалов, не обладающих линейной упругостью и изотропностью, при условии использования временных зависимостей напряжений и деформаций. Крейт [3] справедливо утверждает, что традиционными «инженерными

формулами для проектирования изделий из промышленных пластмасс следует пользоваться осторожно». Полученные таким образом результаты расчетов могут быть получены относительно быстро и при минимальных затратах. Полученные расчетные значения напряжения и деформации сравниваются с допустимыми для полимерных материалов, используемых для изготовления конкретного изделия.

Анализ методом конечных элементов

Использование компьютерных программ для проведения линейного и нелинейного структурного анализа повышают точность и скорость расчетов. Компьютеры используются для решения задач структурного проектирования с помощью численных методов или метода конечных элементов. При использовании метода конечных элементов, сложные задачи могут быть разбиты на несколько взаимосвязанных менее сложных задач. Эти методы были разработаны десятки лет назад для металлических конструкций, но сейчас часто используются для анализа механических и тепловых свойств пластмассовых изделий. Линейный метод конечных элементов используется для расчета напряжений и деформаций в тех случаях, когда нагрузки и изменение размеров относительно малы. Метод конечных элементов также применим в случае нелинейной зависимости между напряжением и деформацией, зависимости напряжение-деформация от времени и температуры, анизотропии свойств и наличия гистерезиса. Метод конечных элементов помогает конструктору обратить внимание на зоны потенциально высоких напряжений и дает возможность оптимизировать такие параметры, как радиусы кривизны, толщина стенок или расположение крепежных элементов.

Метод конечных элементов значительно оптимизирует процедуру прототипирования, поскольку с помощью расчетов можно заранее обнаружить «проблемные» области в изделии. Благодаря этому сокращается количество необходимых прототипов при разработке изделия.

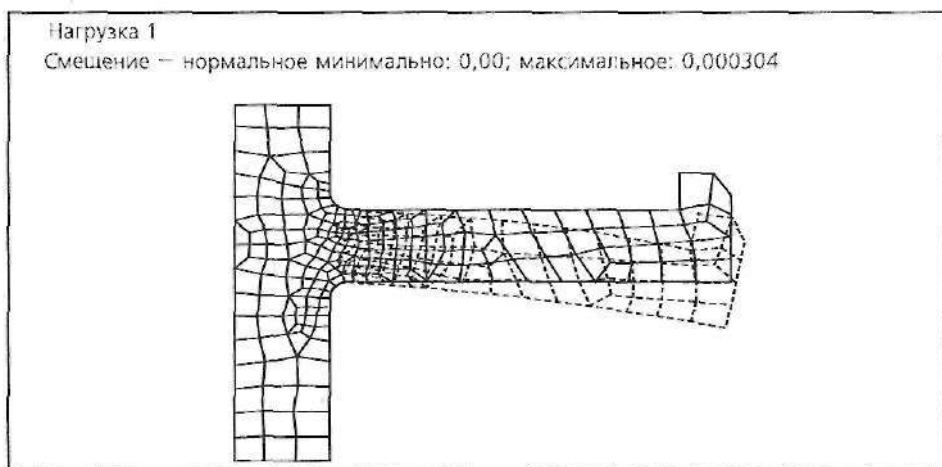


Рис. 4.1. Метод конечных элементов используется для прогнозирования напряжений и прогибов отлитых консольных зашелок (крючков), у которых нагрузки приложены на свободном конце

Как пример рассмотрим структурное проектирование крючка — стандартную задачу проектирования изделия из пластмассы. Отлитые крючки незначительно прогибаются во время сборки (фиксации) изделия — защелкивания колесного колпака (рис. 4.2) во время соединения колпака с жестким металлическим колесным диском. Напряжения и деформации, вызванные сборкой, могут быть оценены с помощью классических формул, использующихся для балок, подвергающихся изгибу. Все рас-

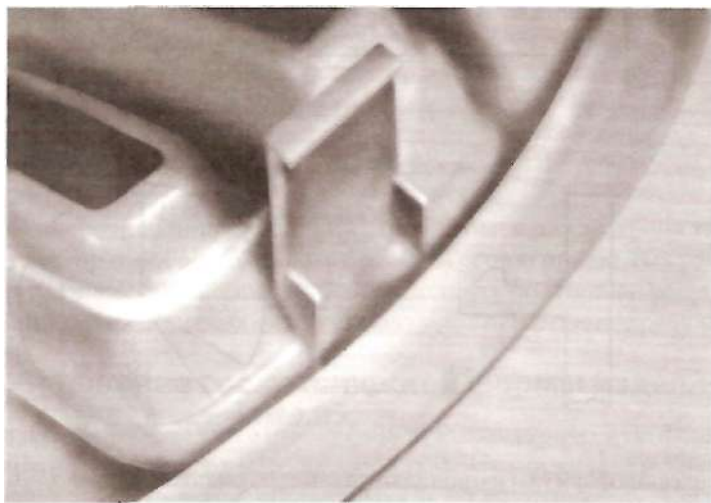


Рис. 4.2. Разъемный крючок колесного колпака

четы производятся исходя из того, что длина крючка существенно больше ее толщины, следовательно, напряжения от изгиба становятся доминирующими. Расчеты с помощью классических формул могут быть достаточно точными для крючков, у которых отношение l/h относительно велико. Но в случаях коротких крючков, у которых отношение l/h мало, результаты вычислений, скорее всего, будут ошибочны. Чем меньше длина крючка по отношению к его толщине, тем выше вероятность погрешности в расчетах (рис. 4.3) [4]. Расчеты, полученные методом конечных элементов показали, что ошибки в результатах, основанных на классической теории изгиба возрастают при уменьшении соотношения l/h , как показано на рис. 4.3 [4].

Метод конечных элементов может быть использован вместо классической теории изгиба для получения более точных расчетов напряжений и деформаций при анализе подобных изделий.

Геометрия детали или изделия из пластмассы моделируется с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР), при этом положение сетки конечных элементов основывается на расчетах параметров более простых элементов, составляющих конструкцию [4-6]. Число элементов или плотность сетки, используемой при анализе, зависит от уровня деформирования конкретной области изделия, а также возможностей компьютера. Плотность сетки может быть увеличена в таких проблемных областях, как углы, где концентрация напряжений высока. Набор граничных

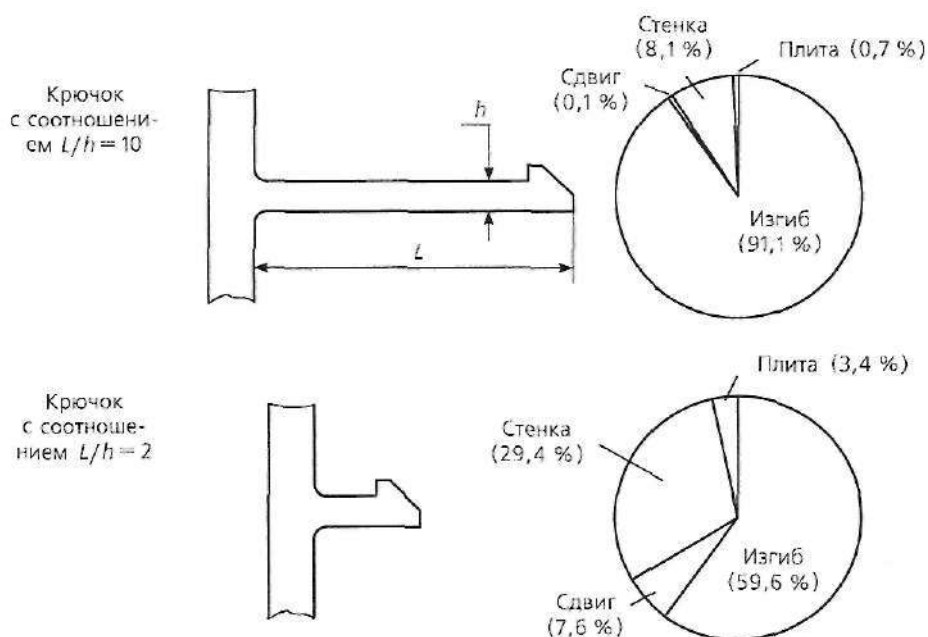


Рис. 4.3. Классические формулы изгиба дают точные результаты в случае длинных и тонких крючков, но не применимы в случае коротких, когда деформации сдвига и отклонения стенок становятся существенными

условии в сетке элементов закладывается в компьютерную модель, после чего создается сложная система, состоящая из сотен уравнений, и затем вычисляются значения напряжений и деформаций. В идеальном случае метод конечных элементов для пластмассовых изделий должен учитывать нелинейность зависимости напряжения от деформации при больших деформациях [5]. Техника структурного проектирования с помощью компьютера позволяет рассчитать параметры изделия со сложными геометрическими формами и высокими условиями нагрузки. Анализ методом конечных элементов особенно важен при расчетах элементов, подвергающихся динамическим воздействиям, поскольку позволяет учесть как процессы теплопередачи, так и зависимость напряжения от деформации.

Вне зависимости от метода анализа, используемого конструктором изделий, точность получаемых результатов (их корреляция с реальными эксплуатационными характеристиками) напрямую связана со способностями конструктора правильно поставить задачу. Конструктор должен располагать огромным массивом информации и упростить его для проведения анализа. Например, начальный отсев материала может быть осуществлен с использованием упрощенной геометрической модели изделия, а более реалистичная (и более сложная) геометрическая форма и компьютерный структурный анализ могут быть использованы для окончательных расчетов. Подробное описание метода конечных элементов выходит за рамки данной главы.

4.3. Задачи количественной оценки при проектировании

Для оценки свойств пластмассовых изделий или деталей конструктор должен сначала четко определить задачи структурного проектирования и сформулировать их в виде, возможном для аналитического решения. Перед расчетом любой сложности конструктору необходимо рассмотреть и оценить ряд факторов:

- геометрическую форму изделия;
- тип опоры или крепления;
- условия приложения нагрузки;
- условия окружающей среды;
- поведение/механические свойства материала;
- условия безопасности.

Каждая из перечисленных позиций должна быть рассмотрена таким образом, чтобы конструктор имел возможность провести серию проектных расчетов, провести результаты, изменить конструкцию, выполнить повторный расчет и повторять такие операции до тех пор, пока не будут получены приемлемые результаты.

4.3.1. Упрощение геометрической формы изделия

Изделия из пластмассы часто имеют сложную геометрическую форму, что является одним из преимуществ этих материалов, а также технологии литья под давлением, но представляет некоторую трудность при расчетах конструкций. Для прогнозирования напряжения, деформаций или прогибов, возникающих в процессе эксплуатации, геометрически сложная форма изделия может быть упрощена.

Классические формулы для расчета напряжений и деформаций большинства пространственных геометрических фигур могут быть взяты из существующих справочников [2]. К таким геометрическим фигурам относятся: прямолинейные, конические или криволинейные балки, колонны, пластины, стойки, плиты и поверхности вращения. Любые геометрические формы пластмассовых изделий можно аппроксимировать с помощью одной или нескольких подобных базовых геометрических фигур. Рассмотрим изделие, которое показано на рис. 4.4. Оно имеет плоскую поверхность с опорами вдоль коротких сторон. В центре расположена полая бобышка, выходящая из плоской части и сконструированная для установки в нее (прессовое соединение) металлической вставки с внутренней резьбой.

Структурный анализ этого изделия включает нескольких отдельных расчетов. Первой задачей является определение напряжений и деформаций в кольце, то есть в поперечном сечении полый бобышки, которая будет подвергаться давлению со стороны металлической вставки большего диаметра, установленной в приемное отверстие. Геометрическая форма полый бобышки может быть рассмотрена как цилиндрическая поверхность, имеющая внутренний и внешний радиусы. Напряжения и деформации (например, напряжения в кольце), связанные с давлением металлической вставки на внутренние поверхности бобышки, описываются с помощью соответствующих формул для цилиндрических поверхностей. Конструктор также должен определить



Рис. 4.4. Изделия более сложной геометрической формы для проведения анализа могут быть разбиты на несколько фигур стандартной формы

усилие, возникающее при выполнении операции прессового соединения. Силы, возникающие при прессовой посадке вставки, приводят к прогибу (и напряжениям) горизонтальной поверхности изделия. Второй задачей является анализ балки или пластины. Силы, возникающие из-за воздействия на бобышку, должны быть учтены при выполнении расчета балки или пластины, испытывающих изгиб.

Это достаточно распространенный подход, когда структурный анализ изделия сложной формы заменяется анализом компонентов изделия, имеющих более стандартную форму. В этом случае определение напряжений и деформаций в каждом из этих компонентов проводится отдельно. Результаты расчетов независимых частей должны рассматриваться как приближенные, поскольку в реальности рассматриваемые компоненты не являются полностью независимыми объектами. Предполагается, что геометрическая форма бобышки не оказывает влияния на распределение жесткости или напряжения в балке, а сама балка не оказывает влияния на свойства полый бобышки. Больших погрешностей в расчетах с использованием подобных упрощений не возникает. Отметим, что некоторые изделия сложной геометрической формы не могут быть заменены на стандартные детали без существенных ошибок. В таких случаях рекомендуется использовать метод конечных элементов.

4.3.2. Концентрация напряжений

При анализе геометрии изделия особого внимания требуют области концентрации напряжений. Распределение напряжения в изделиях зависит от таких элементов, как углы и отверстия, а также других разрывов сплошности и неоднородностей геометрической формы. В таких областях изделия возникают локальные напряжения, которые могут быть во много раз выше, чем напряжения в других его частях. Поэтому значения напряжений, которые прогнозируются исходя из предположения, что изделие

имеет простую геометрическую форму, могут содержать значительные ошибки. Волнистые поверхности изделия, показанные на рис. 4.4, являются концентраторами напряжений, где и возникают локальные напряжения, по величине превосходящие значения, ранее прогнозируемые на основе классических формул, связывающих напряжение и деформацию. Максимальные напряжения в таких зонах трудно определить теоретически, поэтому проведение экспериментального анализа с использованием прототипов (или предварительного производства изделий) необходимо.

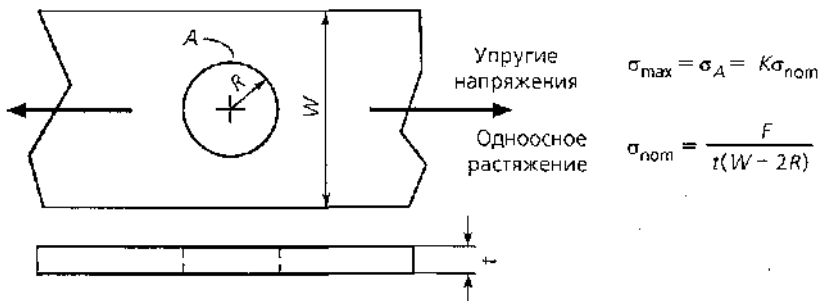
Коэффициент концентрации напряжений (или интенсивность) K определяется как соотношение между истинным максимальным напряжением (пиковое напряжение в области неоднородности) к напряжению, определенному с помощью классических формул (для изделий, имеющих правильную геометрическую форму).

Следует учитывать, что коэффициенты концентрации напряжений для упругих материалов могут быть неприемлемы для более пластичных (или вязкоупругих) материалов [2, 7, 8].

На рис. 4.5 приведено выражение, которое определяет коэффициент концентрации напряжений при одноосном растяжении прямоугольного поперечного сечения, имеющего круглое отверстие в центре. С помощью этого выражения можно оценить локальное напряжение в зоне A , расположенной на окружности отверстия. Например, у изделия, имеющего ширину 0,500 дюйма (12,7 мм) с центральным отверстием диаметром 0,125 дюйма (3,2 мм), коэффициент K будет равен 2,44. Другими словами, напряжение в точке A в 2,44 раза больше, чем номинальное (рассчитанное) значение, определенное путем деления силы растяжения на минимальное сечение изделия. Аналогичные зависимости могут быть составлены для других изделий, в которых имеются области концентрации напряжений [2].

Реальное значение коэффициента концентрации напряжений зависит от геометрической формы изделия, от свойств материала и зависимости напряжения от деформации. Поведение многих полимерных материалов характеризуется нелинейным

**Центральное круглое отверстие в балке
прямоугольного поперечного сечения**



$$K = 3,00 - 3,13(2R/W) + 3,66(2R/W)^2 - 1,53(2R/W)^3$$

Рис. 4.5. Коэффициент концентрации напряжений при растяжении K для изделия прямоугольного сечения с круглым отверстием в центре

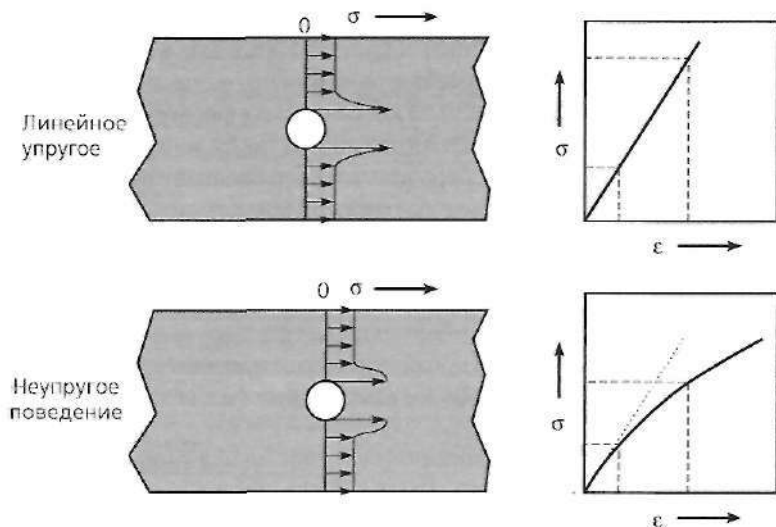


Рис. 4.6. Концентрация напряжений при растяжении на краях отверстия для материалов с линейной и нелинейной зависимостями напряжения от деформации

соотношением между напряжением и деформацией при высоких уровнях деформаций. У таких полимеров увеличение значений локальных напряжений в местах концентрации напряжений меньше, чем при тех же условиях у упругого материала [8]. Коэффициенты концентрации напряжений иногда представляют в графической форме. Коэффициент концентрации напряжений в месте пересечения плоскостей стенок крючка может быть представлен с помощью графика, приведенного на рис. 4.7 [9]. На графике видно, что увеличение радиуса кривизны в месте пересечения плоскостей стенок уменьшает значение коэффициента концентрации напряжений. Графиками такого типа следует пользоваться осторожно, поскольку слишком большой радиус будет приводить к формированию утяжин, пустот и неравномерной усадке из-за локального увеличения толщины стенок в процессе охлаждения изделия [10]. Слишком большие радиусы кривизны могут также повысить уровни напряжения для очень коротких крючков из-за их влияния на неравномерности толщины балки [5].

Установлено, что для компромиссного выбора между равномерным распределением напряжений и сохранения равномерной толщины стенок значения радиуса кривизны должны быть равны или больше на 20-40 %, чем значения толщины стенок.

Аналогия с течением расплава

Зоны концентраций напряжения в изделиях могут быть представлены в виде аналогии с текучей средой. При использовании такого подхода изделие или его часть рассматриваются в качестве сквозного канала, через который проходит идеальная несжимаемая жидкость. Линии течения, которые расположены параллельно друг другу и равномерно распределены в пространстве, формируются под действием напряжений. Области концентрации напряжения выделяются набором таких линий, расстояния

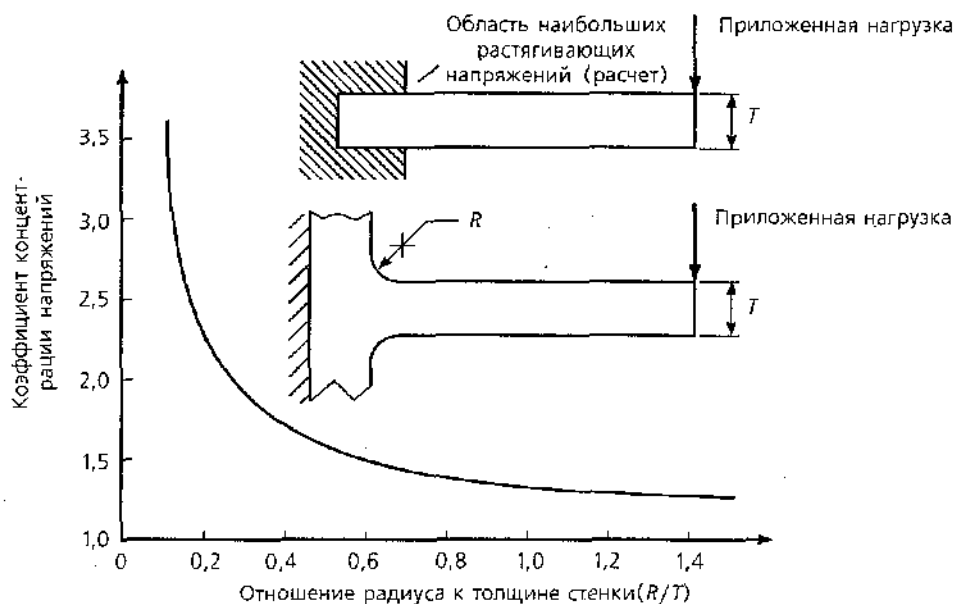


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от отношения радиуса к толщине стенки R/T для крючка

между которыми резко меняются на коротком участке. Близко расположенные линии тока обозначают большую скорость течения и более высокое напряжение. Подобный метод показан на примере стержня с надрезом, к которому приложена растягивающая нагрузка [11]. Стержень с надрезом (рис. 4.8, а) имеет линии, которые расположены близко к друг другу в области надреза, обозначая, таким образом, область высокого напряжения. Кроме того, линии течения сходятся близко на относительно коротком участке, обозначающем переходную зону. Малые размеры переходных зон также характеризуют высокие концентрации напряжений. Увеличение радиуса кривизны надреза (рис. 4.8, б), не приводит к изменению расстояния между линиями, но увеличивает протяженность зоны перехода, что означает уменьшение концентрации напряжений. На нашем примере видно, что удаление материала из определенных зон может привести к изменению прочности изделия. Добавление материала к стороне, противоположной надрезу, приводит как к возрастанию расстояния между линиями течения, так и протяженности переходной зоны, поэтому прочность изделия в этом месте возрастает (рис. 4.8, в). Конструкция может быть подвергнута дальнейшим усовершенствованиям за счет увеличения радиуса кривизны в верхней части надреза, что будет приводить к более равномерному распределению линий течения, а также более равномерному изменению толщины изделия.

Хотя очевидно, что эффекты концентрации напряжений играют важную роль в условиях статической нагрузки, но они еще более существенны в случаях динамических нагрузок. Небольшие неоднородности, надрезы или дефекты будут понижать предел прочности изделия из пластмассы в условиях динамической нагрузки.

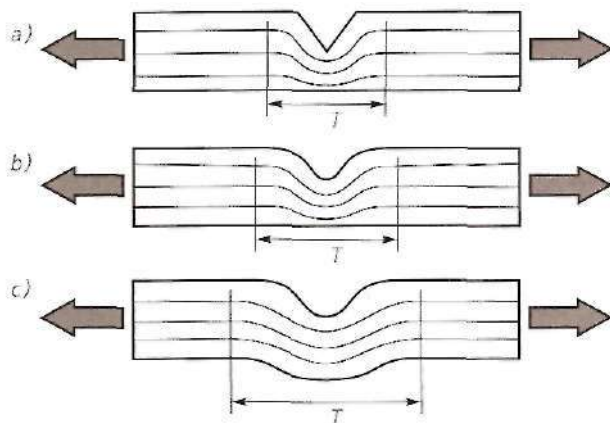


Рис. 4.8. Линии течения могут быть использованы для качественной демонстрации концентрации напряжений. Быстрая сходимость линий и уменьшенное расстояние между ними означают высокую концентрацию напряжений.

Величина концентрации напряжений зависит от геометрической формы, места расположения неоднородностей, величины нагрузки и чувствительности материала к надрезу. Чувствительность к надрезу конкретного материала/изделия нелегко предсказать. Для изделий, которые будут подвергаться динамическим или усталостным нагрузкам, следует изготовить прототип из выбранного для него материала и проверить в условиях ожидаемых механических нагрузок [2].

4.3.3. Тип опоры

Концы или другие точки испытывающего нагрузки изделия должны быть зафиксированы тем или иным способом. Для того чтобы нагруженное изделие оставалось в равновесии ($LF=0$), необходимо, чтобы силами, сохраняющими это равновесие, были силы реакции опоры. Классические формулы для расчета напряжений и изгиба балок, пластин и аналогичных конструкций получены для идеальных опор. В реальных условиях опоры в той или иной степени отличаются от идеальных случаев. Поэтому необходимо сравнить реальную опору изделия с этими идеальными случаями и выбрать формулы, полученные на основе аппроксимации более близкой к реальным условиям. Если особенности изделия таковы, что возможны различные варианты аппроксимации условий закрепления, то рекомендуется проводить несколько вариантов расчетов напряжений и прогибов, включая те, которые описывают наихудшую ситуацию.

Некоторые идеализированные условия закрепления и опоры балок (краев пластин, корпусов) определяются следующим образом [2, 12]:

Направляющие

Условия закрепления концов балки или колонны, которые исключают возможность вращения плоскости торца относительно нейтральной оси, но дают возможность смещаться в продольном и поперечном направлениях.

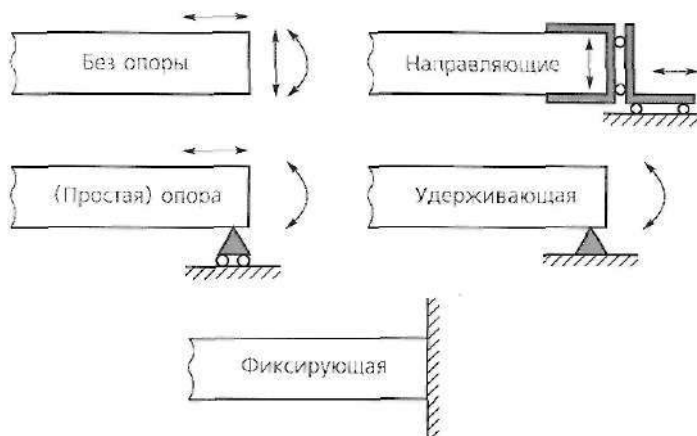


Рис. 4.9. Некоторые идеальные условия опоры торцов или краев для балок или пластин¹

Свободные или без закрепления

Условия, при которых торец балки может свободно двигаться или вращаться в любом направлении как, например, правый конец консольной балки на рис. 4.10, не имеющий опоры.

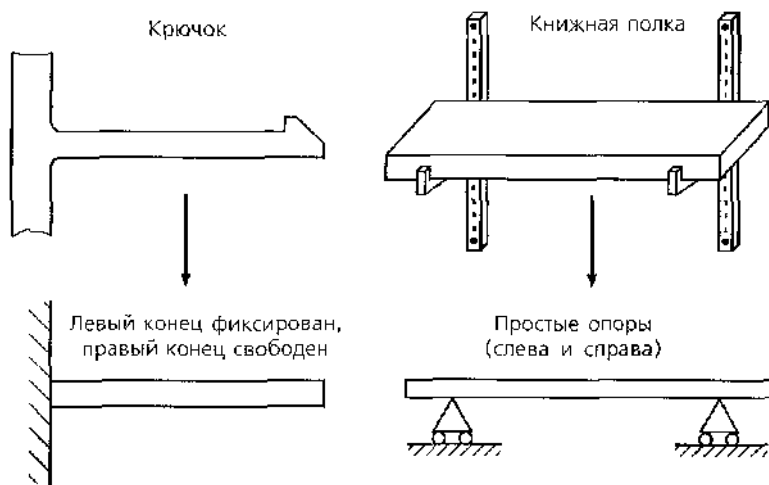


Рис. 4.10. Жестко закрепленный крючок может рассматриваться как консольная балка (левый конец фиксирован — правый конец свободен), а книжная полка — как балка, расположенная на двух простых опорах (на левом и правом концах)

В отечественном литературе принята следующая терминология: простая опора: шарнирно-подвижная; удерживающая — шарнирно-неподвижная; фиксирующая — жесткое защемление (заделка). — *Примеч. науч. ред.*

Удерживающие опоры

Опоры, создающие такие условия закрепления, при которых на конце балки или колонны исключается возможность перемещения в продольном и поперечном направлении краев нейтральной поверхности, но не препятствующих вращению в плоскости изгиба.

Простые опоры

Опоры на концах балки или колонны, исключающие возможность перемещения в поперечном направлении краев нейтральной поверхности, но допускающие вращение и продольное перемещение. Книжная полка, которая показана рис. 4.10, может считаться балкой, расположенной на простых опорах.

Фиксирующие (зажимающие) опоры

Опоры на конце балки или колонны, исключающие возможность вращения и поперечного смещения краев нейтральной поверхности, но допускают продольное смещение. «Влитый» опорный конец крючка, который показан на рис. 4.10, можно считать фиксированной опорой, но при прогибе фиксатора может происходить некоторая деформация стенки, с которой он составляет единое целое (в зависимости от жесткости стенки в этом месте).

4.3.4. Условия приложения нагрузки

Общие положения

После того как определена геометрическая форма и типы опор, должна быть рассчитана нагрузка, действующая на изделие. «Ожидаемые» условия нагружения, воздействие окружающей среды и взаимосвязь нагрузки/времени должны быть определены на ранних стадиях разработки изделия, как показано на рис. 3.2. В некоторых случаях эти значения определяются с помощью прототипов, в других — на основе предыдущего опыта при работе с аналогичными изделиями.

От большинства изделий из пластмассы требуется, чтобы они функционировали и сохраняли работоспособность в различных условиях нагружения. Лучше всего оценивать напряжения и прогибы в каждом конкретном случае ожидаемого нагружения. В целях безопасности должны быть проанализированы эксплуатационные характеристики изделия в нагруженном состоянии, представляющим собой «самый сложный вариант режима нагрузки». Расчет внешних нагрузок, связанных с эксплуатацией изделия, очень важен, но следует также не упустить из рассмотрения нагрузки, возникающие во время сборки, транспортировки, несовпадения коэффициентов теплового расширения или из-за веса самого изделия. Кроме того, для большинства отлитых изделий характерно наличие внутренних напряжений, возникающих в процессе литья. Изделия могут разрушаться в процессе эксплуатации в результате комбинированного воздействия внешних условий, последствий сборки и внутренних напряжений [10]. Хотя уровни внутренних или остаточных напряжений в процессе производства нелегко прогнозировать, их величина может быть минимизирована благодаря правильной конструкции оснастки и использованию накопленного опыта при литье, например, поддержание равномерности толщины стенок [10]. Средства CAD также дают возможность существенно продвинуться в этой области, позволяя минимизировать остаточные напряжения за счет правильного выбора литниковой системы, конструкции

литьевой формы и оптимизации технологического процесса. Однако в большинстве случаев изменения параметров литья (например, температуры формы, скорости впрыска и т. п.) находятся за пределами прямых возможностей конструктора. Конструктор может только дать рекомендации.

Статические или периодические нагрузки

Для того чтобы оценить конструкционные характеристики полимерного изделия, следует рассмотреть места приложения, величины и типы нагрузок. Конструктор должен решить, каким типом идеализированного нагружения можно наиболее точно аппроксимировать реальную ситуацию. Нагрузки можно описать как сосредоточенные в одной точке, распределенные вдоль какого-либо участка или по большой площади (как равномерно, так и неравномерно). Величина и направление нагрузки также должны быть указаны.

В качестве примера, рассмотрим книжную полку на рис. 4.11, которая может быть нагружена книгами по всей ширине или на середину которой может быть установлен

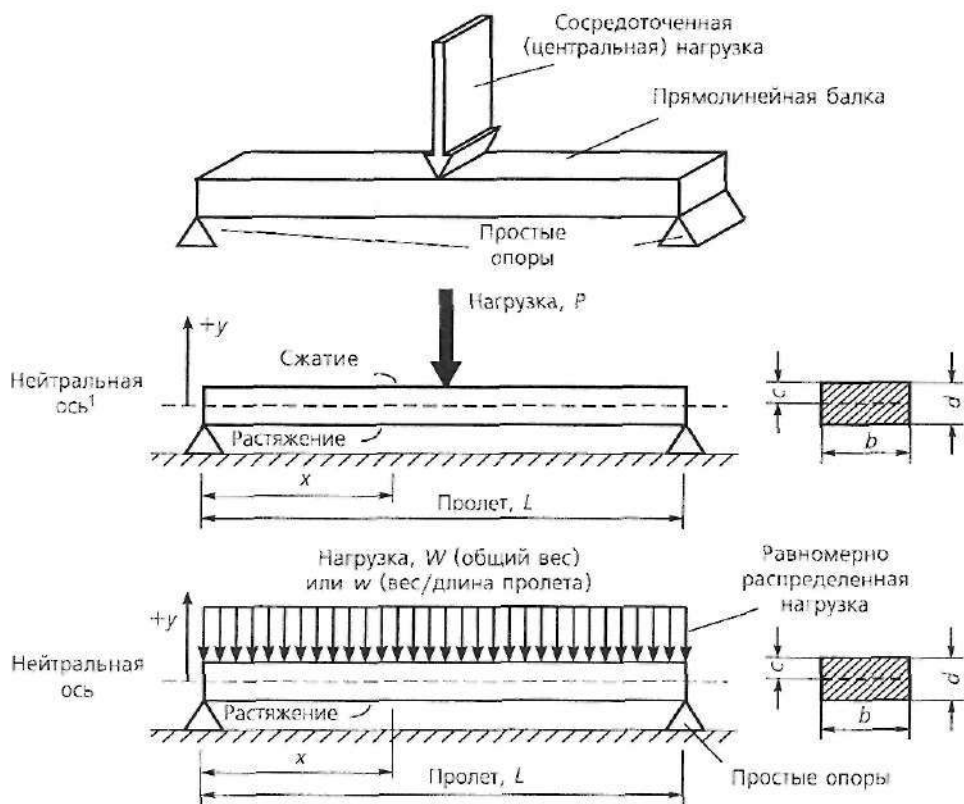
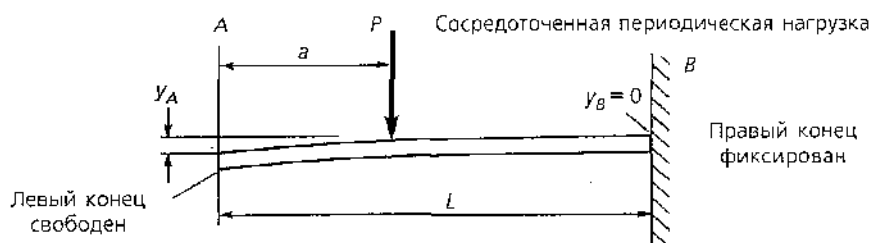


Рис. 4.11. Представление прямоугольных балок с простыми опорами, сосредоточенными и равномерно распределенными типами нагрузок

¹ В этом случае более точно определить штриховую линию вдоль оси балки как проекцию нейтральной поверхности. Нейтральная ось — линия (штриховая) в сечении балки. — *Примеч. науч. ред.*

тяжелый предмет. В последнем случае можно считать, что мы имеем дело с сосредоточенной внешней центральной нагрузкой. Существует вероятность того, что в обоих случаях нагрузка будет приложена в течение длительного периода времени. Величина нагрузок в этом варианте определяется весом объектов, находящихся на полке, и весом самого изделия. Обычно задаются как типичные нагрузки, так и нагрузки, возникающие в случае неблагоприятной ситуации. Таким образом, задача будет включать в себя серию конструктивных расчетов, описывающих поведение полки в различных условиях нагружения. В этом случае при определении значений напряжений и прогибов также следует учитывать наличие собственного веса полки. Таким образом, суммарное напряжение или прогиб определяются как результат суперпозиции (сложения) воздействия внешней нагрузки и веса полки.

Предельное состояние: сосредоточенная периодическая нагрузка, левый конец свободен, правый конец фиксирован (консольный)

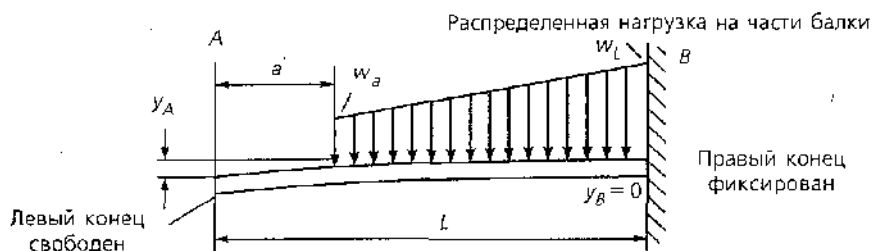


$$R_A = 0; \quad M_A = 0; \quad \Theta_A = (P(L-a)^2)/2 \cdot E \cdot I;$$

$$y_A = (-P/6 \cdot E \cdot I)(2L^3 - 3L \cdot a^2 + a^3);$$

$$R_B = L; \quad MB = -P(L-a); \quad \Theta_B = 0; \quad y_B = 0$$

Предельное состояние: распределенная нагрузка на части балки, левый конец свободен, правый конец фиксирован (консольный)



$$R_A = 0; \quad M_A = 0; \quad \Theta_B = 0; \quad y_B = 0;$$

$$\Theta_A = [(w_a/6 \cdot E \cdot I)(L-a)^3 + ((w_L - w_a)/24 \cdot E \cdot I)(L-a)^3];$$

$$y_A = [((-w_a/24 \cdot E \cdot I)(L-a)^3(3L+a)) - ((w_L - w_a)/120 \cdot E \cdot I)(L-a)^3(4L+a)];$$

$$R_B = [(w_a + w_L)/2](L-a);$$

$$M_B = [((-w_a/2)(L-a)^2) - ((w_L - w_a)/6)(L-a)^2]$$

Рис. 4.12. Консольная балка, на которую действует сосредоточенная периодическая нагрузка (вверху) и распределенная нагрузка па части балки (внизу)

Приложение нескольких статических или периодических нагрузок

В случае, если на изделие действует несколько нагрузок, то суммарное напряжение или прогиб можно получить, используя принцип суперпозиции. Для упругой системы результирующие значения напряжения, деформации или прогиба в любом конечном состоянии будут одинаковым вне зависимости от того, были ли силы, вызывающие нагружение, приложены одновременно или в некоторой последовательности. Результат будет эквивалентен случаю, при котором воздействие всех этих сил можно рассматривать независимо друг от друга. Поэтому можно разделить общую задачу на ряд более простых (то есть рассматривая действие каждой нагрузки по отдельности). Затем, для определения окончательной величины напряжения или прогиба произойдет алгебраическое суммирование вкладов от всех отдельных нагрузок [2].

Здесь следует заметить, что хотя напряжения и прогибы при статических или периодических нагрузках могут быть определены с помощью простой суперпозиции (сложения), аналогичный подход нельзя использовать в случае приложения динамических нагрузок или в тех случаях, когда возникают места концентрации напряжений. Принцип суперпозиции Больцмана может быть использован для прогнозирования напряжений и прогибов у вязкоупругих материалов под действием нескольких статических нагрузок при условии, что

- характеристики ползучести или релаксации напряжений полимерного материала известны (характеристики восстановления также должны быть известны для ситуации, когда прекращается нагружение);
- предыстория нагружения (зависимость нагрузки от времени) также должна быть известна.

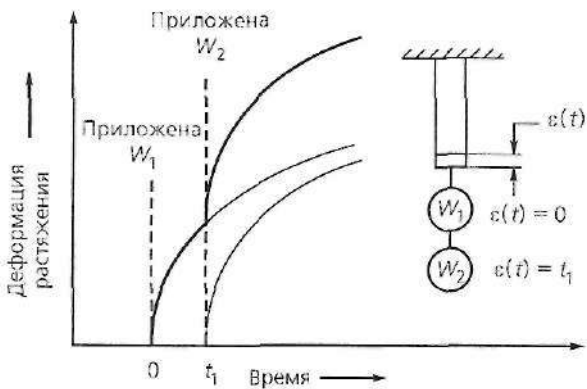


Рис. 4.13. Ползучесть под действием растягивающих сил возникает под действием силы W_1 , приложенной в момент времени t_0 , и W_2 , приложенной в момент времени t_1

Деформация растяжения в любой момент времени под действием начального напряжения, приложенного в момент времени t_0 , будет равна:

$$\epsilon_0(t) = \sigma_0/E(t), \tag{4.1}$$

где $E(t)$ — модуль ползучести, зависящий от времени.

Деформация растяжения из-за дополнительного напряжения, приложенного в момент времени t_1 определяется уравнением:

$$\varepsilon_1(t) = \sigma_1/E(t). \quad (4.2)$$

Суммарная деформация растяжения, $s_j(t)$, после наложения действия напряжений a_0 и a_j будет равна:

$$\varepsilon_T(t) = \sigma_0/E(t) + \sigma_1/E(t_1 - t). \quad (4.3)$$

Принцип Больцмана дает возможность конструктору прогнозировать значения прогиба, процесс восстановления, в случае, если определены характеристики ползучести и восстановления, а также время нагружения и величины нагрузок [13].

4.3.5. Свойства полимерных материалов

Общие положения

Зависимость напряжения от деформации для пластмасс должна быть проанализирована до проведения любого структурного проектирования. Такая характеристика свойств материала, как модуль жесткости, используется в уравнениях для расчета значений напряжений и прогибов нагруженного изделия. К сожалению, механические свойства пластмассы достаточно сложны и их трудно охарактеризовать полностью. В отличие от многих других материалов, пластмассы, как правило, не являются упругими материалами. Упругие свойства могут проявляться только при очень кратковременном нагружении, действующим в течение микро- или миллисекунд [14]. Но в большинстве случаев в процессе эксплуатации изделие находится под нагрузкой в течение длительного периода времени, а поведение пластичного материала описывается в этом случае как вязкоупругое, поскольку проявляются как вязкие, так и упругие свойства. Для правильного определения механических свойств пластмассы необходимо провести достаточное число испытаний. Производители материалов не всегда предоставляют все необходимые данные, поэтому в ряде случаев может потребоваться проведение собственных испытаний. Механические свойства полимера зависят от многих факторов, некоторые из которых приведены в табл. 4.1.

Большое значение при структурном проектировании имеют характеристики материала, полученные в условиях, наиболее точно соответствующих условиям эксплуатации изделия. Степень корреляции будет оказывать существенное воздействие на точность проектных расчетов. Даже признанный метод конечных элементов будет приводить к погрешностям в вычислениях, если не будут учтены такие факторы, как ползучесть, ориентация молекул и расположение линий сая.

Маловероятно, что данные о прочности линии сая, полученные при одном наборе параметров процесса переработки и в одной литевой форме, будут характеризовать качество линии сая в образце, полученном в форме, у которой больше пути течения расплава и иные параметры переработки. Аналогичные проблемы возникают, когда конструктор хочет учесть, например, ориентацию молекул, которая полностью зависит от условий переработки.

Таблица 4.1. Некоторые данные о механических свойствах полимерных материалов

Окружающая среда в условиях эксплуатации	Условия приложения нагрузки	Факторы, связанные с переработкой
Температура	Длительность приложения нагрузки	Кристалличность/ морфология
Относительная влажность	Частота нагрузки	Ориентация молекул
Воздействие химических реагентов	Постоянное напряжение (ползучесть)	Ориентация армирующих элементов
Воздействие ультрафиоле- тового облучения	Постоянная деформация (релаксация напряжений)	Уровень деградации
Окисление	Величина нагрузки	Качество линии спая
Время выдержки в соответ- ствующих условиях	Вид нагружения: сжатие, растяжение сдвига или изгиба	Пустоты/утяжины
		Условия уплотнения
		Уровень внутренних напряжений

Кратковременные свойства

Крючки на отлитом колесном колпаке, которые показаны на рис. 4.2 отклоняются очень быстро и также быстро возвращаются наместо, когда колпак устанавливается на колесо или снимается с него. В этом случае оцениваются силы, вызывающие отклонение крючков (балок). Кроме этого, оцениваются максимальные значения усилий или напряжений и деформации, связанные с принудительным кратковременным прогибом. Напряжения, возникающие при сборке, вычисляются с помощью кратковременных данных о зависимости напряжения от деформации, полученных на универсальной

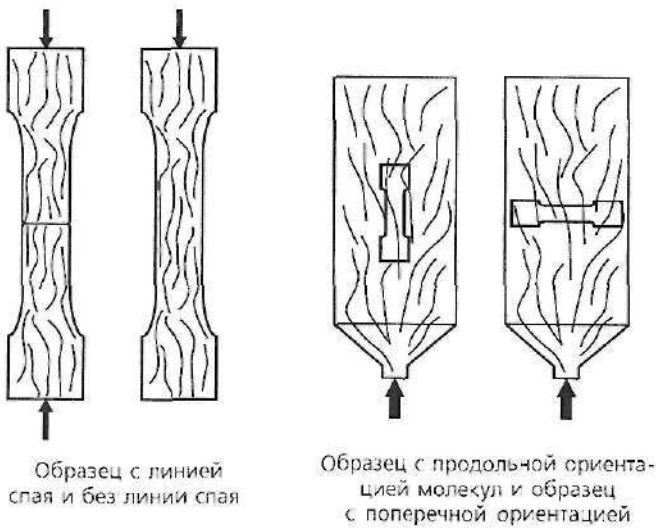


Рис. 4.14. Механические свойства полимерного изделия зависят от таких факторов, как наличие линий спая, ориентации молекул или волокон

испытательной машине (в отличие от долгосрочных данных о ползучести). Напряжения, деформация и прогибы должны быть оценены в экстремальных условиях окружающей среды (то есть при высоких и низких температурах, ожидаемых в условиях эксплуатации). Очень важно, чтобы данные о механических свойствах, используемые в расчетах, были получены при температуре и влажности, которые соответствуют эксплуатационным. Кроме того, скорость деформирования при тестировании должна также быть близкой к скорости деформации (дюйм/дюйм/с, м/м/с или %/с) изделия, поскольку такие свойства, как модуль жесткости и предел текучести при разрушении материала будут меняться в зависимости от скорости деформирования (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Характеристики полимерных материалов, полученные из кривых напряжение-деформация, зависят от скорости деформирования, температуры и относительной влажности

Очень важно также учитывать тип напряжений, связанных с конкретными условиями применения изделий. Крючок (см. рис. 4.1) фактически представляет собой балку, которая «изгибается» в процессе соединения/разъединения. Часть этой консольной защелки подвергают действию сжимающих напряжений, в то время как другая часть подвергается воздействию растягивающих напряжений (напряжения сдвига, зависящие от величины прогиба, также присутствуют). Более сложный анализ учитывает поведение материала как при сжатии, так и при растяжении.

В других случаях для инженерных расчетов могут быть использованы результаты измерения только одного значения модуля. Объемный модуль жесткости полимера зависит как от модуля растяжения, так и от модуля сжатия. Но здесь следует подчеркнуть, что нелинейное поведение большинства полимеров означает, что такие характеристики, как модуль жесткости или предел прочности при разрыве в любом случае не остаются постоянными. Эти свойства материала зависят от факторов, которые приведены в табл. 4.1.

¹ На рисунке показан не начальный модуль, а лишь пунктирная линия, с помощью которой этот модуль определяется. — *Примеч. науч. ред.*

Свойства, зависящие от времени. Ползучесть

Другим примером применения полимерных материалов может служить книжная полка (рис. 4.10), где изделие находится в нагруженном состоянии в течение длительного периода времени. Кривые кратковременной зависимости напряжения от деформации могут помочь сделать прогноз прогиба и напряжений в начальный момент действия нагрузки, но возрастание прогиба может быть рассчитано только в том случае, если известны характеристики процесса ползучести. Процесс ползучести исследуется при длительных временах нагружения. Для исследования ползучести контрольные образцы подвергаются постоянному напряжению при заданных значениях температуры и относительной влажности, а прогибы или удлинения измеряются в течение длительного периода времени. Принцип испытаний ползучести при растяжении отражен на рис. 3.22, на котором приведены результаты исследований изменения деформаций образцов в течение длительного периода времени под действием растягивающих нагрузок различной величины. Данные по ползучести опубликованы для большинства пластических материалов, но временные периоды, связанные с испытаниями на ползучесть варьируются и бывают короче срока службы изделия. Очень важно, чтобы конструктор знал, получены ли существующие данные о ползучести при выполнении полноценного эксперимента или они были перенесены из кратковременных испытаний ползучести. Кроме того, важно, чтобы конструктор учитывал тип напряжения, которому будет подвергаться изделие в процессе эксплуатации.

Ползучесть обычно измеряется в состоянии одноосного растяжения, но данные о ползучести могут быть получены при сжатии, изгибе и сдвиге. Данные о ползучести, используемые конструктором в проектных расчетах, должны быть получены при тех условиях нагружения, которые соответствуют условиям реальной эксплуатации изделия.

Экспериментальные данные процесса ползучести обычно приводятся в виде графиков, указывающих значение удлинений или деформаций как функцию времени и напряжения, аналогичных приведенным на рис. 4.16. На рисунке показана мгновенная упругая деформация, которая наблюдается в начальный момент времени, и далее возрастание деформации во времени (то есть ползучесть при растяжении или запаздывающая деформация). Ползучесть зависит от уровня напряжения: повышение напряжения неизменно усиливает процесс ползучести. Постепенное разрушение пластмассового изделия при относительно низких уровнях напряжения может длиться многие годы. Для экспериментального исследования ползучести пластмассы при незначительных нагрузках требуется много времени. Однако временные ограничения на проведение испытаний, как правило, не позволяют проводить полноценный анализ. В результате время окончательного разрушения пластмассового изделия под действием небольших напряжений рассчитывается с помощью соответствующих формул. Изделия, не прошедшие индивидуальную экспериментальную проверку и сконструированные с учетом усредненных стандартных данных о ползучести, должны иметь большой запас прочности. Можно считать вполне достоверными данные о ползучести, которые экстраполированы не более чем на один логарифмический порядок [14]. Кривые ползучести (экспериментальные данные), показанные на рис. 4.16 [15] могут быть приведены и в виде другого графика — набора изохрон, отражающих зависимости напряжения от деформации (зависимости, полученные пересечением семейства кривых ползучести при постоянном значении времени), как показано на рис. 4.17.

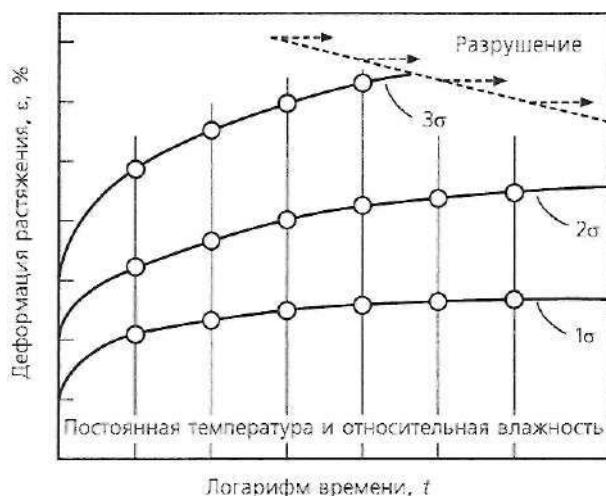


Рис. 4.16. Типичные кривые ползучести (деформация при растяжении как функции логарифма времени при различных уровнях растягивающего напряжения). Эти данные можно привести в виде нескольких изохрон в координатах напряжение-деформация

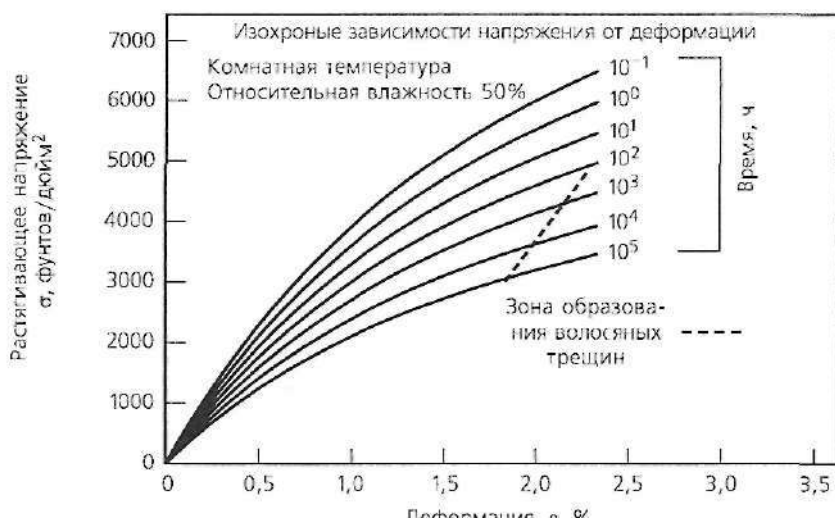


Рис. 4.17. Набор изохрон, отражающих зависимости напряжения от деформации для ПК в стандартных условиях

Приведенные графики могут быть использованы для получения значений кажущегося¹ модуля жесткости полимера при различных временах нагружения и уровнях растягивающих напряжений (для конкретных условий эксплуатации). Все эти параметры

¹ В литературе часто употребляется термин «релаксационный» модуль. — Примеч. науч. ред.

могут оказывать большое влияние на жесткость полимерного материала и его модуль жесткости. Данные о ползучести могут быть перестроены и представлены графически в виде зависимости модуля жесткости от времени (или логарифма времени) как это показано на рис. 4.18. Такой способ отображения процесса ползучести применяется при необходимости экстраполяции этого процесса на более длительные времена. Данные о модуле жесткости, полученные на основе кривых, могут быть использованы для прогнозирования прогиба, возникающего в процессе эксплуатации. В случае проектирования изделия, которое будет работать в условиях минимальных значений прогиба (деформации), конструктор часто использует данные испытаний, соответствующие максимальному времени действия нагрузки (то есть сроку эксплуатации изделия при наличии постоянной нагрузки) и максимальным значениям рабочей температуры/относительной влажности, если он хочет получить изделия, удовлетворяющие самым высоким нормам безопасности.

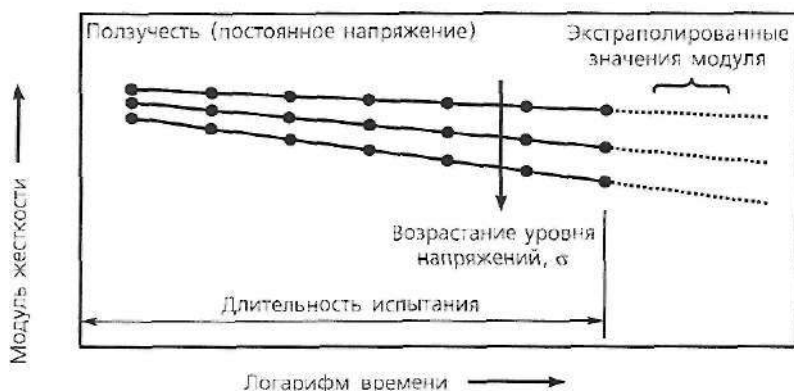


Рис. 4.18. Графическая зависимость модуля жесткости от логарифма времени при различных уровнях напряжения используется для оценки долгосрочных свойств изделия

Свойства, зависящие от времени.

Изменения нагрузки/температуры/относительной влажности

Прогнозирование деформаций изделий, подвергающихся циклическому воздействию нагрузок или температур, обычно намного труднее, чем в случае постоянных нагрузок. Прогнозирование изменений деформаций и напряжений при циклическом воздействии нагрузок или дневных/ночных/сезонных изменениях температуры весьма затруднительно, поскольку: 1) данные о восстановительных свойствах пластмасс не столь доступны (чем данные о ползучести) и 2) прогноз нагрузки/температуры/относительной влажности для больших сроков эксплуатации изделия часто носит приблизительный характер. В таких случаях используется метод суперпозиции, если режим нагрузки/температуры известен для данного приложения, а свойства материала (включая характеристику восстановления) описаны полностью. В противном случае безопасней проводить расчет, считая, что нагрузка действует постоянно при максимальной ожидаемой температуре/относительной влажности (рассмотреть наихудшую ситуацию).

Свойства, зависящие от времени. Волосяные трещины

В некоторых случаях на изохронных зависимостях напряжения от деформации полученных от поставщика материалов указаны границы, выше которых наблюдается образование волосяных трещин. Пунктирная линия на рис. 4.17 показывает взаимосвязь между началом образования трещин, уровнем напряжения и временем. Волосяные трещины сами по себе могут не приводить к разрушению изделия, но им нужно уделять особое внимание, когда предполагается использовать изделие в условиях динамических и усталостных нагрузок, а также химических воздействий. Волосяные трещины представляют собой видимые дефекты. При проектировании изделий следует избегать конструкции, в которых может быть превышена граница, после которой наблюдается образование трещин. На рис. 4.17 приведен набор изохрон, отражающих зависимости напряжения от деформации при температуре 23 °С и относительной влажности 50 %. Из графиков видно, что может потребоваться приблизительно 1000 ч до появления волосяных трещин в изделии, которое подвергается растягивающим напряжениям порядка 4000 фунтов/дюйм² (27,6 МПа), а при напряжении 2800 фунтов/дюйм² (19,3 МПа) время до появления микротрещин составляет порядка 100 000 ч. Эти графики подчеркивают важность тщательной оценки и ограничения проектных значений напряжения. Волосяные трещины могут быть обнаружены лишь с помощью визуального осмотра в процессе проведения испытаний для получения данных о ползучести. Но конструкторы должны учитывать, что подобный дефект может возникнуть в присутствии химических веществ, даже если границы образования волосяных трещин не обозначены на изохронных зависимостях напряжения от деформации.

Свойства, зависящие от времени. Релаксация напряжений

Во время длительной эксплуатации в изделии могут возникнуть определенные по величине прогибы и деформации. Прессовая посадка обоймы подшипника или втулок представляет собой пример такой продолжительной деформации. В таких случаях должны быть известны характеристики процесса релаксации напряжений. Изохронные зависимости напряжения от деформации, аналогичные показанным на рис. 4.17, полученные из семейства кривых ползучести, не точно описывают свойства материала при использовании изделия в условиях релаксации. Более точные данные по релаксации напряжений получают при проведении соответствующих экспериментов. К сожалению, оборудование, которое требуется для изучения релаксации напряжений существенно сложнее оборудования, которое необходимо для исследования ползучести. При проведении испытаний процесса релаксации напряжений контрольные образцы необходимо подвергнуть деформации и выдерживать их в этом состоянии, при этом измеряя напряжения, меняющиеся во времени. Процессы релаксации напряжений следует исследовать при разных условиях деформирования, значениях температуры и относительной влажности. Данные о релаксации напряжений могут быть отражены графически в виде зависимостей релаксирующего модуля от времени (рис. 4.19).

Такой способ представления данных о релаксации напряжений удобен, когда необходимо экстраполировать процесс на более длительные времена.

Установки, используемые для исследования релаксации, обычно дороже установок для исследования ползучести. Из-за этого контрольные данные о ползучести

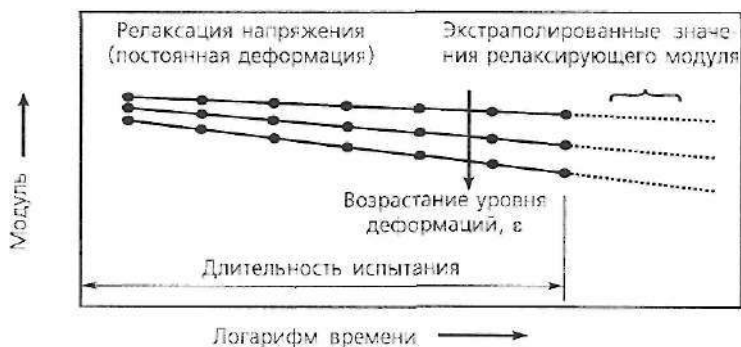


Рис. 4.19. Зависимости релаксирующего модуля от логарифма времени, полученные из семейства кривых релаксации напряжений при различных уровнях деформации

доступны в большей степени, чем данные о релаксации напряжений. К сожалению, свойства материала, полученные в исследованиях на ползучесть, могут быть непригодными при использовании изделия в условиях релаксации напряжения [15]. Рассмотрим следующий пример. Перед конструктором стоит задача: создать проект изделия, которое будет использоваться в условиях постоянной деформации при растяжении (для этого нужны данные о релаксации при воздействии растягивающих деформаций). Данные о ползучести при растяжении для полимерного материала доступны, но данных о релаксации напряжений нет. В этом случае можно 1) сделать проект изделия с использованием данных о ползучести и добавить некоторый дополнительный запас, чтобы гарантировать прочность изделия (поскольку данные о ползучести и релаксации напряжений необязательно эквивалентны) или 2) разработать программу испытаний, которая позволит получить данные о релаксации напряжений. С инженерной точки зрения последний подход предпочтительнее, но стоимость и время, связанные с проведением испытаний процесса релаксации напряжений, могут быть очень большими. Время, необходимо для проведения испытаний, можно уменьшить за счет получения данных за относительно короткое время испытания и экстраполирования их на более длительные времена. Но при этом нельзя гарантировать высокую степень достоверности. Третьей возможностью является выполнение программы ускоренных испытаний по получению значений релаксации напряжений при повышенных температурах, и далее использовать принцип температурно-временной аналогии.

4.3.6. Коэффициент запаса прочности

В настоящее время не существует строго определенных правил, которых следует придерживаться при оценке полимерных материалов с точки зрения запаса прочности [12].

Термин «коэффициент запаса прочности» не совсем удачен для пластмассовых изделий. Рассмотрим несколько распространенных синонимов этого термина. Сам термин «коэффициент запаса прочности» обычно используется для металлов и определяется как соотношение расчетной нагрузки, которая приводит к разрушению

детали или структурного элемента, к нагрузке, которой подвергается этот элемент в процессе эксплуатации [2]¹. Этот термин теряет свою значимость при его применении к пластмассам, в которых наблюдаются эффекты ползучести и релаксации напряжения. Часто пластмассовые изделия выходят из строя не из-за их разрушения, а из-за таких явлений, как текучесть, интенсивная ползучесть или релаксация напряжений, образование волосяных трещин и т. д. Поэтому в отношении пластмасс больше подходит термин «допустимое рабочее напряжение (деформация)», который означает напряжения при растяжении, сжатии, сдвиге, определяемые производителем материала [12,15,16]. Термин «частный коэффициент запаса прочности материала» основан на том, что свойства материала в изделии не эквивалентны свойствам контрольных образцов, полученных в идеальных лабораторных условиях [1]. Свойства пластмассы зависят от условий переработки, поскольку эти условия определяют ориентацию молекул/волокон, степень кристалличности, степень деструкции, остаточные напряжения, качество линий спая и т. д.

Дополнительный коэффициент запаса прочности, который называют «частный коэффициент запаса прочности для нагрузки» используется для учета возможного возрастания нагрузки и напряжений. Также существует «общий коэффициент запаса прочности», который обобщает все коэффициенты, связанные с параметрами материала и условиями нагрузки, под одним заголовком [1].

Коэффициент запаса прочности, используемый конструктором, определяется условиями эксплуатации изделия, последствиями разрушения, а также квалификацией и опытом самого конструктора. Последствия разрушения требуют тщательного рассмотрения. Риск получения травмы в результате разрушения изделия всегда должен учитываться в первую очередь. В случае, если вероятность получения травмы высока, задается относительно большой запас прочности. Например, разрушение прозрачного отлитого пластмассового корпуса держателя картриджа водяного фильтра (что может произойти из-за внезапного перепада давления) может привести как к травмированию людей, так и разрушению водой предметов бытового назначения. Случай заклинивания кнопки регулировки громкости портативного радио не относится к травмоопасным и фатальным, поскольку изделие будет продолжать функционировать, а кнопка сама по себе стоит недорого и может быть легко заменена.

Уровень технической разработки также будет влиять на запас прочности. Например, метод конечных элементов дает более точную оценку максимальных значений напряжения по сравнению с классическими формулами, связывающими напряжение и деформацию. Коэффициент запаса прочности будет менее значим для изделий, в которых при анализе напряжения учитывается коэффициент концентрации напряжений. Можно быть более уверенным в изделии, если оно проверяется с помощью прототипирования и в ожидаемых условиях эксплуатации, чего нельзя сказать об изделии, для которого такой экспериментальной проверки сделано не было.

¹ Коэффициент запаса прочности K (для металлов) — $K = G / \sigma$, где σ — предельное напряжение, G — допускаемое напряжение. Значение предельного напряжения для пластичных материалов совпадает с пределом пропорциональности, для хрупких — с разрушающим напряжением. — *Примеч. науч. ред.*

Прототипирование и экспериментальный анализ возможно представляют собой наилучшие методы оценки максимально возможной пригодности полимерного материала (к сожалению, за счет увеличения времени разработки и стоимости инженерных расчетов). ОШ-системы помогают конструктору расположить линии спая в некритичных областях, оптимизировать расположение впускных литников, а также оценить остаточные напряжения и напряжения, возникающие в процессе литья под давлением. Все эти аспекты проектирования определяют надежность изделия при эксплуатации.

Полнота и достоверность данных о свойствах материала, используемых в процессе проектирования, очень важны при определении величины коэффициента запаса прочности. Конструктор будет более уверен в своих действиях при проектировании, если в его распоряжении будут данные о ползучести и релаксации напряжений, чем в том случае, когда он использует сокращенные данные (предназначенные для отбора материалов). Следует заметить, что практика получения максимального (допускаемого) проектного значения напряжения путем деления величины предела текучести и предела прочности, полученных из кратковременных данных зависимости напряжения от деформации, на коэффициент запаса прочности, дает неточные результаты, и, как правило, неприемлима [14].

Изделия, разрабатываемые для длительного использования в условиях определенных нагрузок (или деформации), должны иметь соответствующий срок службы. В таких случаях должны использоваться коэффициенты запаса прочностей, полученные на основании данных о ползучести и релаксации напряжения. С помощью коэффициента запаса прочности можно определить как напряжение (или деформацию), так и значение времени до разрушения. В случае длительного использования изделия время до разрушения (то есть разрушение при ползучести) является критическим параметром. Например, изделие, которое спроектировано для работы в условиях непрерывной нагрузки в течение двух лет, должно разрабатываться для работы при максимальных напряжениях в течение 8 лет до разрушения (коэффициент запаса прочности для такого периода времени равен 4). Если приходится использовать кратковременные данные из зависимости напряжения от деформации, погрешности при расчетах будут очень велики, поэтому в этом случае следует увеличить значения коэффициентов запаса прочности.

Проблема расчета коэффициента запаса прочности относится к наиболее важным. Ползучесть для полимеров, армированных стекловолокнами, может оказаться низкой, но это не значит, что линии спая у этих материалов будут прочными. Сложности возникают из-за того, что значения прочности в продольном и поперечном направлениях течения расплава у армированных материалов очень сильно отличаются. В этих случаях необходимо увеличивать значения прочности. Производителями материалов рекомендуются различные эмпирические правила для начального проектирования, но большинство производителей все же рекомендует проводить испытания прототипов в ожидаемых условиях эксплуатации прежде, чем завершены работы по определению размеров оснастки.

Существует несколько практических способов расчета коэффициента запаса прочности. Один из способов заключается в умножении значения предела текучести

материала на фактор использования для определения области «рабочих» значений напряжений [12]. Такой подход применим для изделий, подвергающихся кратковременным или периодическим нагрузкам, но он носит очень упрощенный характер и поэтому не рекомендуется для долговременных нагрузок, когда необходимы данные о ползучести и релаксации напряжений.

Таблица 4.2. Типовые нормативы для фактора использования [12]

Тип нагрузки	Разрушения не критические	Разрушения критические
Периодическая (не усталостная) нагрузка	25–50 % · σ_y	10–25 % · σ_y
Непрерывная нагрузка	10–25 % · σ_y	5–10 % · σ_y

σ_y – предел текучести.

При оценке уровней напряжения не следует упускать из виду эффекты, связанные с концентрацией напряжений. Допустимые проектные напряжения для пластичных материалов в условиях статической нагрузки могут быть определены путем совместного учета фактора использования материала S_n , коэффициента концентрации напряжения K зависящего от геометрической формы/типа материала [8],

$$\sigma_D \leq (S_T \cdot \sigma_y) / K, \quad (4.4)$$

где предел текучести является первым максимумом на зависимости напряжения от деформации, измеренной при соответствующих температуре, относительной влажности и скорости деформирования. Эффект ползучести должен рассматриваться, когда изделия подвергаются нагрузкам в течение длительного периода времени. Коэффициенты концентрации используются для учета отверстий или закруглений на поверхности изделия. Значение K от 2,0 до 4,0 обычно используется для сглаживающего закругления, а значение K выше 6,0 — для острых углов. Коэффициент использования материала может быть определен различными способами. Один из методов приведен ниже [8]:

$$S_T = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4, \quad (4.5)$$

- где S_1 — риск получения травм людьми в случае разрушения
- отсутствие риска — 1,0
 - вероятное получение травмы — 0,7
 - гарантированное получение травмы — 0,5
- S_2 — коэффициент, связанный с технологией получения (норматив)
- чистый полимер — 1,0
 - волокна, ориентированные в направлении максимального напряжения — 0,8
 - волокна, ориентированные в направлении, перпендикулярном направлению максимального напряжения — 0,5
 - произвольная ориентация волокон — 0,7

- неизвестная ориентация волокон — 0,5 (максимальная прочность для этого случая)
- S_3 — точность расчета напряжений
 - моделирование методом конечных элементов — 1,0
 - использование классических формул — 0,75
 - оценки — 0,5
- S_4 — деструкция материала
 - значения, соответствующие специфике материала < 1,0

В некоторых случаях производители материала рекомендуют брать уровни рабочих напряжений напрямую из справочной литературы по конструированию. Производители материалов предоставляют информацию, аналогичную той, которая приведена в табл. 4.3 для ПК без наполнителя. Для справки и сравнения приводим значение предела текучести при растяжении для ПК, полученное из кратковременных испытаний на растяжение, которое составляет 9000 фунтов/дюйм² (62 МПа) при комнатной температуре [16].

Таблица 4.3. Рекомендуемые растягивающие рабочие напряжения для поликарбонатов обычного назначения

Температура, °C	Рабочее напряжение, фунтов/дюйм ²	Непрерывное нагружение*, МПа	Рабочее напряжение, фунты/дюйм ²	Периодическое нагружение**, МПа
-54	4200	(29,0)	5200	(35,9)
-18	2300	(15,9)	4200	(29,0)
23	2000	(13,8)	4000	(27,6)
54	1600	(11,0)	3500	(24,1)
71	1000	(6,9)	3200	(22,1)
93	500	(3,4)	3000	(20,7)
121	0	(0)	2500	(17,2)

* В данном случае непрерывное нагружение — нагружение в течение более 6 ч;

** Периодическое нагружение — нагружение, которое действует на изделие менее 6 ч, с тем же временем восстановления «отдыха» изделия.

Изготовители материалов рекомендуют снижать эти показатели для марок ПК с пониженной вязкостью (то есть для материалов, имеющих более низкую молекулярную массу). Марки с более низкой молекулярной массой имеют аналогичные кратковременные значения предела текучести, но у них также наблюдается уменьшение ударной прочности и сопротивления ползучести.

Коэффициенты запаса прочности, используемые для проектирования, могут перекрывать диапазон примерно от 2 до более чем 20 для статических режимов нагружения. Коэффициенты запаса прочности в большей степени применимы для долговременных режимов ползучести и релаксации напряжений. Изделия, подвергающиеся циклическим или усталостным нагрузкам требуют большего внимания, а коэффициенты запаса прочности применяются к данным по усталостной прочности материала.

4.4. Балки

4.4.1. Общие положения

Структурный элемент, сконструированный для того, чтобы выдерживать нагрузку, приложенную к его различным точкам, называют балкой [171. Балки обычно представляют собой длинные прямые призматические брусья с поперечным сечением, форма которого должна обеспечить наиболее эффективное сопротивление сдвиговым и изгибающим напряжениям, создаваемыми приложенной нагрузкой. Классические формулы, используемые для расчета напряжений и прогибов прямолинейных балок, получены с большим количеством допущений [2]:

- балка изготовлена из однородного материала с одним и тем же модулем упругости на растяжение и сжатие;
- балка прямолинейная или имеет кривизну в плоскости изгиба с радиусом кривизны, по крайней мере в 10 раз меньше толщины балки;
- поперечные сечения балки одинаковы;
- балка имеет по крайней мере одну продольную плоскость симметрии;
- все нагрузки (и реакции на них) направлены перпендикулярно оси балки, и лежат в той же плоскости, в которой лежит продольная ось симметрии;
- длина балки много больше ее толщины;

Заметим, что в методе испытания, описанном в стандарте «Упругие свойства полимеров и электроизоляционных материалов» (*Flexural Properties of Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790*), утверждается основное правило: «...отношение расстояния между опорами к толщине балки 16:1 является удовлетворительным, когда отношение нормальных напряжений к касательным (сдвиговым) равно 8:1».

- балка не должна быть непропорционально широкой;
- максимальное напряжение не должны превышать предел пропорциональности.

Книжная полка и консольная защелка (деталь изделия), имеют одинаковую «балочную» геометрическую форму (рис. 4.10.

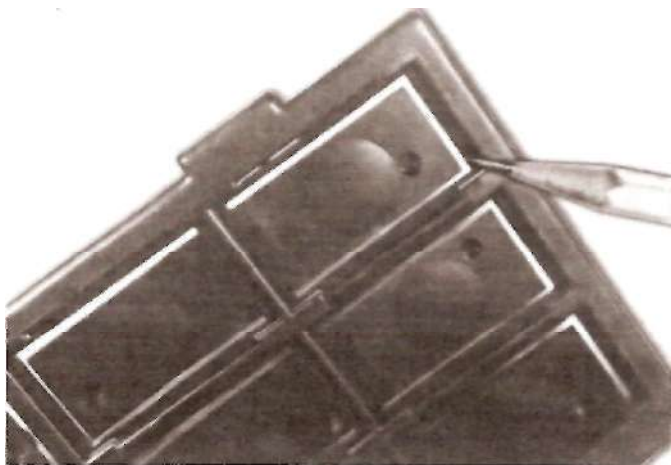


Рис. 4.20. Элементы клавиатуры представляют собой консольные балки в миниатюре, которые периодически подвергаются нагрузкам

К другим примерам «консольно-балочной» геометрии относятся крючки автомобильных колпаков (рис. 4.2) и клавиши клавиатуры (рис. 4.20).

Поведение балки под нагрузкой легче всего описать, когда балка находится в горизонтальном положении, а направление нагрузки и реакции на них имеют вертикальное направление. После приложения нагрузки балка будет изгибаться или деформироваться и волокна (бесконечно тонкие слои материала) с вогнутой стороны будут укорачиваться (то есть эти слои будут находиться под действием сил сжатия), а волокна на выпуклой стороне балки будут удлиняться (будут находиться под действием сил растяжения). Нейтральная поверхность или нейтральная плоскость балки будет перпендикулярна плоскости нагружения. Если пренебречь сдвигowymi эффектами, то напряжения и деформация волокон будут пропорциональны расстоянию до нейтральной поверхности (плоскости или слоя, в котором напряжения и деформации равны 0), а прогиб балки происходит только за счет изгиба¹.

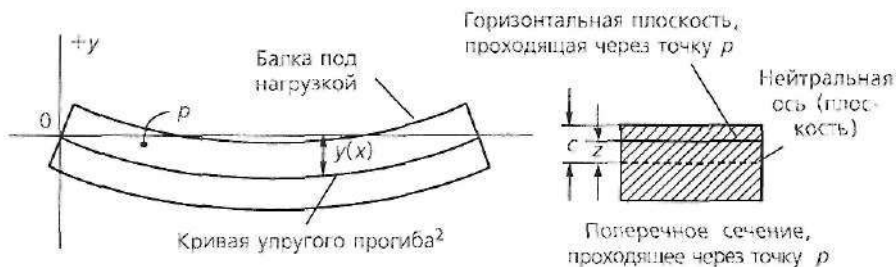


Рис. 4.21. Схема упругой балки, которая находится под действием изгибающей нагрузки и расположена на простых опорах

Напряжения σ в волокнах в любой точке p в пределах границ балки могут быть определены с помощью:

$$\sigma = M \cdot y / I, \quad (4.6)$$

где M — изгибающий момент в поперечном сечении, проходящем через точку p ; I — осевой момент инерции сечения балки относительно нейтральной оси; y — расстояние между нейтральной осью и точкой p . Напряжение в волокнах может быть положительным или отрицательным. Максимальные напряжения в волокнах (то есть напряжения сжатия или растяжения на внешней поверхности) в любом конкретном сечении наблюдаются в точках, находящихся на максимальном расстоянии от нейтральной оси, в точке, где $y = \pm c$.

$$\sigma_m = M_m \cdot y_m / I = M_m \cdot c / I. \quad (4.7)$$

Величину c называют расстоянием от нейтральной оси до наиболее удаленных от этой оси точек (расположенных на внешних волокнах). Если использовать нейтральную

¹ Случай чистого изгиба. — Примеч. науч. ред.

² В отечественной литературе — изогнутая ось балки. — Примеч. науч. ред.

ось в качестве начала координат, то S будет иметь как положительные, так и отрицательные значения. Максимум напряжений в волокнах балки будет находиться на ее поверхности, и в том поперечном сечении, где наблюдается максимальный изгибающий момент M . Максимальные значения сжатия P и растяжения на внешней поверхности будут разными по величине, если балка несимметрична относительно нейтральной оси, или если модуль упругости материала при растяжении и сжатии имеет различные значения. Уравнения, описывающие изгибающий момент, и прогибы (упругие деформации) при изгибе для некоторых случаев нагружения прямолинейных балок, а также балок клиновидного или криволинейного сечения приведены в справочниках [1, 2] или в программных продуктах [18].

4.4.2. Свойства плоской фигуры (поперечного сечения балок)

Многие изделия из пластмассы (или детали изделий) разной геометрической формы могут быть представлены в виде балки с постоянным сечением. Для сконструирования балки, эффективно воспринимающей нагрузки, необходимо определить сопротивление изгибу при данной нагрузке, режим нагружения, размещение и типы опор, свойства материала и характеристики поперечного сечения балки [17]. К характеристикам поперечного сечения балки относятся:

Второй момент инерции (сечения)¹

Форма поперечного сечения балки (из данного материала) определяется способностью выдерживать нагрузку. Предположим, что балка на рис. 4.22 имеет сечение произвольной формы.

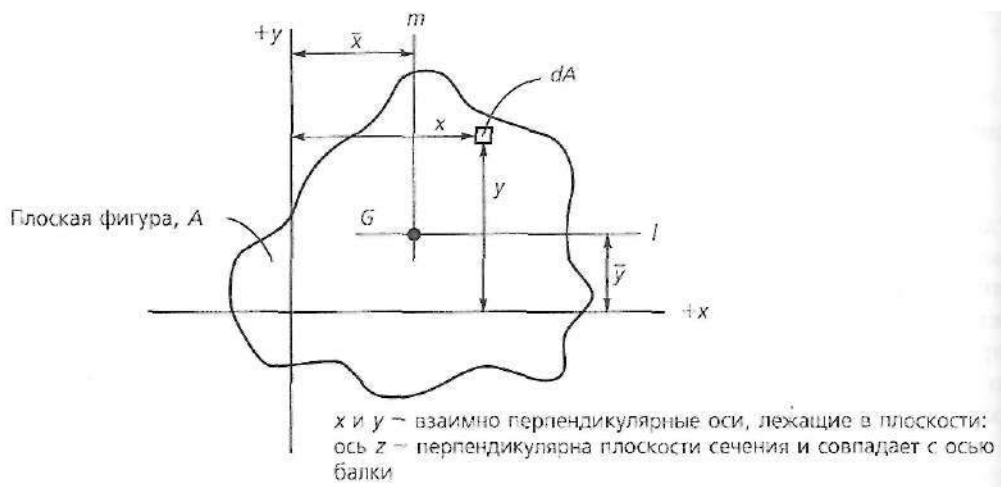


Рис. 4.22. Поперечное сечение балки (плоская фигура) — показано расположение центральных осей (x ; y) и осей, которые перпендикулярны центральным ($\bar{x}$; $\bar{y}$)

В отечественной литературе принят термин - осевой момент инерции сечения, который и будет употребляться в дальнейшем. — Примеч. науч. ред.

Осевой момент инерции сечения (не следует путать с термином «момент инерции механической системы») относительно оси, лежащей в плоскости сечения, например, относительно оси z , равен сумме произведений, полученных умножением площади каждого элемента сечения dA на квадрат его расстояния до оси x , то есть на его координату y [2,17]:

$$I_x = \int dA \cdot y^2; \quad (4.8)$$

$$I_y = \int dA \cdot x^2. \quad (4.9)$$

Часто используется теорема, известная как теорема о параллельных осях, пояснения к которой показаны на рис. 4.22 [17]. Теорема может быть записана в следующем виде:

$$I_x = I_t + A \cdot \bar{y}^2; \quad (4.10)$$

$$I_y = I_m + A \cdot \bar{x}^2. \quad (4.11)$$

где t и m — взаимно перпендикулярные оси, параллельные осям x и y , и пересекающиеся в точке G , которая является центром тяжести (геометрическим центром) фигуры. Значения x и y — это расстояния между осями y и t / осями x и m / соответственно [2].

В общем виде теорема о параллельных осях выглядит следующим образом:

$$I = I_c + A \cdot d^2, \quad (4.12),$$

где I — осевой момент инерции фигуры относительно произвольной оси (выражается в единицах длины в четвертой степени) равен осевому моменту инерции площади сечения относительно параллельной оси, проходящей через центр тяжести I_c плюс произведение площади поперечного сечения балки A на квадрат расстояния d между двумя параллельными осями. Теорема о параллельных осях обычно используется для определения значения осевого момента инерции сечения балок, имеющих более сложную форму поперечного сечения, и для которых не всегда можно найти решение в справочнике.

Центр тяжести и центральные оси

Центром тяжести фигуры называют такую точку на плоскости фигуры, относительно которой статический момент площади сечения равен 0. Центральной осью фигуры называют ось, которая проходит через ее центр тяжести [2]. Оси t и m на рис. 4.22 являются центральными осями, лежащими в одной и той же плоскости.

Нейтральная ось

Нейтральной осью балки называют линию нулевых напряжений в любом поперечном сечении элемента. Эта линия образуется на пересечении нейтральной поверхности с плоскостью поперечного сечения [2]. Когда прямолинейная балка с постоянным поперечным сечением, аналогичная той, что приведена на рис. 4.21, находится под действием нагрузки, перпендикулярной ее оси, прогиб будет приводить к сжатию частей сечения, которые находятся между нейтральной плоскостью и верхней поверхностью, и растяжению частей сечения между нейтральной осью и выпуклой нижней

поверхностью. Нейтральная ось простой однородной балки совпадает с горизонтальной центральной осью в поперечном сечении балки, если балка обладает свойствами сплошного однородного тела. Напряжения и деформации на нейтральной оси равны 0 [15].

Момент сопротивления сечения Z

Момент сопротивления сечения относительно данной оси определяется как отношения осевого момента инерции сечения на расстояние от этой оси до наиболее удаленной точки данного сечения [2]. Момент сопротивления сечения имеет размерность единиц длины в третьей степени (например м^3 , см^3 и т. п.).

Радиус инерции r

Радиусом инерции фигуры относительно данной оси называют квадратный корень из отношения осевого момента инерции фигуры относительно этой оси, деленной на площади этой фигуры.

$$r_x = (I_x/A)^{1/2} \quad r_y = (I_y/A)^{1/2}. \quad (4.13)$$

Способы вычисления осевых моментов, радиусов инерции, координат точек центров тяжести для некоторых простых фигур изображены на рис. 4.23. Более обширный справочный материал представлен в [2].

Свойства фигур более сложной геометрической формы могут быть найдены в справочниках, если предварительно разбить их на более простые геометрические фигуры. При этом в «составных» фигурах необходимо учитывать, следующее:

1. Осевой момент инерции составной фигуры относительно оси равен сумме осевых моментов инерции отдельных частей этой фигуры, определенных относительно той же оси. Это можно записать следующим образом:

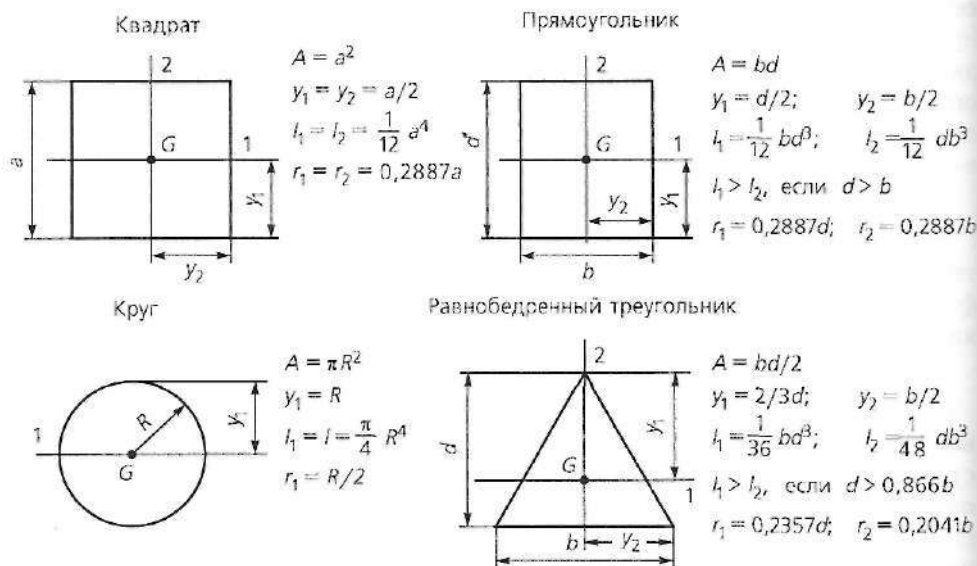


Рис. 4.23. Геометрические характеристики квадрата, прямоугольника, круга и треугольника

$$I_x = \Sigma I_{i,x} \quad (4.14)$$

2. Пустота в области сечения (например, вырезанный круг) должна быть учтена путем вычитания осевого момента инерции геометрической фигуры и соответствующей пустоте.

3. Статический момент всей составной фигуры (первый момент площади фигуры) M относительно любой оси равен сумме статических моментов отдельных фигур, которые формируют сечение относительно этой оси. (Статический момент площади фигуры относительно данной оси является суммой произведений, полученных умножением площади каждого элемента сечения dA на его расстояние от каждого этого элемента до данной оси.)

$$M_x = \int dA \cdot y. \quad (4.15)$$

Для составной фигуры общий суммарный статический момент относительно оси x , определяется уравнением:

$$M_x = \Sigma M_{i,x} \quad (4.16)$$

Суммарное значение площади для составной фигуры определяется уравнением:

$$A = \Sigma A_i. \quad (4.17)$$

Значения, полученные с помощью уравнений (4.16) и (4.17), могут быть также использованы для определения места расположения центральной оси поперечного сечения балки относительно оси координат или какой-либо другой вспомогательной оси. Расстояние между вспомогательной осью x и центральной (которая может быть нейтральной осью) составной фигуры может определяться следующим образом:

$$y_c = \Sigma M_{i,x} / \Sigma A_i. \quad (4.18)$$

Уравнение (4.18) может быть использовано для определения места расположения нейтральной оси балок с несимметричным поперечным сечением, когда положение нейтральной оси не столь очевидно. Как только станет известным место расположения центральной оси составной фигуры, которая перпендикулярна положению нейтральной оси, а также площади отдельных фигур и значения моментов инерции для каждой отдельной фигуры относительно их собственных осей, параллельных центральным осям, то значение осевого момента инерции для всего сечения относительно его нейтральной оси может быть определено из уравнений (4.12) и (4.14):

$$I_T = \Sigma [I_{c,i} + (A_i \cdot d_i^2)], \quad (4.19)$$

где $I_{c,i}$ — величина осевого момента инерции отдельной фигуры относительно ее собственной центральной оси; A — площадь каждой отдельной фигуры; d — расстояние от центральной оси каждой отдельной фигуры до центральной (нейтральной) оси составной фигуры. Следует заметить, что величина момента сопротивления сечения Z составной фигуры не равна сумме значений моментов сопротивления отдельных фигур и должна определяться с помощью общего осевого момента инерции составной фигуры. Приведем несколько примеров.

Пример 4.1. Осевой момент инерции для фигур простейшей геометрической формы

Поперечное сечение балки, показанной на рис. 4.24, симметрично относительно осей x и y .

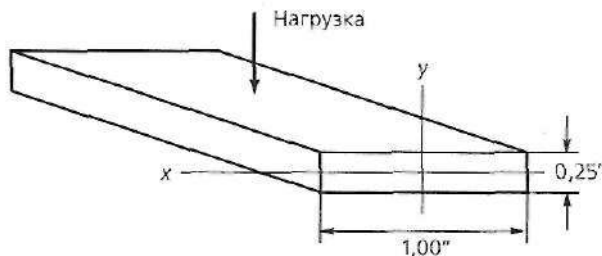


Рис. 4.24. Поперечное сечение прямоугольной балки

Если к балке приложена нагрузка перпендикулярно оси x , то ось x , являясь осью симметрии, а также центральной осью, перпендикулярна линии действия нагрузки. Она также совпадает с нейтральной осью для однородных упругих материалов. Балка имеет ширину b 1,00 дюйм и толщину h 0,25 дюйма. Конструктору может понадобиться определить осевой момент инерции сечения относительно оси x до определения напряжений и прогиба, возникающих из-за приложенной нагрузки. В этом случае значение / относительно центральной оси определяется следующим образом:

$$I_x = (b \cdot h^3 / 12);$$

$$I_x = [(1,0)(0,25)^3 / 12].$$

Расчет значения / для поперечного сечения относительно оси y будут представлять интерес, если к балке приложена нагрузка перпендикулярно этой оси. Ось y , являясь осью симметрии и также центральной осью, направлена перпендикулярно приложенной нагрузке и становится нейтральной осью:

$$I_y = (h \cdot b^3 / 12); \quad (4.11)$$

$$I_y = [(0,25)(1,0)^3 / 12].$$

Заметим, что момент инерции относительно оси y существенно больше момента инерции относительно оси x ; это имеет особое значение для изделий, в которых необходима высокая прочность при изгибе. Из уравнения (4.10) видно, что значение момента инерции для балки прямоугольного сечения пропорционально толщине балки в третьей степени. Прогиб балки при заданных эксплуатационных нагрузках всегда обратно пропорционален осевому моменту инерции относительно нейтральной оси (то есть конструкции с высокими значениями / будут иметь меньший прогиб). С другой стороны, когда требуется использование больших отклонений (например, в случае защелок (балок)) используются меньшие размеры стенок.

Пример 4.2. Осевой момент инерции составного сечения (асимметричного)

Классическим примером минимализации прогиба является использование балки двутаврового сечения (двутавр). Геометрия двутавра такова, что большая часть его площади сечения распределена достаточно далеко от нейтральной оси его поперечного сечения. При

этом балка имеет относительно тонкие стенки, поэтому ее вес будет минимальным. То есть рациональность геометрической формы двутавра заключается в том, что он обладает относительно высоким соотношением жесткости к весу.



Рис. 4.25. Геометрическая форма двутавровой балки обеспечивает высокую жесткость за счет размещения материала на большом расстоянии от нейтральной оси

Как и поперечное сечение сплошного прямоугольника в примере 4.1, двутавр симметричен относительно осей x и y . Но балка не имеет правильной геометрической формы, следовательно, значение осевого момента инерции может быть вычислено путем разбиения сложного поперечного сечения на ряд сплошных или «пустых» фигур, имеющих правильную форму и значения осевых моментов инерции которых можно найти в справочниках. Предположим, что к балке приложена нагрузка перпендикулярно оси z , тогда для конструктора будет представлять интерес значение I_x (то есть значение осевого момента инерции относительно нейтральной оси). Рассчитать это значение можно по-разному. Мы представим несколько вариантов решения, но все они приведут к одному и тому же результату.

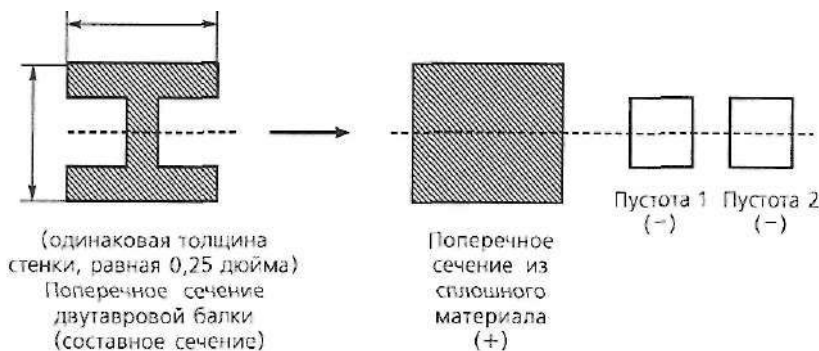


Рис. 4.26. Геометрическая форма двутавра для расчета осевого момента инерции может быть представлена в виде одного сплошного прямоугольника и двух полых прямоугольников

Пример 4.2а Осевой момент инерции двутавровой балки

Поперечное сечение балки, которое показано рис. 4.25, можно представить в виде прямоугольника из сплошного материала, из которой «вырезаны» два прямоугольника меньшего размера. Центральные оси для каждой из этих геометрических фигур правильной формы

(одной сплошной и двух пустотелых) совпадают с центральной осью всей двутавровой балки:

$$I_T = \sum [I_{c,i} + (A_i \cdot y_i^2)]. \quad (4.19)$$

Уравнение (4.19) может быть сведено к:

$$I_T = \sum I_{c,i} = I_{c \text{ материал}} - I_{c \text{ пустота 1}} - I_{c \text{ пустота 2}},$$

так как значение y для каждой из трех фигур правильной геометрической формы (то есть для сплошного и полых прямоугольников) будет равно нулю. Поскольку геометрические формы пустот совпадают, можно записать:

$$\begin{aligned} I_T &= I_{c \text{ материал}} - 2I_{c \text{ пустота 1}}; \\ I_T &= [(b_s \cdot h_s^3/12)] - [2(b_v \cdot h_v^3/12)]; \\ I_T &= [(1,0)(1,0)^3/12(2)] - [2(0,5)(0,5)^3/12]; \\ I_T &= 0,0938 \text{ дюйм}^4. \end{aligned}$$

Поперечное сечение двутавровой балки также можно считать состоящим из одного большого прямоугольника и одного пустотелого прямоугольника меньшего размера. Область пустотелого прямоугольника показана на рис. 4,27. Значение осевого момента инерции относительно оси x для швеллера, как показано на рисунке, эквивалентно осевому моменту инерции поперечного сечения двутавровой балки относительно оси x (эти геометрические формы являются эквивалентными только с этой точки зрения).

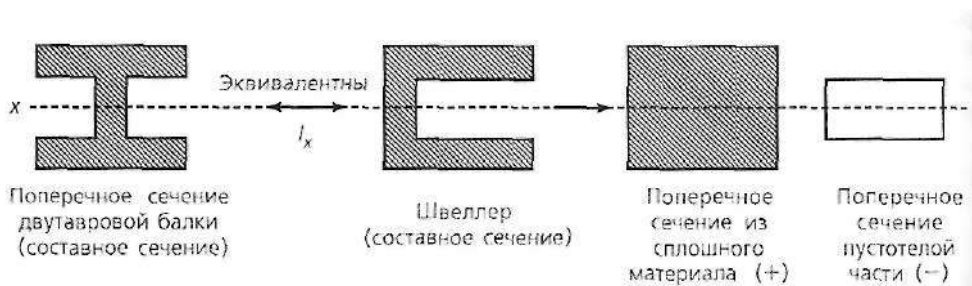


Рис. 4.27. Геометрическая форма двутавровой балки может быть также представлена в виде большого сплошного прямоугольника и одного большого пустотелого прямоугольника для расчета осевого момента инерции

Пример 4.2Б. Осевой момент инерции двутавровой балки

Поперечное сечение двутавровой балки можно также представить в виде набора сплошных прямоугольников (рис. 4.28). В этом случае положение нейтральной оси совпадает с положением центральной оси фигуры 2. Центральные оси для фигур 1 и 3 легко определяются.

Центральные оси для двух из трех фигур (а именно фигур 1 и 3) не совпадают с центральной осью всего двутаврового сечения. В этом случае может быть использована теорема о параллельных осях для расчета осевого момента инерции составного сечения относительно центральной оси.

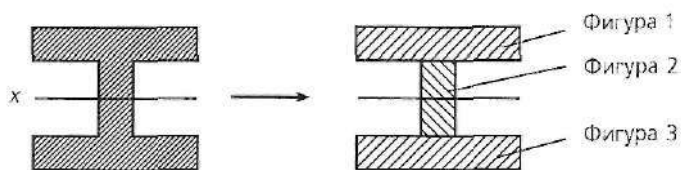


Рис. 4.28. Геометрическая форма двутавровой балки может быть представлена в виде трех сплошных прямоугольников для расчета осевого момента инерции.

$$I_T = \Sigma [I_{c,i} + (A_i \cdot y_i^2)]; \quad (4.19)$$

$$\text{Фигура 1} - I_1 = [(1,25)(0,25)^3/(12)] + [(1,25)(0,25)(0,375)^2];$$

$$\text{Фигура 2} - I_2 = [(0,25)(0,50)^3/(12)] + [(0,25)(0,50)(0,0)^2];$$

$$\text{Фигура 3} - I_3 = [(1,25)(0,25)^3/(12)] + [(1,25)(0,25)(-0,375)^2];$$

$$I_T = \Sigma I_i = I_1 + I_2 + I_3 = 0,0456 + 0,0026 + 0,0456;$$

Значение момента инерции, определенное с помощью такого подхода, эквивалентно показанному в примере 4.2а, но в этом случае промежуточные результаты дают дополнительную полезную информацию. Показано, что верхняя и нижняя полки в основном обеспечивают жесткость двутавровой балки. Центральная часть не дает большого вклада в жесткость, но она необходима для обеспечения сплошности фигуры и передачи изгибающих напряжений.

4.4.3. Использование усиливающих ребер для увеличения жесткости

Многие пластмассовые изделия имеют геометрическую форму, в которой предусмотрены ребра. Они необходимы изделиям, подвергающимся изгибающим нагрузкам. Усиливающие ребра увеличивают жесткость деталей.

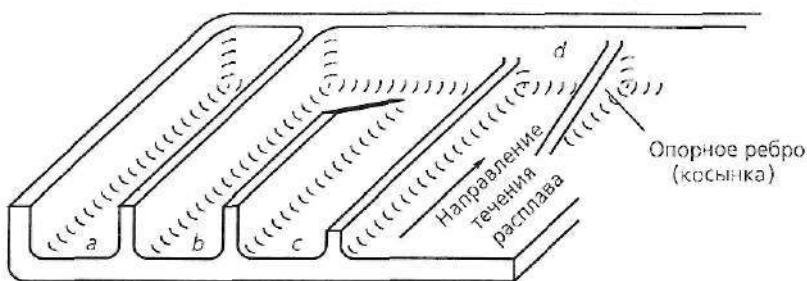
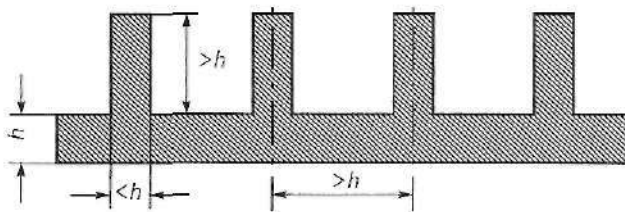


Рис. 4.29. Типичные конфигурации ребер, используемых для увеличения жесткости отливок, имеющих форму пластин. Конструкторы должны рассматривать характеристики ребер, и технологические параметры, связанные с изготовлением ребер, например, вентиляции и извлечением изделий

Усиливающие ребра используются на поверхностях, не являющихся лицевыми. Ребра обычно проектируются в направлении максимальных напряжений и максимального изгиба. Они могут располагаться по всей длине изделия или использоваться в качестве элементов локального усиления, чтобы повысить жесткость отдельных участков изделия (рис. 4.29). Не пересекающиеся с вертикальной стенкой ребра не должны резко обрываться. Постепенное уменьшение зоны перехода будет приводить к снижению концентрации напряжений, улучшению течения расплава и вентиляции при заполнении формы, что позволит снизить вероятность образования газовых ловушек, недоливов или подгаров. Другие структуры, подобные ребрам, например, опорные ребра или косынки (рис. 4.29, *d*) обычно используются для укрепления вертикальных стенок.

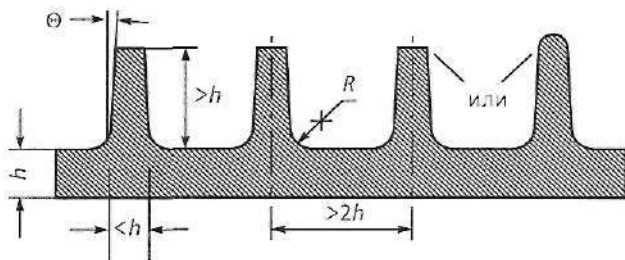
Простейшие усиливающие ребра имеют прямоугольное сечение, по форме похожее на сечение балок, которые крепятся к несущей поверхности изделия. Существуют случаи, когда формы и размеры ребра должны быть изменены, как показано на рис. 4.30. Усиливающее ребро изготавливают с клиновидным профилем, чтобы уменьшить усилие съема изделия и обеспечить его мгновенное отделение в процессе извлечения. Другая модификация заключается в том, что основание ребра (то есть место, в котором ребро пересекается с основной стенкой) имеет закругление, что снижает концентрации локальных напряжений и обеспечивает постепенное изменение толщины. Закругление в основании ребра улучшает характеристики заполнения формы и демпфирует напряжения, возникающие в процессе усадки/охлаждения. Минимальная ширина на практике ограничивается параметрами заполнения формы, а максимально возможная ширина ограничивается характеристиками усадки материала, из которого будет производиться изделие, то есть возможностью уплотнения материала и требованиями к плоскостности/внешнему виду отливки.

Ребра, сконструированные без учета требований производства



- Острые углы в основании
- Концентрация напряжений
- Интенсивный сдвиг — отсутствие угла наклона
- Сложности при извлечении

Ребра, модифицированные в соответствии с требованиями производства



- Улучшенная формуемость (+)
- Сниженная концентрация напряжений (+)
- Потенциальная возможность образования утяжи или усадочных пустот (-)
- Уменьшение жесткости при возрастании Θ (-)
- Уменьшение области действия ударного давления выталкивателя при возрастании Θ (-)

Рис. 4.30. Ребра прямоугольного сечения должны быть модифицированы

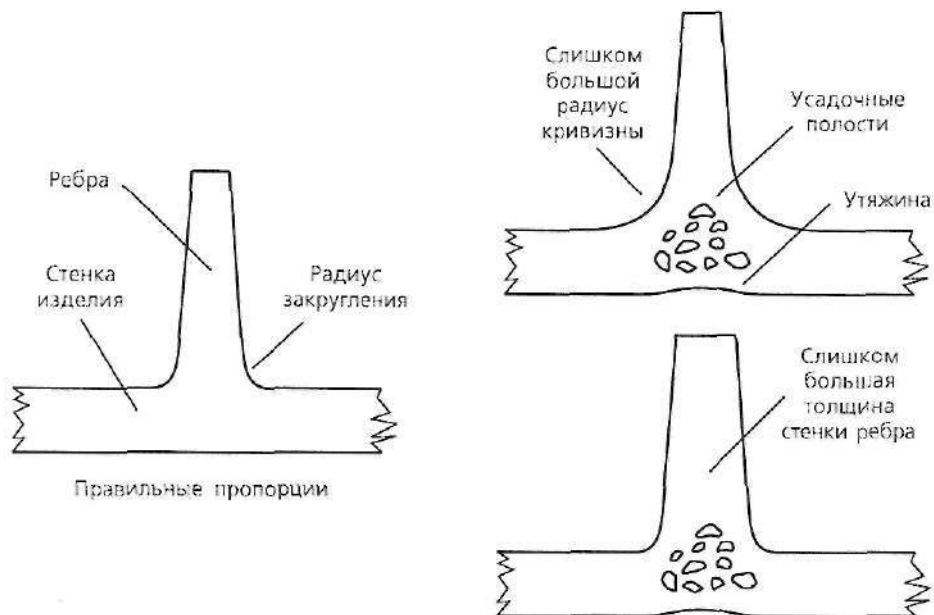


Рис. 431. Ребра, имеющие избыточные толщины или закругления, могут привести к образованию усадочных пустот или утяжин из-за локального увеличения толщины стенки

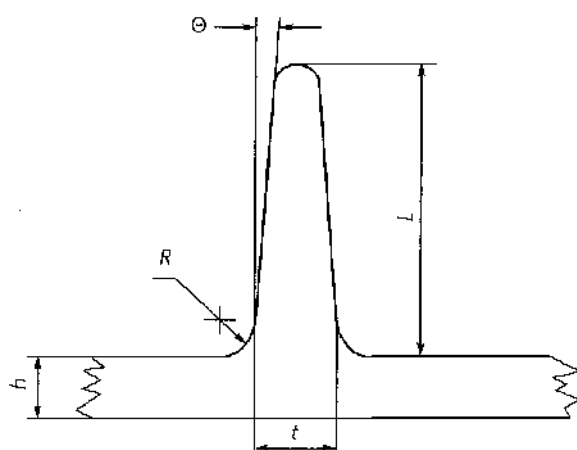
Усиливающие ребра, имеющие толстые стенки, могут приводить к образованию утяжин или формированию усадочных пустот. Использование больших закруглений теоретически должно снижать концентрацию локальных напряжений, но большая толщина сечения стенок, связанная с увеличением радиуса кривизны, может привести к возникновению усадочных напряжений и усадочных пустот. Некоторые производители материалов предоставляют контрольные отливки, которые содержат набор ребер разной геометрической формы. Конструктор может оценить внешний вид поверхности стенки напротив ребра, а также определить, удовлетворяет ли конструкция ребра эстетическим требованиям.

Существует много эмпирических правил и инструкций, использующихся при выборе геометрических форм усиливающих ребер [9,12,16, 20-29]. При этом следует учитывать, что усадка изделия в форме оказывает сильное воздействие на конструкцию ребра.

Высота ребер ограничивается свойствами текучести расплава и технологическими характеристиками процесса извлечения изделия (усадкой, коэффициентом трения и жесткостью материала, используемого для изготовления изделия). Более высокие усиливающие ребра можно производить, используя материалы с низкой вязкостью, с низким коэффициентом трения и высокой степенью усадки. Большие углы наклона для высоких ребер облегчают извлечение изделия. Возрастание угла наклона дает возможность одновременно увеличить жесткость, но с другой стороны — уменьшить площадь поверхности, необходимую для выталкивания изделия.



Рис. 4.32. Контрольная отливка используется для оценки внешнего вида поверхности, противоположной той, на которой установлено ребро (с разрешения *Allied Signal Inc.*, *Engineered Plastics*)



Общие положения для выбора размеров ребра (точный размер ребра зависит от специфических свойств материала)

- Толщина стенки элемента, h
- Наклон одной стороны, Θ : $0,5-1,5^\circ$
- Высота ребра, L : $\leq 5h$ (обычно $2,5-3,0h$)
- Расположение ребер (расстояние от центров): от $2h$ до $3h$
- Радиус кривизны со стороны основания, R : от $0,25h$ до $0,40h$
- Толщина ребра, t : $0,4-0,8h$

Рис. 4.33. Общие положения для выбора размеров ребра. Поставщики материала могут предоставить большое количество специальных рекомендаций по каждой марке материала

Острота последней проблемы может быть снижена за счет приливов под толкатели (см. раздел 2.6). Ребра должны быть отполированы в направлении извлечения (полированные уклоны) для облегчения выталкивания изделия. Высокие ребра увеличивают жесткость конструкции, не утяжеляя ее, но создают опасные изгибающие напряжения на кромках ребер (см. уравнение (4.7)). Следует оценить предлагаемую конструкцию усиливающих ребер, чтобы напряжения на внешних волокнах не превышали допустимых пределов [10]. Оптимальная конструкция учитывает расстояние между ребрами, их высотой и толщиной, углом уклона, толщиной стенки изделия в зоне крепления ребра и радиусом кривизны в основании ребра [25-29].

Общее правило здесь следующее: лучше использовать много тонких и невысоких ребер, чем несколько широких и высоких. Такой выбор оправдан как с точки зрения прочности изделия, так и с точки зрения простоты изготовления. Литьевая форма (особенно ее прототип) для изделия с ребрами позволяет менять число, ширину и высоту ребер, если свойства изделия не удовлетворяют требованиям при испытании прототипа. Этот принцип разработки известен под названием «проектирование с учетом требований безопасности». Усиливающие ребра можно изменять по ширине и высоте, чтобы иметь возможность регулировать распределения напряжений в изделии. С точки зрения изготовления ребра должны располагаться вдоль направления течения расплава, чтобы одновременно улучшить условия заполнения формы, удаление газов и ее вентиляцию. На практике ребра часто используются в качестве внутренних укоротителей или направляющих потока, чтобы содействовать заполнению и уплотнению как при обычном литье под давлением, так и при литье под давлением с газом. Обычной практикой является использование перпендикулярно расположенных друг к другу ребер на обратной стороне пластин в изделиях, которые подвергаются многоосным изгибающим нагрузкам в разных плоскостях. При производстве изделий с ребрами следует уделять особое внимание литниковой системе, поскольку в этом случае велика вероятность образования видимых линий спая. Если есть вероятность образования линии спая вдоль ребер, то необходимо быть уверенным, что максимум внешних напряжений в волокнах не будет превышать значения прочности материала в области линии спая.

Расчеты осевых моментов инерции для балок с ребрами

Расчет осевого момента инерции для сечения балок (или изделий) при наличии усиливающих ребер существенно сложнее, чем те, которые мы рассматривали выше. Это обусловлено тем, что усиливающие ребра обычно находятся на одной поверхности изделия (с обратной стороны изделия), и поперечное сечение не симметрично относительно нейтральной оси. Расположение нейтральной или центральной оси для несимметричного поперечного сечения надо определять с помощью уравнения (4.18) до расчета осевого момента инерции. Кроме того, геометрия усиливающего ребра может быть достаточно сложной сама по себе. Как было упомянуто ранее, усиливающие ребра обычно имеют закругления для уменьшения концентрации напряжения. Влиянием закруглений ребер на их жесткость обычно пренебрегают, но, при возможности, следовало бы его учитывать.

Пример 43. Осевой момент инерции фигур, не имеющих аксиальной симметрии структуры с **ребрами**

Этот пример показывает принцип расчета момента инерции (относительно нейтральной оси) сечения балки, не имеющей аксиальной симметрии. Рассматриваемая балка подвергается воздействию нагрузки перпендикулярно оси x в условиях эксплуатации.

Поскольку поперечное сечение ребер не имеет аксиальной симметрии, расположение центральной оси поперечного сечения неизвестно, и должно быть определено путем деления статического момента площади сечения на общую площадь сечения, что следует из уравнения (4.18). Расположение вспомогательной оси x выбирается в наиболее удобном месте, например, в верхней или нижней части поперечного сечения (последний вариант выбирают во избежание получения отрицательных чисел).

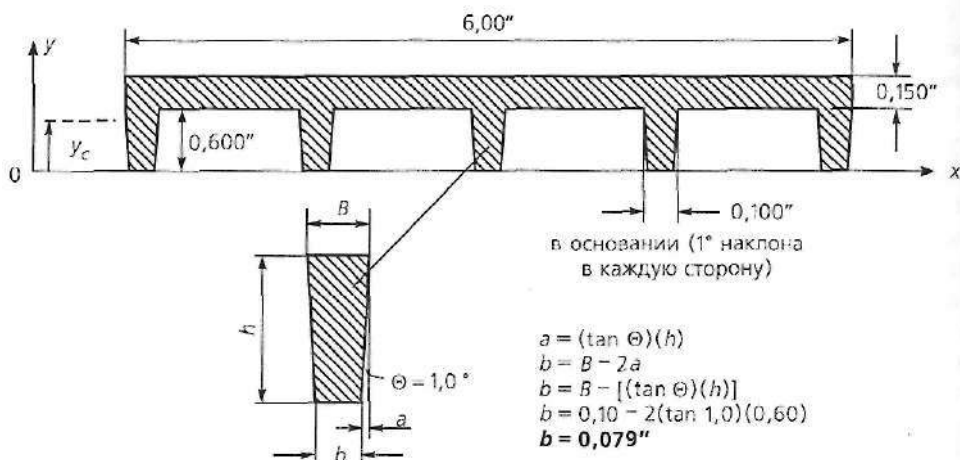


Рис. 4.34. Поперечное сечение включает в себя пять ребер, которые увеличивают осевой момент инерции или жесткость поперечного сечения

Для того чтобы рассчитать момент инерции фигуры с ребрами, составная геометрическая фигура должна быть разделена на несколько фигур правильной формы. В этом случае поперечное сечение с ребрами будет разделено на шесть отдельных фигур или зон.



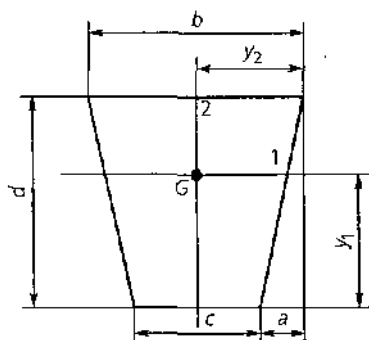
Рис. 4.35. Поперечное сечение балки сложной формы представлено в виде набора шести отдельных фигур для расчета момента инерции.

Фигура 1 представляет собой простую прямоугольную форму без прерывания сплошности. Усиливающие ребра в зонах 2-6 могут быть описаны одним из следующих способов:

- прямоугольное сечение с толщиной узкого края (на свободном конце) — консервативный подход;
- прямоугольное сечение со средней шириной — может привести к завышению жесткости при аппроксимации;

- набор элементов (набор прямоугольных сечений) — хорошая аппроксимация;
- трапециевидная геометрическая фигура — наилучшая аппроксимация.

Свойства фигуры, представляющей собой усеченный равнобедренный прямоугольник (или правильную трапецию), приведены на рис. 4.36 [2].



Сплошная трапеция

$$A = \frac{d}{2} (b + c)$$

$$y_1 = \frac{d}{3} \left(\frac{2b + c}{b + c} \right)$$

$$I_1 = \frac{d^3}{36} \left(\frac{b^2 + 4bc + c^2}{b + c} \right)$$

Рис. 4.36. Трапеция используется для описания свойств фигуры, соответствующей форме сужающихся ребер

Площадь фигуры A и расположение центральных осей (перпендикулярно приложенной нагрузке) y для каждой фигуры ребра (фигуры 2-6) определяются следующим образом:

$$A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = A_6 = (0,6/2)(0,100 + 0,079) = 0,0537 \text{ дюйма}^2;$$

$$y_2 = y_3 = y_4 = y_5 = y_6 = (0,6/3)[((2)(0,1) + (0,79))/(0,1 + (0,079))] = 0,312 \text{ дюйма}.$$

Площадь A прямоугольного сечения (фигура 1) и расположение центральной оси, которая перпендикулярна приложенной нагрузке (относительно оси x), для прямоугольного сечения должны быть также определены:

$$A_1 = (6,00)(0,150) = 0,900 \text{ дюйма}^2;$$

$$y_1 = (0,600) + (0,150/2) = 0,675 \text{ дюйма}.$$

Расположение центральной оси (нейтральной оси) для составной фигуры (полного поперечного сечения) может быть определено с помощью вычисления статических моментов.

$$M_x = \sum M_{i,x} = \sum A_i \cdot y_i \quad (4.16)$$

$$y_c = \sum M_{i,x} / \sum A_i = \sum (y_i \cdot A_i) / \sum A_i \quad (4.18)$$

Уравнение (4.18) используется для определения расстояния между вспомогательной осью (ось x на рис. 4.34) и осью всего составного сечения (нейтральная ось),

$$y_c = [((0,675)(0,15)(6,0)) + (5(0,312)(0,0537))] / [((0,15)(6,0)) + ((5)(0,0537))];$$

$$y_c = 0,592 \text{ дюйма}.$$

Расстояние между осью координат (расположенной в нижней части компонента, как показано на рис. 4.34) и центральной осью составной фигуры равно 0,592 дюйма.

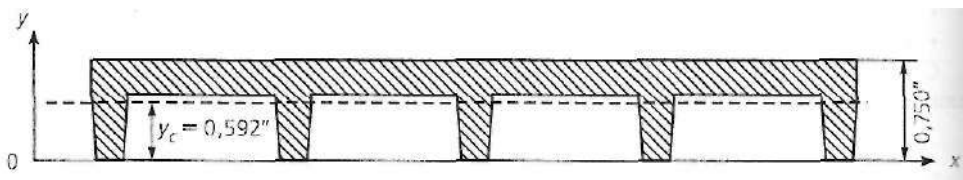


Рис. 4.37. Расположение центральной оси перпендикулярно приложенной нагрузке для поперечного сечения с ребрами

Осевой момент инерции для составного сечения относительно центральной оси, перпендикулярной приложенной нагрузке (нейтральной оси), может быть теперь рассчитан, поскольку известно положение центральной оси составного поперечного сечения.

$$I_T = \Sigma [I_{l_i} + (A_i \cdot y_i^2)]; \quad (4.19)$$

$$I_1 = [(6,0)(0,15)^3 / (12)] + [(0,15)(6,0)(0,675 - 0,592)^2] = 0,00789 \text{ дюйма}^4;$$

$$I_2 = [(0,6)^3 / (36)(0,267)] + [(0,3)(0,1 + 0,079)(0,312 - 0,592)^2] = 0,0058 \text{ дюйма}^4;$$

$$I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I_2 = 0,0058 \text{ дюйма}^4;$$

Поперечное сечение с ребрами имеет значение осевого момента инерции, эквивалентное осевому моменту инерции сечения прямоугольной формы из сплошного материала 6 дюймов шириной и 0,42 дюйма высотой. Этот пример показывает, что ребра являются эффективным средством повышения жесткости изделия, оставляя при этом приемлемым: общую толщину стенок с точки зрения потребления материала, время охлаждения в процессе производства и внешний вид изделия.

4.4.4. Осевой момент инерции неоднородных материалов/структур

Определенные типы изделий из пластмасс, имеющие форму балки, могут состоять не только из одного пластического материала, то есть являются неоднородными.

У изделий, состоящих из более чем одного слоя материала, расчеты осевого момента инерции на основе имеющегося поперечного сечения не могут быть использованы, поскольку они предполагают однородность материала в плоскости сечения.

К примерам неоднородных пластмассовых изделий относятся:

- профили, полученные методом соэкструзии, и изделия, полученные методом двухкомпонентного «сэндвич» литья;
- изделия, имеющие окрашенное покрытие, или металлизированные;
- многослойные изделия;
- изделия из вспененного материала.

Если модули упругости материалов, из которых состоит поперечное сечение изделия (или балки), отличаются, то центральная ось сечения (перпендикулярная приложенной нагрузке) не будет совпадать с нейтральной осью поперечного сечения. Это также справедливо для пластмасс, у которых значения модулей упругости при сжатии и растяжении различны.

Значение осевого момента инерции для балок (или поперечных сечений), которые состоят из более чем одного материала, может быть рассчитано с помощью метода эквивалентной толщины [2]. Использование этого метода предполагает трансформацию неоднородного сечения в однородное. Толщина каждого из слоев, параллельного главной оси, возрастает или уменьшается пропорционально изменению модуля упругости этого материала по сравнению с модулем упругости однородного базового материала.

Пример 4.4. Осевой момент инерции для неоднородных фигур — многослойные структуры

Балка из АБС-пластика с поперечным сечением с шириной $W = 6,000$ дюймов и толщиной $h = 0,125$ дюйма окрашена слоем акриловой эмали толщиной $0,003$ дюйма. Добавление окрашенного слоя будет влиять на жесткость конечного изделия. Это влияние может быть аппроксимировано при условии, что известны значения модуля упругости как для АБС-пластика, так и для слоя краски, а также предполагается безупречная адгезия между слоями (то есть полная передача напряжения от слоя к слою).

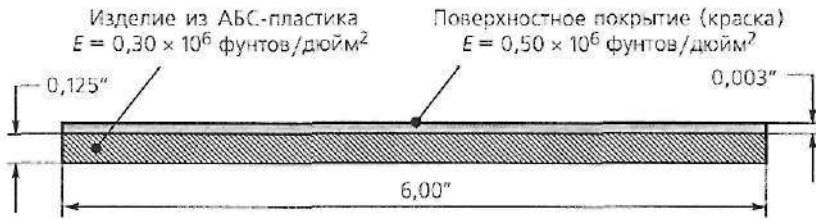


Рис. 4.38. Поперечное сечение прямоугольной балки из АБС-пластика, покрытой слоем краски — пример конструкции из неоднородного материала прямоугольного сечения

Если выбрать АБС-пластик в качестве базового материала, то его ширина будет $h'(АБС)$, а эквивалентное сечение будет таким же, а для слоя краски ширина $w'(P)$ возрастет пропорционально (поскольку у слоя краски выше значение модуля упругости) отношению модулей упругости:

$$W'_i = (E_i / E_{Ref})(W); \quad (4.20)$$

$$W'(АБС) = (E_{АБС} / E_{Ref})(W_{АБС});$$

$$W'(АБС) = [(0,30 \times 10^6) / (0,30 \times 10^6)](6,0) = 6,0 \text{ дюйма};$$

$$W'(P) = (E_p / E_{Ref})(W_p);$$

$$W'(P) = [(0,50 \times 10^6) / (0,30 \times 10^6)](0,003) = 0,005 \text{ дюйма}.$$

При использовании этого метода толщины отдельных слоев не меняются. Эквивалентное поперечное сечение (эквивалентная жесткость) определяется исходя из предположения, что эквивалентная форма однородна и состоит только из АБС-пластика (рис. 4.39).

Момент инерции эквивалентного однородного поперечного сечения из АБС-пластика может быть определен относительно центральной оси сечения (заметим, что расположение

нейтральной оси не очевидно из-за отсутствия симметрии). Определяем положение центральной оси, используя расчеты статического момента площади сечения.

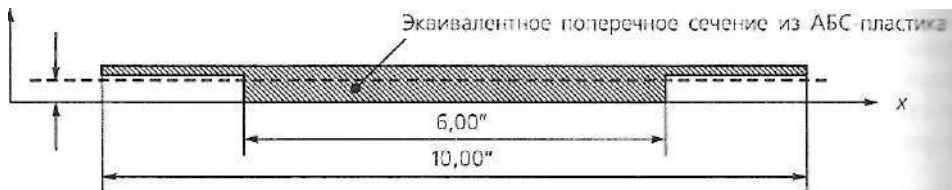


Рис. 4.39. Поперечное сечение балки из однородного материала, имеющего жесткость, которая эквивалентна жесткости окрашенной неоднородной балки

Значения момента инерции могут быть определены для эквивалентного однородного поперечного сечения:

$$M_x = \sum M_{i,x} = \sum A_i \cdot y_i \quad (4.17)$$

$$y_c = \sum M_{i,x} / \sum A_i = \sum (y_i \cdot A_i) / \sum A_i \quad (4.18)$$

$$y_c = [(0,003)(10,0)(0,1265) + (6,0)(0,125)(0,0625)] / [(0,003)(10,0) + (6,0)(0,125)]$$

$$y_c = 0,065 \text{ дюйма.}$$

Значение осевого момента инерции /для неоднородной структуры может быть определено по сечению эквивалентной геометрической формы относительно центральной (нейтральной) оси путем суммирования значений /моментов инерции двух прямоугольных сечений; представляющих сечение эквивалентной однородной составной балки:

$$I_T = \sum [I_{i,i} + (A_i \cdot y_i^2)]; \quad (4.19)$$

$$I_1 = [(10,0)(0,003)^3 / (12)] + [(10,0)(0,003)(0,1265 - 0,065)^2];$$

$$I_2 = [(6,0)(0,125)^3 / (12)] + [(6,0)(0,125)(0,0625 - 0,065)^2];$$

$$I_T = \sum I_i = I_1 + I_2 = 0,0011 \text{ дюйма}^4$$

Прогиб и напряжения, вызванные нагружением многослойной балки, могут быть рассчитаны с помощью значения момента инерции /, модуля упругости базового материала! и соответствующих расчетных формул. Если при этом не учитывать наличие слоя краски значения жесткости балки снизятся на 12 %. Значения прогибов, вычисленные для эквивалентной балки, будут совпадать со значениями неоднородной многослойной балки. Напряжение в волокнах или напряжение изгиба для балки прототипа должно быть преобразовано: в истинные значения напряжения для реальной составной балки путем учета возникающее разницы в ширине. Напряжение в волокнах для АБС-пластика остается неизменным, поскольку это базовый материал и его ширина осталась неизменной. Однако, напряжение в волокнах более широкого верхнего сечения балки-прототипа будет меньше, чем напряжение для слоя краски реальной балки на величину, зависящую от соотношений ширин или модулей упругости.

4.4.5. Пример расчета балки

Парковая скамейка (рис. 4.40) может быть использована для иллюстрации метода оценки напряжений, деформации или прогиба изделий из пластмассы в форме балок, подвергающихся изгибающим нагрузкам. Замена пластмассовыми материалам:

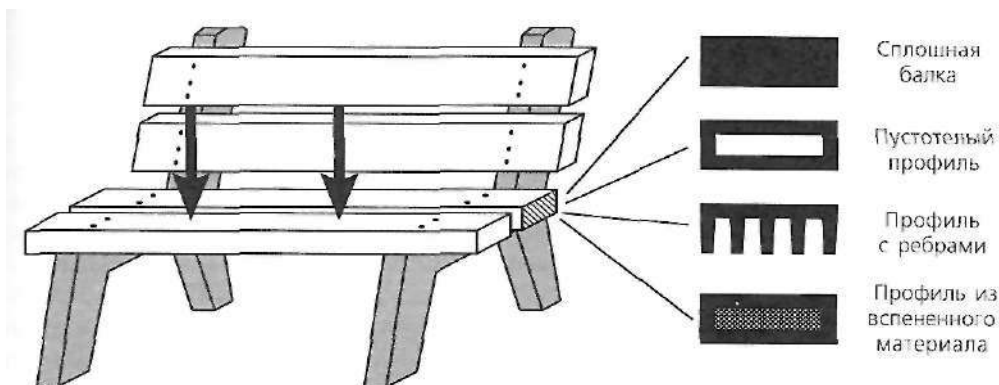


Рис. 4.40. Элементы конструкции сидения парковой скамейки являются балками. Предлагается использовать несколько альтернативных конструкций

(как правило, используется вторично переработанные полимеры) является обычной практикой при обновлении деревянного настила парковых скамеек.

К преимуществам пластмассовых «досок» относится увеличение срока службы, гладкость, прочная однородная окраска и вариативность конструкции (могут быть добавлены встроенные детали и элементы). Но по сравнению с деревом большинство пластмасс обладают относительно низкими значениями модуля упругости, особенно при повышенных температурах. В этом случае очень важно оценить максимальные напряжения и прогибы для каждой рассматриваемой конструкции, поскольку нагрузки могут быть очень большими, а разрушение изделия может привести к человеческим травмам. Обязательно необходимо учесть ползучесть материала, поскольку у этого изделия должен быть длительный срок службы (более 10 лет). Анализ каждой предлагаемой конструкции дает конструктору информацию, на основе которой может быть сделан выбор.

«Доски» или элементы сиденья для этого изделия могут быть изготовлены с использованием различных способов переработки пластмасс, например, литья под давлением, литья под давлением с газом, литья со вспениванием, экструзии, раздувного формования. Для досок парковых скамеек может быть выбрано несколько вариантов поперечных сечений:

- сплошной прямоугольный профиль;
- пустотелый прямоугольный профиль;
- профиль с ребрами (ребра расположены на внутренних поверхностях изделия);
- профиль из вспененного материала.

В этом примере оцениваются различные варианты сечения балок, которые показаны на рис. 4.41. Каждое из этих поперечных сечений имеет ширину 6,0 дюймов и общую толщину 1,50 дюйма.

Хотя сплошной профиль имеет самую простую форму, он не является эффективной конструкцией, поскольку большое количество материала расположено близко к нейтральной оси. Этот материал используется «впустую», так как не вносит существенного вклада в жесткость балки.

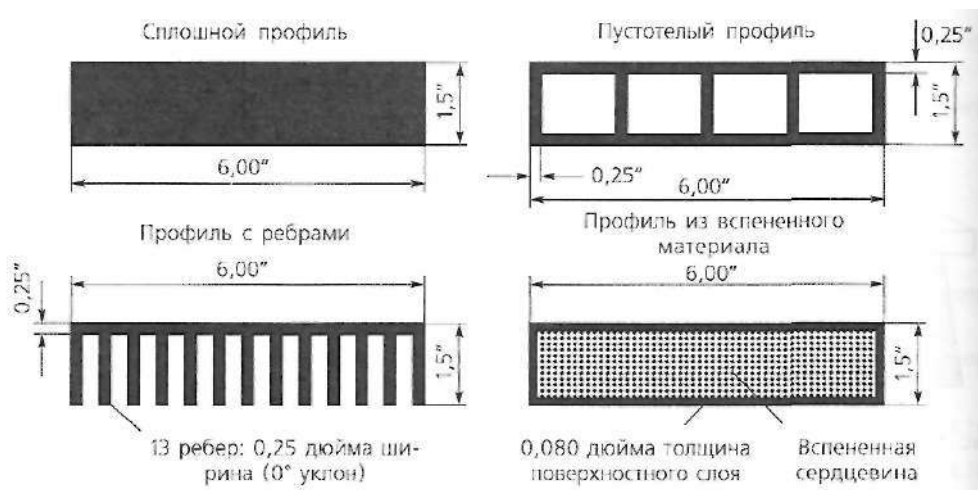


Рис. 4.41. Альтернативные варианты профилей балок для элементов сиденья: сплошной профиль, пустотелый профиль, профиль с ребрами и профиль из вспененного материала

Кроме того, сплошное изделие будет тяжелее, для него надо будет использовать больше материала, а также время производства сплошного толстого изделия и его охлаждения будет весьма большим. Каждый из трех других рассматриваемых вариантов уменьшает количество используемого материала, а в случае ребристого или пустотелого профилей достигается значительное сокращение цикла производства из-за существенного уменьшения времени, необходимого на охлаждение относительно тонких стенок изделия.

Этот пример показывает, как могут быть рассчитаны напряжения и прогибы, связанные с каждым из предлагаемых поперечных сечений «доски» скамейки. Парковая скамейка состоит из определенного числа компонентов, к которым относятся: ножки/опоры досок, доски для сиденья, доски для спинки и крепеж. Каждый из этих компонентов имеет свои функциональные и структурные требования. Здесь мы рассмотрим только горизонтальные элементы для сиденья. Разумно предположить, что максимальные напряжения и прогибы будут приходиться на две доски сиденья, что является следствием ожидаемых эксплуатационных нагрузок.

Элементы конструкции, которые показаны на рис. 4.41, представляют собой наполненные иолиолефиновые изделия, имеющие постоянное сечение (балки) и две точки опоры по всей длине. Каждый из элементов сиденья имеет общую ширину 6,0 дюймов и толщину 1,5 дюйма, а также общую длину 56 дюймов. Доски крепятся на жесткие бетонные опоры, расположенные на расстоянии 48 дюймов друг от друга. В этом примере задача состоит в том, чтобы определить напряжения и прогибы, возникающие при нагружении на участке между опорами (пролете).

До определения напряжений и прогибов на участке между опорами должны быть определены и заданы следующие параметры:

- условия и типы опор балок;
- условия приложения нагрузки;

- условия, связанные с окружающей средой;
- свойства материала.

Условия и типы опор балок

Каждый из двух горизонтальных элементов или балок, установленных на опоры скамейки, имеет участок (пролет длиной 48 дюймов), под которым нет опоры. Элементы конструкции сиденья будут зафиксированы на бетонных опорах с помощью крепежных болтов. Для ограничения локальных напряжений будут использованы стальные втулки, окружающие элементы крепежа. Реальные условия закрепления как правой, так и левой сторон досок можно будет охарактеризовать как «простые»¹, так и «фиксирующие»², что зависит от конкретного устройства крепления. При фиксированном состоянии (когда угол между нагруженной доской сиденья и горизонтальной плоскостью, проходящей через точки опоры, составляет 0 градусов), жесткость всей конструкции в собранном состоянии высока. В реальных условиях способ крепления балок является промежуточным вариантом между простым и фиксированным.

Для данной задачи будет рассматриваться доска с простыми опорами как с правой, так и с левой стороны. Но условия простого и фиксированного закрепления досок рассчитываются конструкторами реалистично, как наиболее общие, крайние случаи.

На рис. 4.42 [9] показано, что прогиб и напряжения в середине балки меньше в случае фиксирующих опор, однако для этого случая закрепления необходимо определить напряжения в местах левой и правой опор.

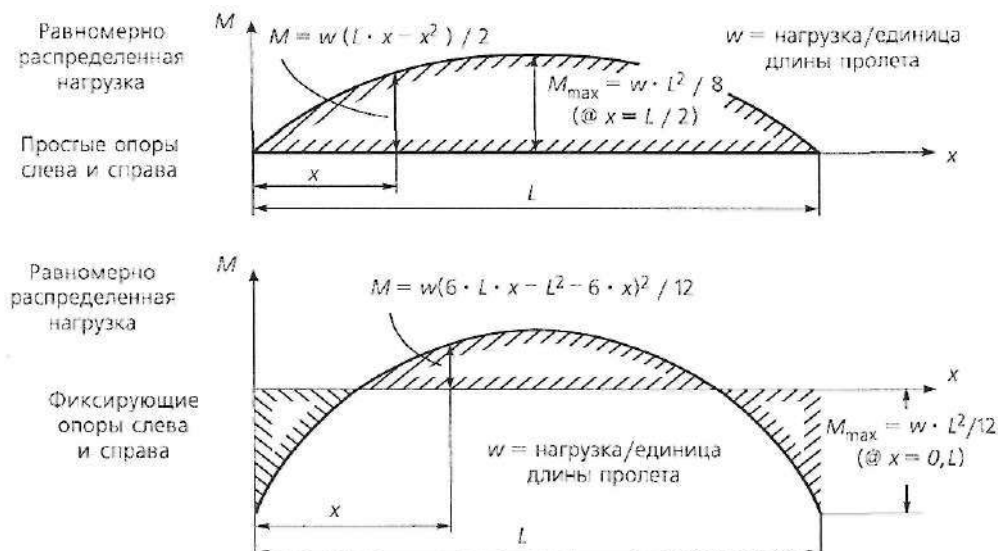


Рис. 4.42. Диаграммы изгибающих моментов для равномерно нагруженных балок с простыми опорами (вверху) и фиксирующими опорами (внизу).

¹ Шарирно-подвижные. — Примеч. науч. ред.

- Жесткое закрепление (заделка). — Примеч. науч. ред.

Условия приложения нагрузки

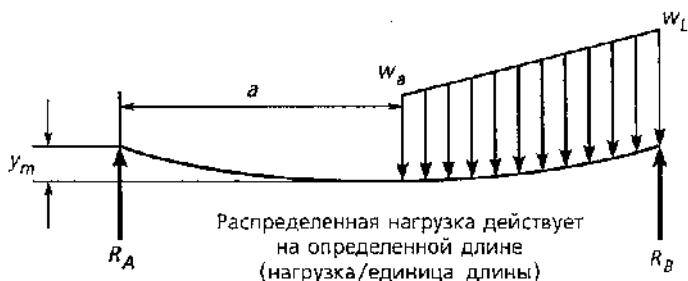
Поскольку не всегда удастся точно определить условия нагружения изделия, рассматривается несколько возможных вариантов нагрузки. Скамейка должна иметь конструкцию, способную выдерживать вес нескольких сидящих на ней взрослых людей. Скамейка будет периодически находиться в нагруженном и ненагруженном состояниях, длительности которых будут зависеть от количества людей, гуляющих в определенное время в парковой зоне. Такие нагрузки можно описать как переменные, а не усталостные, поскольку частота перехода из нагруженного состояния в ненагруженное очень низка (возможно, достигает нескольких раз в день). Нагрузка носит статический характер, но могут наблюдаться динамические воздействия, которые также следует учесть. Скамейка может находиться в нагруженном состоянии в течение минут или часов, но не следует ожидать непрерывного нагружения в течение целого дня. Вес самих элементов сиденья также следует учитывать, так как изделие имеет относительно большие размеры и предполагается, что оно будет эксплуатироваться в течение длительного срока (в данном случае — годы), поэтому будет наблюдаться ползучесть материала под действием своего собственного веса.

В нашем примере предполагается, что двое взрослых людей со средним весом 220 фунтов каждый (90 кг) будут сидеть на скамейке (между опорами) по 8 ч в день. I Эту нагрузку можно считать как сконцентрированной в одной точке (точечного типа), так и распределенной нагрузкой. Здесь условиями нагружения считается вес двух человек, распределенный по ширине только одной доски в течение 8 ч. Может быть также учтено воздействие случайных нагрузок, которые возникают при неправильной эксплуатации изделия (коэффициент запаса прочности).

Предполагается, что полное восстановление прогиба, связанного с периодическими нагрузками, происходит в течение ночи (во время «отдыха»). Кроме того, величина продолжительной равномерно распределенной нагрузки из-за собственного веса изделия должна быть определена из геометрической формы балки и плотности материала. Прогибы и напряжения, возникающие при приложении периодических внешних нагрузок, накладываются на продолжительную равномерно распределенную нагрузку, вызванную собственным весом изделия.

Сочетание условий закрепления (простая опора слева и справа) и условий нагружения как внешней нагрузкой, так и собственным весом балки (обе нагрузки считаются равномерно распределенными) определяют соответствующие расчетные уравнения [2]. Уравнения для балок с частично распределенными нагрузками и простыми опорами слева и справа приведены на рис. 4.43.

На рис. 4.43: M_A и M_B — изгибающие моменты на левой и правой опорах соответственно; θ_d и θ_b — угловые перемещения на опорах; y — величины прогибов на левой (A) и правой (B) опорах соответственно (в данном случае прогиб равен 0); L — длина балки между опорами; w — значения интенсивности распределенной нагрузки в точках a и b соответственно; R — значения вертикальной реакции на левой и правой опорах; J — осевой момент инерции относительно центральной оси поперечного сечения балки, перпендикулярной направлению приложенной нагрузки (относительно нейтральной оси); E — модуль упругости материала, из которого изготовлена балка. Заметим, что в данном случае должна быть учтена зависимость величины модуля упругости от



Предельные условия: распределенная нагрузка, действующая на определенной длине, простые опоры слева и справа

$$R_A = \{ (w_a / 2 \cdot L) (L - a)^2 + ((w_L - w_a) / 6 \cdot L) (L - a)^2 \} \quad \text{при } M_A = 0; y_A = 0$$

$$\Theta_A = [- (w_a / 24 \cdot E \cdot I \cdot L) (L - a)^2 (L^2 + 2 \cdot a \cdot L - a^2) - \\ - ((w_L - w_a) / 360 \cdot E \cdot I \cdot L) (L - a)^2 (7 \cdot L^2 + 6 \cdot a \cdot L - 3 \cdot a^2)]$$

$$R_B = \{ (w_a + w_L) / 2 \} (L - a) - R_A \quad \text{при } M_B = 0; y_B = 0$$

$$\Theta_B = [(w_a / 24 \cdot E \cdot I \cdot L) (L^2 - a^2)^2 + ((w_L - w_a) / 360 \cdot E \cdot I \cdot L) (L - a)^2 (8 \cdot L^2 + 9 \cdot a \cdot L - 3 \cdot a^2)]$$

если $a = 0$ и $w_a = w_L = w$ (равномерно распределенная нагрузка), тогда

$$y_{\max} = (-5 \cdot w \cdot L^4) / (384 \cdot E \cdot I) \quad \text{при } x = L / 2$$

$$M_{\max} = (w \cdot L^2) / (8) \quad \text{при } x = L / 2$$

Рис. 4.43. Классические уравнения, описывающие изгиб балки, закрепленной на простых опорах, и нагруженной на определенной длине распределенной нагрузкой

времени, температуры, напряжения. В случае равномерного распределения нагрузки по всему пролету $w_a = w$ и $w_L = w$ при $a = 0$. Для этого специального случая уравнение для максимального прогиба в середине пролета (при $x = L/2$) приведено в [2]:

$$y_m = (-5 \cdot w \cdot L^4) / (384 \cdot E \cdot I). \quad (4.21)$$

Максимальный изгибающий момент M_m возникает также в середине пролета (при $x = L/2$) и определяется уравнением:

$$M_{\max} = (w \cdot L^2) / (8). \quad (4.22)$$

которое может быть использовано совместно с уравнением (4.7) для оценки значения максимального напряжения при изгибе.

Окружающая среда в условиях эксплуатации

Скамейка представляет собой изделие, которое используется вне помещения круглогодично. Это изделие используется в естественных климатических условиях и поэтому подвергается воздействию температуры и влажности, а также воздействию других погодных условий. Скамейка может также подвергаться воздействию различных очистителей в соответствии с требованиями по техническому обслуживанию.

Как и у большинства пластмасс, свойства полиофелинов существенно зависят от температуры. Ударные характеристики сиденья скамейки будут ухудшаться при снижении температуры. При высоких температурах уменьшается прочность полимера. Эффекты долговременного воздействия погодных условий также играют важную роль при использовании изделий в таких долгосрочных применениях и должны быть учтены, поскольку свойства материала значительно меняются за 10 лет. В качестве максимальной возможной температуры эксплуатации следует считать 37°C.

Свойства материала

Формулы для оценки напряжения и прогиба балки (уравнения (4.7), (4.21) и (4.22)) были получены исходя из предположения, что используемый материал является упругим, однородным и изотропным. В действительности используемые пластмассы обладают некоторой анизотропией и нелинейной зависимостью напряжения от деформации. Пластмассовые доски скамейки служат длительное время, поэтому при расчетах должна быть учтена ползучесть материала. Соответствующий модуль ползучести¹ (при данной температуре/относительной влажности/времени/напряжении) используется вместо значения модуля упругости в уравнении (4.21). Восстановление размеров после нагружения считается полным за 8 ч, но сведения по восстановлению после ползучести все-таки должны учитываться более точно, так как позволяют прогнозировать искривление балок при длительной эксплуатации.

Если полное восстановление между нагрузками не происходит, общий прогиб рассчитывается на основе данных о характеристиках материала и режиме нагружения. При отсутствии информации по восстановлению конструктор должен ввести в расчеты предположение о максимально возможной эксплуатационной нагрузке, удовлетворяющее самым высоким нормам безопасности.

Уравнения, позволяющие рассчитать величины прогибов и напряжений, были получены исходя из предположения о равенстве модулей сжатия и растяжения для данного материала. Ползучесть полимера в условиях одноосного растяжения и одноосного сжатия определяется в том случае, если между ними есть существенная разница. Если значения модулей в соответствующий момент времени существенно отличаются, следует брать меньшее из этих двух значений или использовать метод эквивалентного сечения, который учитывает разность коэффициентов. В большинстве случаев в расчетах при изгибе используются данные модуля ползучести.

У пластмассовой доски скамейки прогиб и напряжения возникают как из-за веса самой балки, так и из-за внешней нагрузки. Максимальные прогибы из-за веса балки будут наблюдаться по прошествии большого промежутка времени, например, в конце срока эксплуатации. Для расчета прогиба должен использоваться модуль ползучести, который определяется при соответствующих значениях напряжения, времени и температуры. Как правило, это значение определяется аппроксимацией кривых ползучести на длительные времена и не учитывает долгосрочных эффектов, возникающих из-за старения и погодных условий, а также возможности разрушения из-за ползучести.

Значение модуля ползучести при изгибе полимерного материала может быть определено из зависимостей модулей ползучести от логарифма времени (при соответствующей температуре), которые приведены на рис. 4.44. С помощью кривой на рис. 4.44, а.

¹ Эту величину принято называть релаксационным модулем. — *Примеч. науч. ред.*

определяем, что модуль ползучести через 8 ч непрерывной нагрузки (при 37 °С) имеет значение $3,0 \times 10^5$ фунтов/дюйм². А значение модуля через 10 лет нагрузки будет $2,5 \times 10^5$ фунтов/дюйм². Величина модуля ползучести через 8 ч используется для определения прогиба элемента сидения под действием внешней нагрузки (в конце дня),

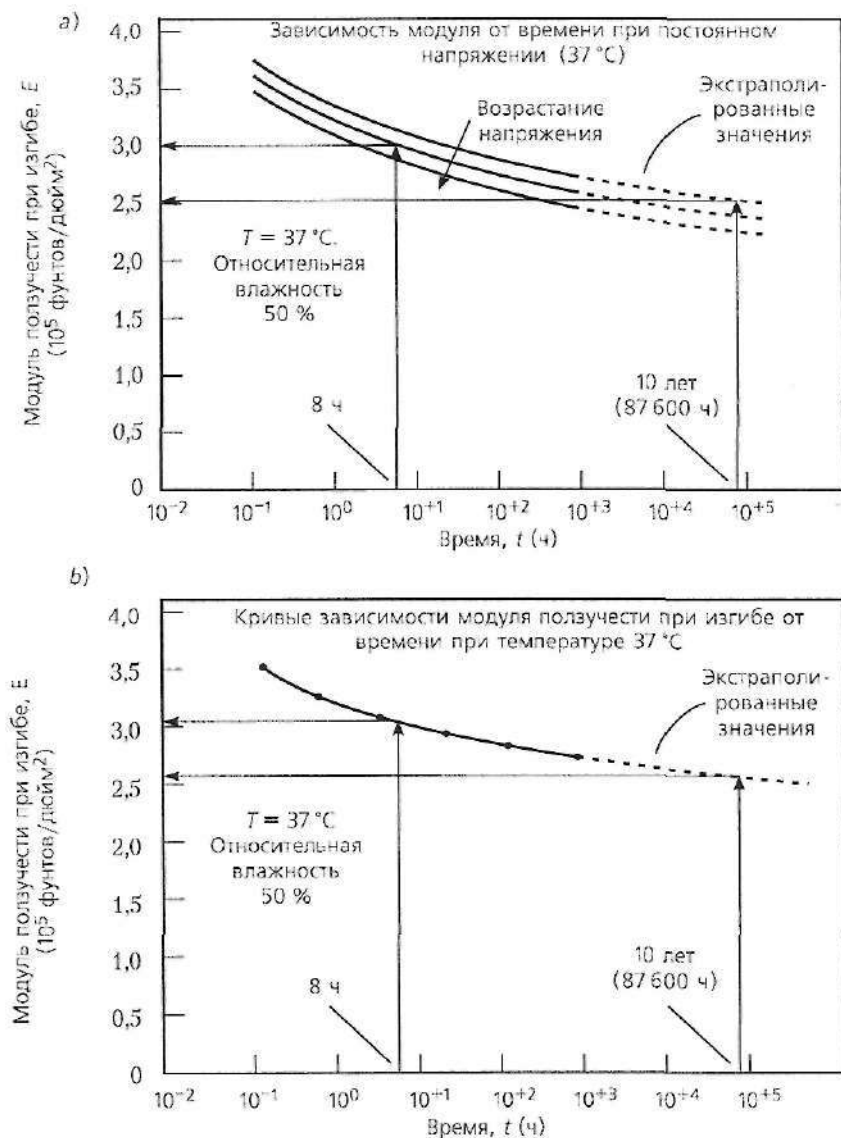


Рис. 4.44. Зависимость модуля ползучести при изгибе от логарифма времени для иолиолефина, используемого для изготовления элементов сиденья скамейки: а — модуль зависит от напряжения; б — модуль не зависит от уровня напряжения

а значение этого модуля через 10 лет используется для определения ползучести, вызванной собственным весом балки. Значения модуля ползучести, приведенные на рис. 4.44, *b*, независимы от уровня напряжения. Значения модуля ползучести при различных временах и нагрузках более точно определяются при помощи набора зависимостей ползучести от напряжения, подобным приведенным на рис. 4.44, *a*.

Пример 4.5. Расчет прогибов и напряжений для элементов сидения различных профилей - Балки

В следующих разделах приведены расчеты напряжений и прогибов, возникающих вследствие действия как внешней нагрузки (вес людей, сидящих на скамейке), так и нагрузки, вызванной собственным весом балки, для четырех вариантов предполагаемых конструкций (поперечных сечений), показанных на рис. 4.45.

Осевой момент инерции относительно нейтральной оси. Осевой момент инерции должен быть определен для каждого сечения. Предположим, что балки изготовлены из изотропного однородного материала и имеют сплошной и пустотелый профиль (рис. 4.41 и 4.45). Оба эти профиля симметричны относительно нейтральной оси. Расположение нейтральной оси без труда можно определить как ось симметрии для этих двух геометрических форм. Профиль с ребрами, показанный на рис. 4.45, является однородным, но не осесимметричным и расположение нейтральной оси в этом случае определяется с помощью уравнения (4.18). Тринадцать отдельных ребер можно для простоты заменить одним широким ребром, так как на чертеже ребер не указан угол уклона.

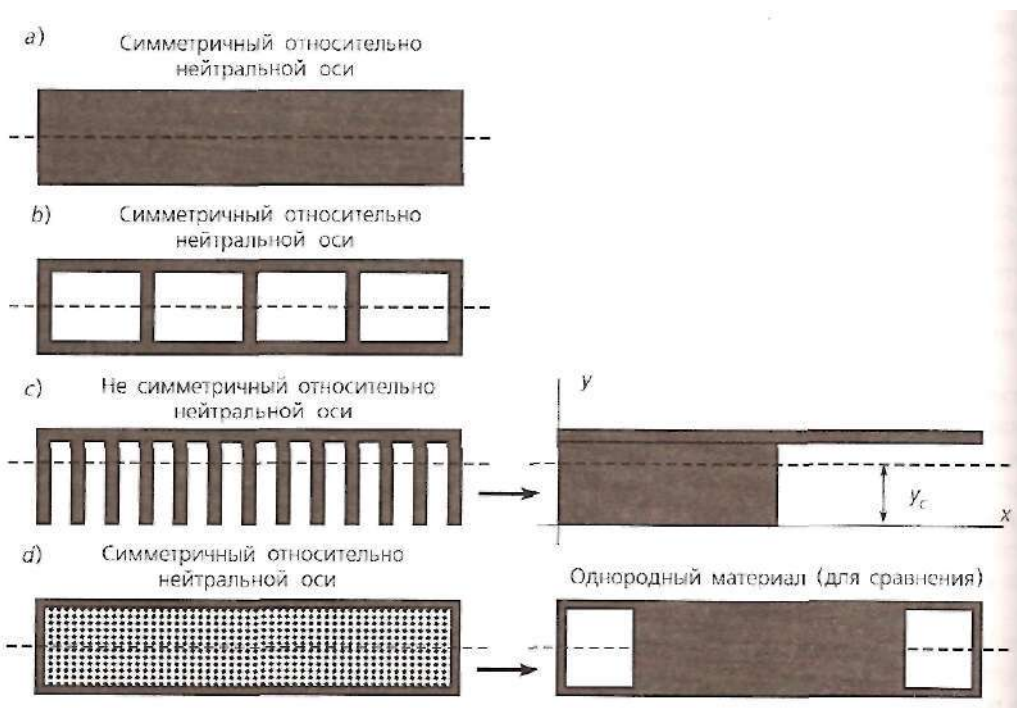


Рис. 4.45. Различные варианты профилей балок сиденья: сплошной прямоугольный профиль, пустотелый профиль, профиль с ребрами и профиль из вспененного материала

Профиль из вспененного материала (рис. 4.45) является симметричным, но не однородным. Расчет на изгиб изделий из вспененных материалов может быть сделан с помощью объемного модуля упругости.

При расчете осевого момента инерции предполагается, что изделие является сплошным и однородным при расчете момента инерции, а значение объемного модуля упругости используется для расчетов прогиба. Изделия из вспененного материала не являются однородными и могут быть представлены в виде набора слоев. Если механические свойства и толщины отдельных слоев известны, то с помощью метода эквивалентного сечения, описанного в разделе 4.4.4, может быть определен осевой момент инерции такого изделия.

Толщина сплошного однородного поверхностного слоя такого изделия составляет 0,080 дюйма, модуль ползучести при изгибе материала вспененного слоя (сердцевины) составляет примерно две трети от величины модуля ползучести при изгибе материала на поверхности (200 000 фунтов/дюйм² для вспененного материала по сравнению со значением 300 000 фунтов/дюйм² для сплошного поверхностного слоя). Материал поверхностного слоя используется в качестве базового для расчета эквивалентной балки. Значения момента инерции относительно нейтральной оси для каждого поперечного сечения всех четырех элементов сиденья скамейки приведены на рис. 4.47.

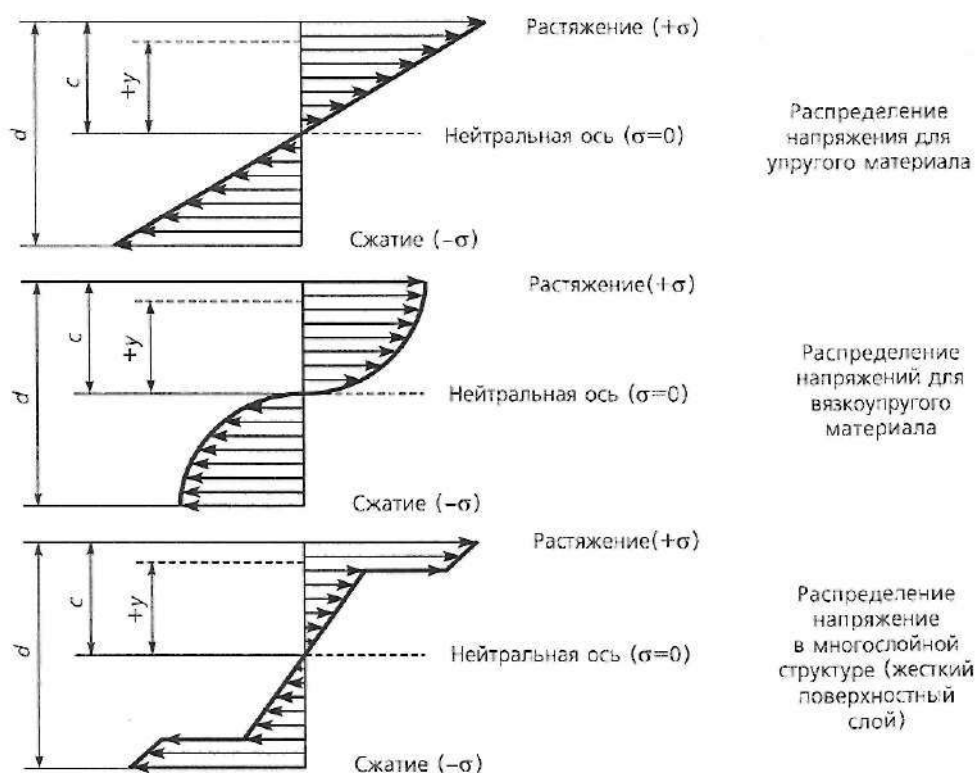


Рис. 4.46. Распределение напряжений по толщине балок, подверженных изгибающим нагрузкам. Вверху: линейный упругий материал. В середине: вязкоупругий материал. Внизу: вспененный материал (*поверхностного слоя > Сердцевины)

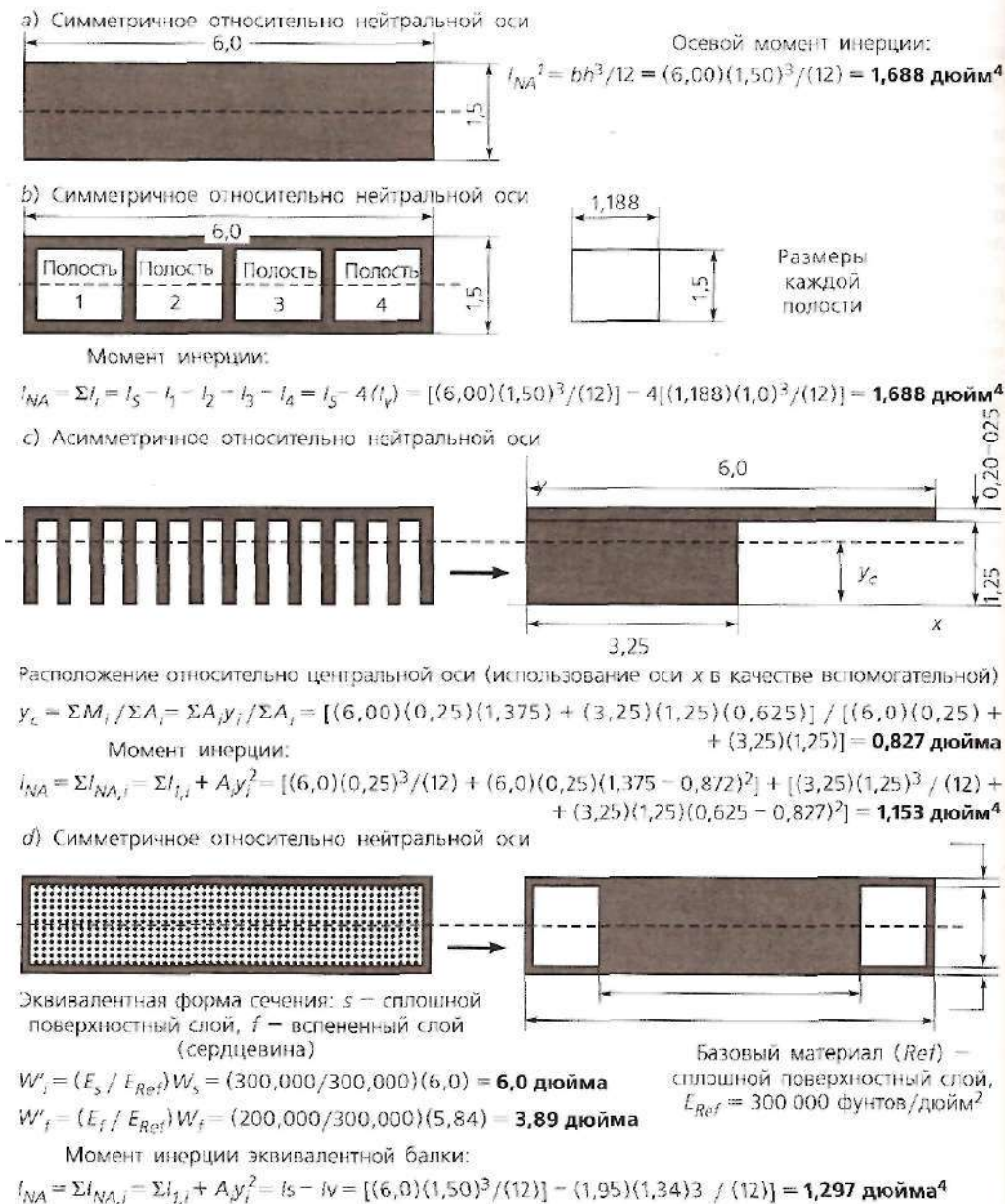


Рис. 4.47. Расчет моментов инерции различных вариантов поперечных сечений доски скамейки: сплошной прямоугольный профиль, пустотелый профиль, профиль с ребрами и профиль из вспененного материала

NA — обозначение нейтральной оси. — Примеч. науч. ред.

Нагрузки

Внешняя равномерно распределенная нагрузка¹ w_e , возникающая под действием общего веса двух взрослых, сидящих на одной доске пролета балки длиной L , будет равна:

$$w_e = W_e / L = (2)(220 \text{ фунтов}) / (48 \text{ дюймов}) = 9,17 \text{ фунтов/дюймов.} \quad (4.23)$$

Внешняя нагрузка является общей для всех предлагаемых конструкций балок. Но равномерно распределенная нагрузка, w , возникающая из-за собственного веса элемента сидения W действующая по всей длине пролета/, будет изменяться в зависимости от конкретной конструкции элемента. Эти значения нагрузки определяются с помощью уравнения (4.24) и приведены на рис. 4.48 для каждого из четырех сечений различной геометрической формы. Удельный вес SG полиолефина с наполнителем составляет 1,40, а уменьшение номинальной плотности элемента сидения из вспененного материала составляет 20 %.

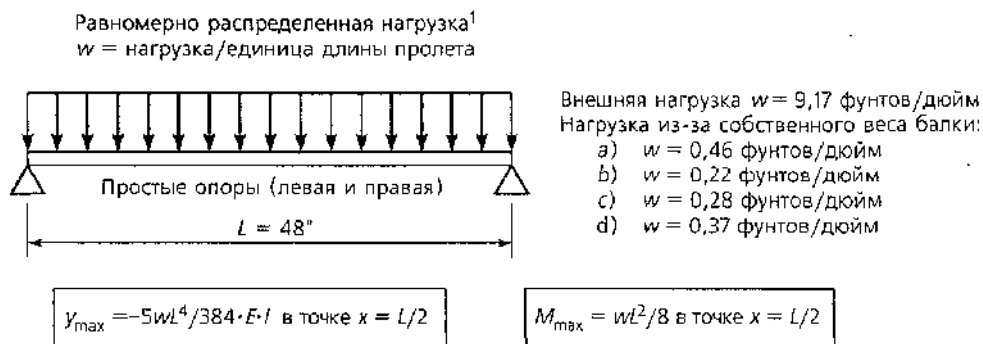


Рис. 4.48. Равномерно распределенные нагрузки, возникающие за счет собственного веса балки для четырех вариантов сечения

Расчет равномерно распределенной нагрузки, возникающей из-за собственного веса балки, имеющей объем между опорами 1/может быть выполнен следующим образом:

$$w_i = W_i / L = SG \cdot w \cdot V / L; \quad (4.24)$$

$$w_i (\text{сплошной}) = [(1,40)(0,036)(1,5)(6,0)(48)] / (48) = 0,46 \text{ фунтов/дюйм.}$$

Расчеты максимального прогиба

Максимальный прогиб в середине пролета балки измеряется после 8-ч нагружения, когда ползучесть, вызванная весом самого изделия, становится существенным фактором. Предполагая, что используются простые опоры и равномерное распределение нагрузки, создаваемой весом балки, максимальное суммарное отклонение может быть

¹ Точнее употребить термин «интенсивность распределенной нагрузки» — *Примеч. науч. ред.*

определено суммированием отдельных прогибов, рассчитанных с помощью уравнения (4.21). Приведен расчет прогиба балки со сплошным сечением, а результаты расчетов для всех четырех сечений различной геометрической формы приведены на рис. 4.49:

$$y_{m,T} = y_{m,e} + y_{m,i} \quad (4.25)$$

$$y_{m,e} = (-5)(9,2)(48^4) / (384)(300,000)(1,69) = -1,250 \text{ дюйма}; \quad (4.21)$$

$$y_{m,i} = (-5)(0,46)(48^4) / (384)(200,000)(1,69) = -0,075 \text{ дюйма}; \quad (4.21)$$

$$y_{m,T} = (-1,250 \text{ дюйма}) + (-0,075 \text{ дюйма}) = -1,325 \text{ дюйма}. \quad (4.25)$$

На рис. 4.49 приведены значения максимальных напряжений при растяжении и при сжатии для каждого сечения. Максимальные растягивающие и сжимающие напряжения (при условии простых опор и равномерного распределения нагрузки) возникают на внешних поверхностях сечения балки, расположенного в центре, где максимальное значение имеет изгибающий момент в точках на поверхности максимально удалены от нейтральной оси ($y = \pm e$). Максимальный изгибающий момент возникает в середине пролета (при $x = l/2$) (рис. 4.42) и определяется уравнением:

$$M_m = (w \cdot L^2) / (8). \quad (4.22)$$

Это значение может быть использовано в уравнении (4.7) для оценки максимальных значений напряжения. Суммарное напряжение из-за совместного действия внешней нагрузки и собственного веса балки может быть получено методом суперпозиции. В качестве примера рассмотрим как определяются максимальные значения напряжения для балки, имеющей сечение из однородного материала.

$$\sigma_{m,T} = \sigma_{m,e} + \sigma_{m,i} = [(w_e \cdot L^2) / (8)] \cdot c / I + [(w_i \cdot L^2) / (8)] \cdot c / I; \quad (4.26)$$

$$\sigma_{m,e} = [(9,2 \cdot 48^2) / (8)](0,75) / (1,69) = 1170 \text{ фунт/дюйм}^2;$$

$$\sigma_{m,i} = [(0,46 \cdot 48^2) / (8)](0,75) / (1,69) = 58,6 \text{ фунт/дюйм}^2;$$

$$\sigma_{m,T} = 1239 \text{ фунт/дюйм}^2.$$

Суммарное напряжение при максимальном растяжении из-за совместного воздействия нагрузок составляет 1239 фунтов/дюйм², а суммарное напряжение сжатия -1230 фунтов/дюйм² (абсолютные значения совпадают вследствие симметричности). Эти максимальные значения напряжений следует сравнить с допустимыми значениями напряжения материала, которые будут использоваться при изготовлении изделия. Результаты расчетов всех вариантов сечений приведены на рис. 4.49.

Поперечное сечение из однородного материала

У изделия, имеющего сплошное поперечное сечение, возникают наименьшие (по сравнению с другими профилями) значения прогиба и максимальных растягивающих и сжимающих напряжений. Однако стоимость материала и изготовления такого изделия довольно велика.

Геометрическая форма балки	Момент инерции, дюйм ⁴	Вес на единицу длины, фунт/дюйм	Расстояние от нейтральной оси до нижней поверхности, -C, дюйм	Расстояние от нейтральной оси до верхней поверхности, + C, дюйм	Суммарное напряжение растяжения σ_T , фунт/дюйм ²	Суммарное напряжение сжатия σ_C , фунт/дюйм ²
	1,69	0,46	0,75	0,75	1230	1230
	1,29	0,22	0,75	0,75	1570	1570
	1,15	0,28	0,83	0,67	1950	1590
	1,30	0,37	0,75	0,75	1590	1590

Геометрическая форма балки	U_{max} под действием внешней нагрузки, дюйм	U_{max} под действием собственного веса изделия, дюйм	U_{max} суммарное, дюймы	Увеличение прогиба, %	Экономия материала, %	Увеличение растягивающего напряжения, %
	-1,25	-0,075	-1,325	Эталонное значение	Эталонное значение	Эталонное значение
	-1,63	-0,046	-1,676	+26	-53	+28
	-1,83	-0,043	-1,873	+41	-38	+59
	-1,63	-0,062	-1,692	+28	-20	+29

Рис. 4.49. Значения максимальных напряжений и максимальных прогибов для балок: сплошной, пустотелой, с ребрами и из вспененного материала, и формы профилей элементов для сидения парковой скамейки

Пустотелое сечение

По сравнению с конструкцией со сплошным сечением, конструкция с пустотелым сечением позволяет добиться экономии материала более чем на 50 %, но приводит к возрастанию максимального прогиба на 26 %. Максимальные напряжения растяжения и сжатия на 28% больше, чем для сечения из сплошного материала. Изделие такого типа трудно изготовить с использованием только одного впрыска, если использовать традиционную технологию литья под давлением. Но это изделие может быть изготовлено с помощью сварки двух отлитых изделий вместе (для образования полостей в сечении). Изделия, имеющие имеют аналогичную конструкцию поперечного сечения, могли бы быть получены с использованием литья под давлением с газом.

Пустотелое изделие может быть изготовлено экструзией непрерывного профиля, но при этом на торцах изделия нужны «колпачки», которые бы улучшили внешний вид изделия. Также такое изделие может быть изготовлено раздувным формованием.

Сечение с ребрами

Балка с ребрами (по сравнению с конструкцией со сплошным сечением) позволяет добиться экономии материалов более чем на 38 %, но приводит к возрастанию максимального прогиба на 41 %. Прогиб может быть уменьшен за счет увеличения количества ребер и изменения их конструкции. В то время как сжимающие напряжения для этой конструкции лишь ненамного выше тех, которые наблюдаются в изделиях со сплошным сечением, максимальные значения растягивающих напряжений увеличиваются значительно — на 59 %. К основным преимуществам данной конструкции относится возможность легко производить изделие по традиционной технологии литья под давлением, используя только один впрыск. При этом в изделии нет поднутрений, стенки относительно тонкие, а крышки для установки на торцах могут быть отлиты вместе с изделием. Конструкция ребра должна способствовать правильному распространению потока расплава в процессе впрыска и предотвращать появление утяжин. Готовое изделие должно обладать необходимым сопротивлением прогибу, чтобы величина напряжения при максимальной нагрузке не превышала допустимых значений.

Сечение со вспененным слоем

Свойства изделия из вспененной пластмассы зависят от плотности материала, структуры пор и соотношения поверхностного и базового материалов. Прогиб изделий из вспененных материалов больше, чем у аналогов из однородного материала, значения напряжений на внешней поверхности также выше. Преимущество этой конструкции заключается в экономии материала и также с практическим отсутствием проблем, связанных с утяжинами и усадочными напряжениями. Качество поверхности зависит от способа изготовления изделия. Стандартный способ получения изделий литьем при низком давлении прост, дешев, но поверхность изделия, полученного таким способом, имеет внешний вид древесной структуры.

Каждая из предлагаемых четырех конструкций балок имеет свои преимущества и недостатки. Расход материала, факторы, связанные с дополнительной обработкой, прогибы и напряжения, присущие каждой конструкции, могут быть оценены и сбалансированы для того, чтобы добиться оптимальной конструкции. Во многих случаях такие параметры, как осевой момент инерции, деленный на площадь поперечного сечения, достаточно хорошо характеризует способность конструкции сопротивляться изгибающим нагрузкам. Величина отношения I/A (момент инерции, деленный на площадь поперечного сечения) для балки со сплошным сечением равна $0,188$ (дюйм²/дюйм³), а величина I/A для пустотелой конструкции существенно больше и составляет $0,304$. Действительно, изделие из однородного материала имеет на 26 % большую жесткость, чем пустотелое изделие, но при этом расход материала увеличивается более, чем в два раза. Расход материала не является единственным критерием, поскольку должны быть учтены значения максимальных напряжений, распределение напряжений и различные факторы, связанные с изготовлением, сборкой и внешним видом изделия.

4.5. Плиты (пластины)

4.5.1. Общие положения

Довольно много пластмассовых изделий (или деталей) имеет геометрическую форму балок, но также много изделий имеют форму тонких плоских плит или пластин. В некоторых случаях изделия по своей структуре представляют собой пластину, но очень часто пластина является составной частью более сложной трехмерной отливки [1]. Например, верхняя часть корпуса компьютера, показанная на рис. 4.50, представляет собой элемент, края которого опираются на боковые стенки корпуса. Элементы в виде пластин этого типа обычно нагружены перпендикулярно плоскости пластины. В данном изделии конструктора интересует оценка напряжений, деформаций и прогибов, возникающих из-за эффектов совместного воздействия нагрузок. Существуют базовые процедуры, которые аналогичны использовавшимся при расчете балок. При расчете структуры пластмассовых изделий в форме пластины конструктор должен учитывать следующие факторы:

- геометрическую форму изделия;
- условия закрепления краев на опорах;
- условия нагружения;
- условия окружающей среды;
- механические свойства материала;
- факторы безопасности.

Могут быть получены приближенные решения этой задачи при условии упрощения геометрической формы, предельных состояний, режима нагрузки и поведения материала. Задачи, возникающие при описании таких элементов конструкции, не могут быть описаны с помощью классических уравнений. Необходимо использовать

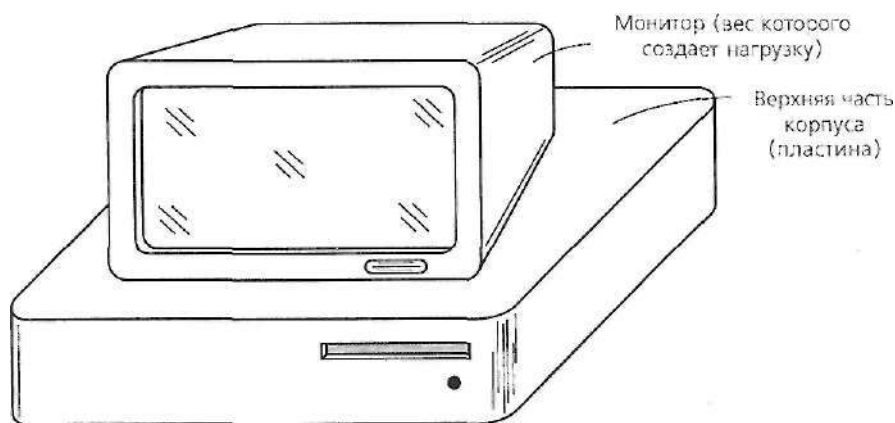


Рис. 4.50. Верхняя часть корпуса компьютера представляет собой элемент в виде пластины, который должен выдерживать нагрузку, создаваемую монитором

метод конечных элементов в линейном или нелинейном вариантах [1]. Рассмотрение этих методов выходит за рамки материала, предлагаемого в данной работе, но принципы, которые лежат в основе базовых расчетных формул для определения напряжений и деформаций, ниже будут рассмотрены.

Расчетные формулы для определения напряжений и прогибов элементов в форме пластин можно найти в различных источниках [1,21]. Эти формулы могут быть использованы для пластин, подвергающихся воздействию нагрузки, направленной перпендикулярно их плоскости, как в случае с корпусом, приведенном на рис. 4.50. Их также можно применить в случаях, когда нагрузки (растягивающие или сжимающие) действуют в плоскости пластины. Расчетные формулы для пластины под нагрузкой, действующей в направлении, перпендикулярном плоскости пластины, могут быть получены при наличии следующих предположений [2]:

- пластина является плоской;
- пластина имеет равномерную толщину;
- пластина изготовлена из однородного и изотропного материала;
- толщина пластины не должна быть более чем $1/4$ минимального поперечного размера;
- максимальный прогиб пластины не может быть по величине более $1/2$ ее толщины;
- все силы, как внешние нагрузки, так и силы реакции опор направлены перпендикулярно к плоскости пластины;
- пластина нагружена в зоне упругих деформаций.

4.5.2. Задачи, возникающие в пластинах

Пример 4.6. Прогиб круглой пластины

Емкость, полученная литьем под давлением (рис. 4.51), представляет собой хозяйственное ведро для воды, т. е. цилиндр с наклонными боковыми поверхностями (у которого один из торцов закрыт).

Дно емкости имеет форму круга, который отлит вместе с боковыми цилиндрическими стенками. Боковые стенки емкости продлены ниже плоского дна для обеспечения большей

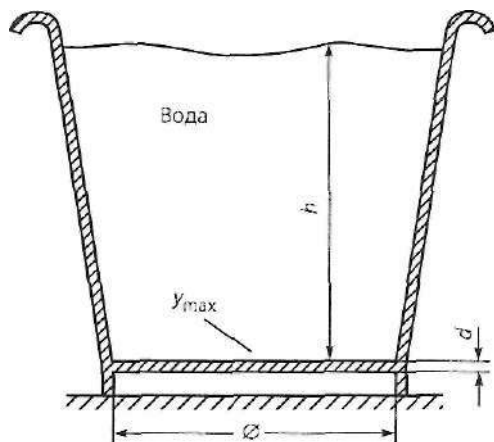


Рис. 4.51. Дно отлитой емкости представляет собой круглый плоский элемент, который находится под действием равномерно распределенной нагрузки (гидростатическое давление)

устойчивости изделия. Когда ведро заполняется водой, то дно (пластина) будет прогибаться под действием веса воды и в меньшей степени под действием собственного веса (в данном случае этой величиной мы пренебрегаем).

Прежде чем проводить оценки прогибов и напряжений, связанных с нагрузкой, должна быть определена геометрическая форма, способы закрепления краев, условия нагружения и свойства материала.

Геометрическая форма

Предполагается, что дно ведра представляет собой плоскую круглую пластину, диаметр которой составляет 10,0 дюймов, а толщина стенок, d , 0,125 дюйма. Эти данные полностью соответствуют критерию, что толщина пластины не превышает Y_4 минимального поперечного размера основания. Внутренняя глубина самого ведра равна, h , 11,0 дюймов.

Опора на краях

Опора па краях является фиксирующей, поскольку дно отлито вместе со стенками ведра и огибающая сторона, к которой прикреплено дно, ограничивает вертикальный прогиб стенок. Однако предполагается, что наличие фиксирующей опоры будет приводить к занижению значения прогиба пластины при расчете, поскольку велика вероятность того, что боковые стенки тоже будут прогибаться. Прогиб может быть рассчитан с помощью уравнения для простых опор на краях, но это будет приводить к завышению значения прогиба. Значение реального прогиба дна будет лежать между этими двумя значениями, причем ближе к расчету при фиксированном закреплении дна.

Условия приложения нагрузки

Нагрузка на дно емкости (предполагаем, что нагружение статическое) определяется действующим на него весом воды (создание гидростатического давления). Так как в емкости уровень воды выравнен, столб воды создаст равномерное давление по всей площади пластины.

Для конструкций, имеющих форму балки, интенсивность распределенной нагрузки описывается как суммарная нагрузка, W , деленная на длину пролета, L , и измеряется в единицах веса на единицу длины. Для структур, имеющих форму пластин, равномерная нагрузка¹, q , описывается, как суммарная нагрузка, деленная на площадь

Взаимосвязь между давлением и высотой столба для несжимаемых жидкостей

$$P_2 - P_1 = -\rho g (z_2 - z_1)$$

$$\Delta P = \omega h$$

ρ — плотность

g — ускорение свободного падения

ω — удельный вес

h — разность уровней

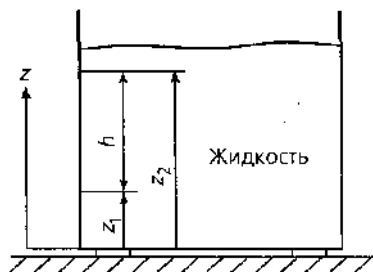


Рис. 4.52. Равномерно распределенная нагрузка, действующая на круглую пластину, определяется высотой столба жидкости и ее плотностью (гидростатическое давление)

¹ Точнее использовать термин «интенсивность равномерной нагрузки». — Примеч. науч. ред.

пластины, A , и измеряется в единицах нагрузки на единицу площади. В случае ведра для воды максимальная эксплуатационная нагрузка возникнет при условии, если ведро заполнено водой до краев ($Z_1 = 0$, $Z_2 = h$). Нагрузка определяется умножением общей глубины емкости на удельный вес воды, w . Давление (или равномерно распределенная нагрузка) в основании емкости определяется формулой:

$$q_{\max} = w \cdot h; \quad (4.27)$$

$$q_{\max} = (0,36 \text{ фунт/дюйм}^3)(11,0 \text{ дюйм}) = 0,396 \text{ фунт/дюйм}^2.$$

Равномерно распределенная нагрузка составляет $0,396 \text{ фунт/дюйм}^2$, когда емкость заполнена водой. На практике конструкторы должны учитывать потенциальную возможность возрастания нагрузки из-за динамических эффектов или динамической нагрузки при заполнении ведра веществом, имеющим высокую плотность, например, песком.

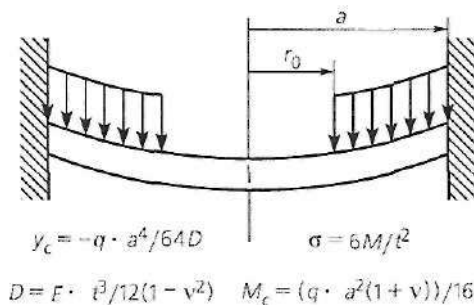
Свойства материала

Бедро отливается из ПП (гомополимера). Результирующий прогиб, вызванный гидростатической нагрузкой, будет обусловлен характером зависимости напряжения от деформации при температуре эксплуатации. Длительность действия нагрузки также следует учитывать из-за процессов ползучести, которые были описаны в разделах 4.3.5 и 4.4.5. Максимальный суммарный прогиб, связанный с гидростатической нагрузкой (вода) будет наблюдаться при повышенных температурах/увеличенной длительности действия нагрузки. Для данного случая соответствующий модуль ползучести составляет $250\,000 \text{ фунт/дюйм}^4$, а значение коэффициента Пуассона для ПП (то есть отношение поперечной к продольной деформации) составляет $0,35$.

Конструкторские формулы

Формулы для расчетов напряжений и прогибов должны быть выбраны для плоских круглых пластин, фиксированных по окружности, на которые действует равномерно распределенная нагрузка [2] (рис. 4.53).

Плоская круглая пластина, равномерно распределенная нагрузка, фиксирующие опоры



- q — равномерно распределенная нагрузка
- a — радиус
- r_0 — начало действия равномерно распределенной нагрузки
- t — толщина пластины
- ν — коэффициент Пуассона
- E — модуль упругости
- y_c — прогиб в центре пластины
- D — постоянная величина для данной пластины
- M — изгибающий момент
- M_c — изгибающий момент в центре
- σ — напряжение

Рис. 4.53. Классические формулы для расчета напряжений и прогибов круглой пластины с фиксированными краями, которая подвергается действию равномерно распределенной нагрузки

Вода распределена равномерно по всей площади пластины. В этом случае уравнение для максимального прогиба вниз (в центре) определяется уравнением:

$$y_c = -q \cdot a^4 / 64 \cdot D, \quad (4.28)$$

где!) — константа пластины; величина, которая аналогична значению жесткости ($E \cdot I$) для балки. После подстановки значения константы пластины в уравнение (4.28)

$$y_c = -3 \cdot q \cdot a^4 (1 - \nu^2) / 16 \cdot E \cdot t^3; \quad (4.29)$$

$$y_c = -[(3)(0,396)(5)^4(1 - 0,35^2)] / (16)(250,000)(0,125)^3;$$

$$y_c = -0,083 \text{ дюйма.}$$

Максимальные значения напряжения, связанные с этим прогибом, могут быть определены с помощью общего уравнения для плоских круглых пластин:

$$\sigma = 6M/t^2. \quad (4.30)$$

Единицы измерения радиального изгибающего момента — дюйм-фунт/дюйм по окружности, а единицы измерения тангенциального изгибающего момента дюйм-фунт/дюйм по радиусу. Момент в центре круглой пластины с фиксированными краями и равномерно распределенной нагрузкой составляет:

$$M_c = [q \cdot a^2(1 + \nu)] / 16. \quad (4.31)$$

Совместное решение уравнений (4.30) и (4.31) позволяет определить значение максимального напряжения в центре круглой пластины (растягивающие напряжения на нижней поверхности пластины и сжимающие напряжения на верхней поверхности пластины):

$$\sigma_c = [3 \cdot q \cdot a^2(1 + \nu)] / 8 \cdot t^2; \quad (4.32)$$

$$\sigma_c = [(3)(0,396)(5)^2(1 + 0,35)] / (8)(1,15)^2;$$

$$\sigma_c = 321 \text{ фунт/дюйм}^2.$$

Полученное значение напряжения необходимо сопоставить с допустимыми значениями напряжения для ПП, который используется для изготовления емкости. Должна быть учтена возможность возникновения волосяных трещин из-за воздействия реактивов/растворителей и концентрации напряжений в местах пересечения стенок. Такой метод расчета может быть использован для оценки напряжения и прогиба пластин, имеющих другие геометрические формы, условия закрепления, а также иной характер нагружения. Например, данные, которые приведены на рис. 4.54, могут быть использованы для оценки напряжения и прогиба в случае равномерно нагруженных пластин прямоугольной формы с фиксированными краями. Существуют формулы для большого количества различных изделий, в конструкции которых используются плоские пластины.

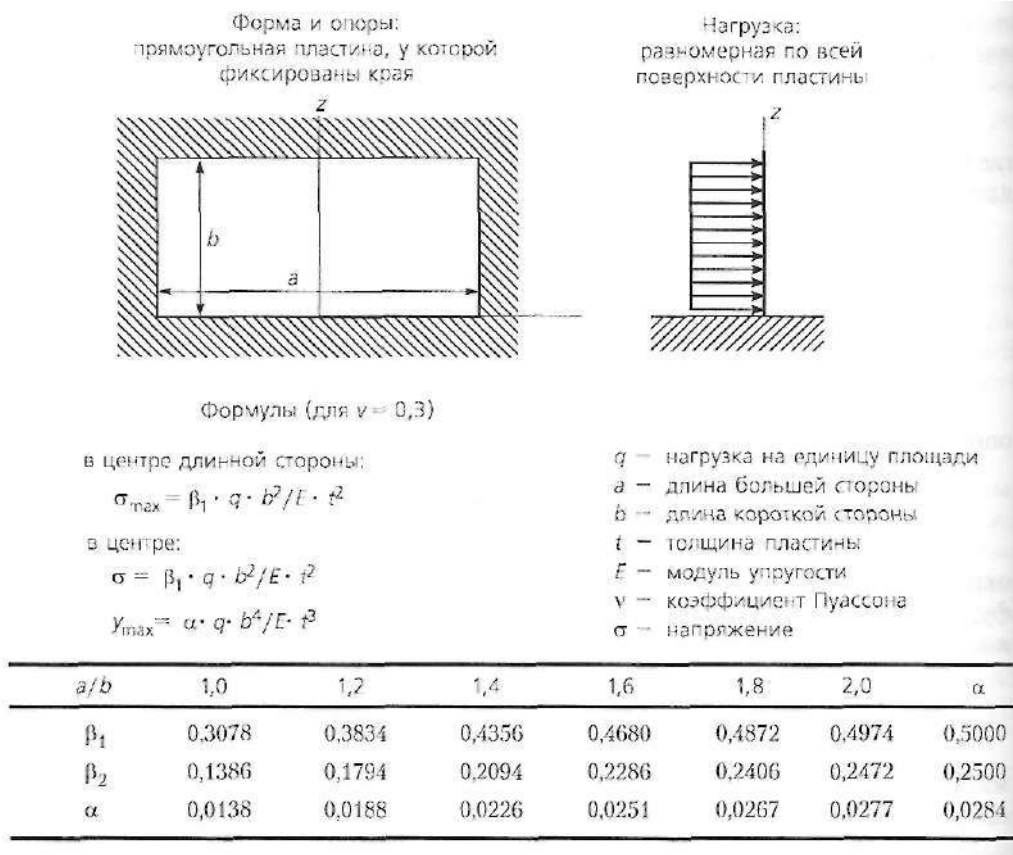


Рис. 4.54. Классические формулы, связывающие напряжение и прогиб у прямоугольных пластин с фиксированными краями под действием равномерно распределенной нагрузки

Пример 4.7. Лоток для бумаги

Другим изделием, содержащим элементы, имеющие форму пластин, является лоток для хранения бумаги (рис. 4.55). Лоток отлит из ПС общего назначения и представляет собой устройство для хранения писчей бумаги в офисах. Полка лотка представляет собой пластину прямоугольной формы, которая должна выдерживать одновременно и свой вес и вес лежащего груза.

Конструктор данного изделия должен уделять особое внимание оценке прогибов и напряжений, связанных с эксплуатационной нагрузкой (весом стопки писчей бумаги) по нескольким причинам. Во-первых, длина пролета (длина полки, под которой нет опор) вместе с передним краем без опоры относительно велика для тонкостенных пластмассовых изделий, поэтому следует ожидать значительных прогибов и напряжений. Во-вторых, изделие будет подвергаться нагрузке в течение длительного времени, поэтому следует учитывать эффекты ползучести. Срок службы изделия неограничен и время пребывания в нагруженном состоянии может составлять годы.

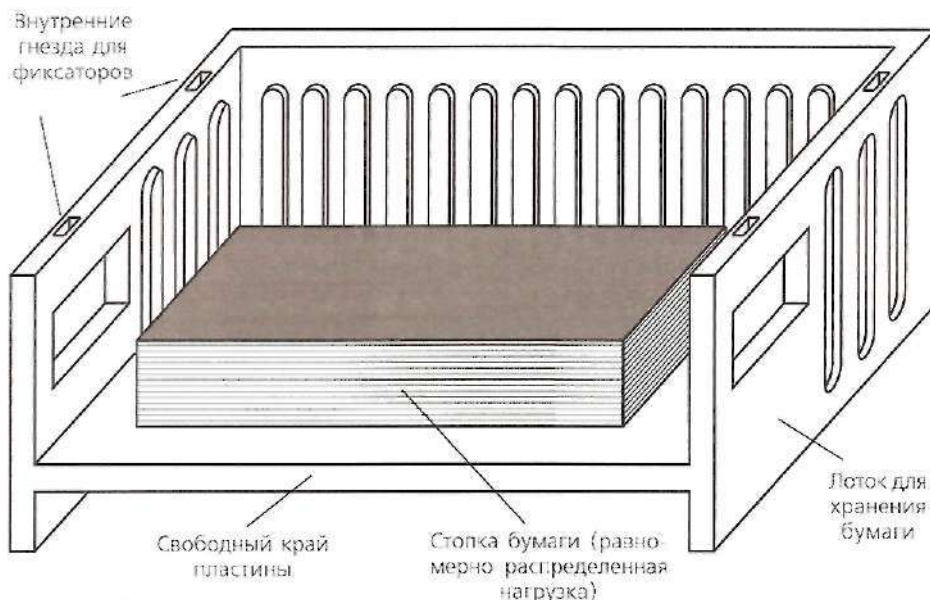


Рис. 4.55. Лоток для хранения стопки бумаги имеет несущий элемент в форме прямоугольной пластины

Перед расчетом напряжений и прогибов, связанных с эксплуатационной нагрузкой, необходимо определить геометрическую форму пластины, условия закрепления краев, режим нагружения и свойства материала.

Геометрическая форма

В нашем примере предполагается, что полка лотка представляет собой плоскую пластину прямоугольной формы, которая присоединена (вплавлена) к боковым сторонам и задней стенке лотка. Лоток сконструирован для того, чтобы выдерживать стопку бумаги шириной 8,5 дюймов и длиной 11,0 дюймов. Полка (пластина) должна иметь ширину 9,0 дюймов и длину 11,5 дюймов для обеспечения зазора между бумагой и стенками лотка. Плоская пластина равномерна по толщине, которая определяется величиной 0,090 дюйма.

Условия приложения нагрузки

Пластина лотка для бумаги будет прогибаться под действием собственного веса, но основная функция данной пластины — служить опорой для стопки писчей бумаги. Как и гидростатическое давление в предыдущем примере, нагрузка, под действием которой находится пластина лотка для бумаги, может считаться статической нагрузкой, равномерно распределенной по всей поверхности пластины (даже если размеры пластины несколько больше размеров бумаги).

Отдельные листы бумаги обладают достаточной гибкостью, чтобы отклоняться вместе с пластиной и сохранять режим равномерно распределенной нагрузки далее в случае ее прогиба.

На рис. 4.56 показан набор лотков для хранения бумаги, нагруженных различным образом. На второй лоток сверху установлена гиря весом 500 г в середине пролета у переднего края, а на второй поддон снизу установлены гири по 100 г (общая нагрузка также составляет 500 г), которые расставлены вдоль края пластины. Максимальное значение напряжения и максимальные величины прогиба, созданные равномерно распределенной нагрузкой, существенно ниже тех, которые создаются нагрузкой, сосредоточенной в одной точке. В данном примере предполагается, что типичную нагрузку создает пачка листов толщиной 1 дюйм, при этом вес листов q распределен на поверхности площадью A . Равномерная нагрузка, создаваемая собственным весом самой пластины из ПС, также учитывается.

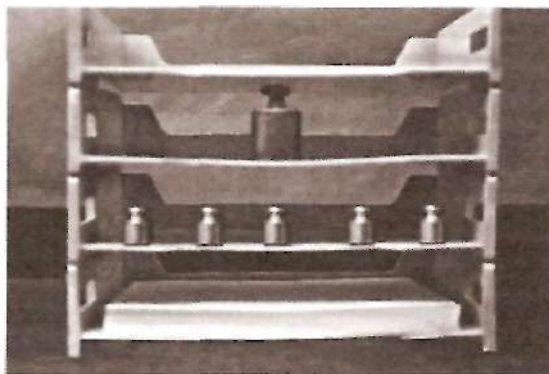


Рис. 4.56. «Этажерка» из четырех лотков для бумаги, имеющих различную нагрузку (по порядку сверху вниз: без нагрузки, сосредоточенная нагрузка 500 г, нагрузки величиной по 100 г, 5 гири, распределены по поверхности пролета и стопка бумаги)

$$q = W/A = [(SQ_{paper} \cdot w_{water} \cdot V_{paper}) + (SG_{PS} \cdot w_{water} \cdot V_{PS})]/A; \quad (4.33)$$

$$q = 0,0424 \text{ фунт/дюйм}^2.$$

Другие случаи нагружения, возникающие из-за неправильной эксплуатации, перегрузки или случайного падения также должны учитываться.

Способ закрепления

Пластина лотка для бумаги (рис. 4.55) имеет закрепления трех сторон (левой, правой и задней), а передний край по всей длине не закреплен. Каких-либо других промежуточных опор не существует. Прямоугольная пластина лотка для бумаги имеет три фиксированных края и четвертый край свободный, поскольку три края пластины вплавлены в стенку.

Однако здесь следует учитывать стыкующие устройства лотка, которые были сконструированы со встроенными замками, предназначенными для соединения лотков друг с другом (рис. 4.58).

Существует несколько состояний края пластины, которые конструктор должен учитывать. Лотки нижнего уровня (все лотки, кроме верхнего) имеют три фиксиро-



Рис. 4.57. Прямоугольная пластина с равномерно распределенной нагрузкой по всей поверхности, имеет три фиксированных края и один свободный

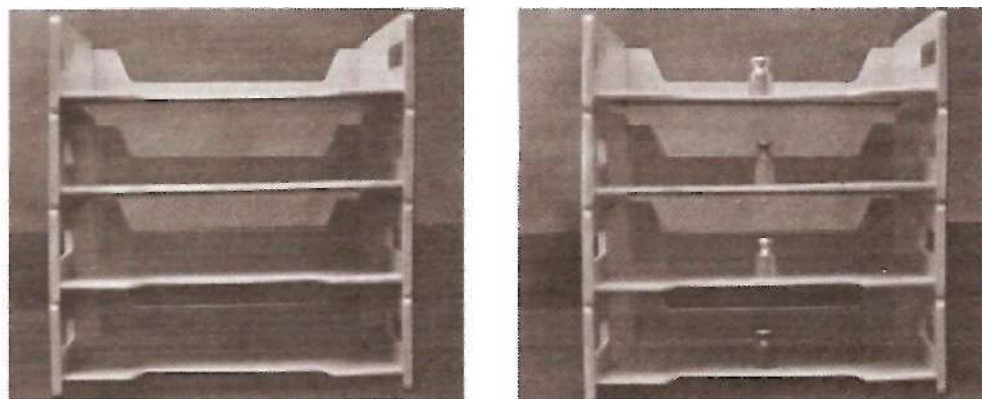


Рис. 4.58. «Этажерка» из четырех лотков для бумаги без внешней нагрузки (слева) и четыре лотка под действием нагрузки, приложенной к центру пластин (справа). Заметим, что у верхнего лотка (пластины) прогиб больше, чем у двух нижних лотков из-за перемещения боковых сторон

ванных края и один свободный край. Отклонение левой и правой боковых стенок от вертикального положения для этих лотков будут ограничены фиксаторами, которые есть в этих стенках. Боковые стенки верхнего лотка будут больше отклоняться, чем боковые стенки нижних лотков (рис. 4.58, справа).

Каждый лоток на рисунке изготовлен из одного и того же полимера, имеет одну и ту же геометрическую форму и находится под воздействием одинаковой нагрузки, которая приложена к одной точке в середине пролета вблизи переднего края. Но верхний лоток значительно больше прогибается в середине пролета. Рисунок показывает, что возрастание прогиба в середине пролета коррелирует с увеличением отклонения от вертикального положения боковых стенок (рис. 4.58).

Свойства материала

Лоток для бумаги отлит из ПС общего назначения. Изделие подвергается нагрузке в течение длительного периода времени (годы), поэтому решение этой конструкторской задачи не может быть получено без учета данных о ползучести при нагружении используемой марки материала. После приложения нагрузки, прогиб лотка будет возрастать постепенно до уровня, который зависит от условий окружающей среды и ползучести ПС. Если для прогнозирования прогиба за короткие времена могут быть использованы данные кратковременных испытаний зависимости напряжения от деформации, то прогибы при больших сроках эксплуатации изделия можно прогнозировать только на основании экстраполяционных данных о ползучести. Влияние старения и условий окружающей среды, например, ультрафиолетового излучения, тоже должны учитываться.

Расчетные формулы

Формулы, которые используются для расчетов напряжения и деформации, выбираются после определения условий нагружения, закрепления и геометрической формы изделия. Геометрическая форма пластины определяется как плоская прямоугольная пластина, на которую действует равномерная распределенная нагрузка. Условия закрепления изделия определяются как три фиксированных края и один свободный.

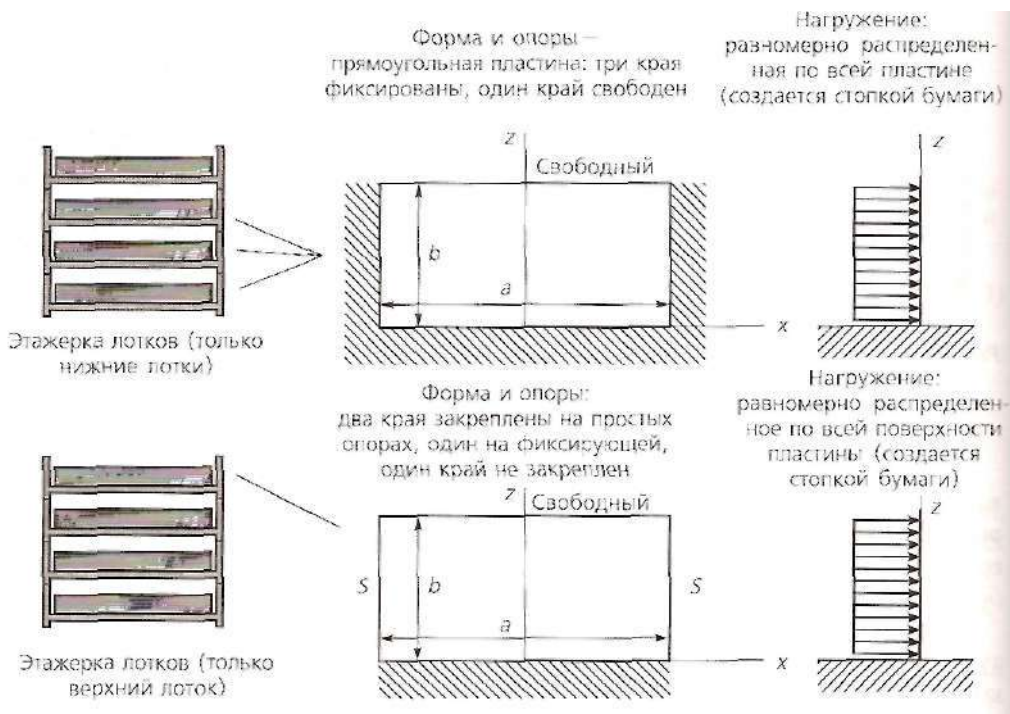


Рис. 4.59. Идеализированные условия нагружения и закрепления опоры лотка, полученного литьем под давлением

Следует считать, что реальные условия, в которых находятся левый и правый края, соответствуют промежуточному состоянию между фиксирующей и простой опорами.

Пластина с тремя фиксированными и одним свободным краем

Уравнение для максимального растягивающего напряжения (или максимального сжимающего напряжения) для свободного края в середине пролета ($x = 0,2 = b$) равномерно нагруженной прямоугольной пластины с тремя фиксированными и одним свободны краем будет [2]:

$$\sigma_a = \beta_2 \cdot q \cdot b^2 / t^2, \tag{4.34}$$

где t — толщина пластины; b — ширина пластины, q — равномерно распределенная нагрузка; (β_2 — константа, которая зависит от соотношения a/b).

Таблица 4.4. Константы β_2 для прямоугольной пластины в условиях равномерно распределенной нагрузки с тремя фиксированными и одним свободным краем [2]

a/b	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
β_2	0,016	0,066	0,148	0,259	0,484	0,605

В нашем случае соотношение a/B равно 1,278 и $P_2 = 0,384$ (получено с помощью интерполяции). Максимальное напряжение при растяжении вдоль нижней стороны переднего края пролета составит:

$$\sigma_a = (0,384)(0,0424)(9,0)^2/(0,090)^2 = 163 \text{ фунт/дюйм}^2. \tag{4.34}$$

Напряжения и прогибы в других местах поверхности пластины могут быть определены с помощью аналогичных уравнений. Эти значения следует сравнить с допустимыми проектными значениями напряжений для данной пластмассы.

Таблица 4.5. Константы β_2 для прямоугольной пластины, имеющей равномерную нагрузку с одним фиксированным краем, с одним свободным краем (который находится напротив) и двумя краями, которые закреплены на простых опорах [2]

a/b	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
β_2	0,048	0,190	0,386	0,565	0,730	0,688

Задний край фиксирован/Простые опоры у боковых краев/Передний край свободен

Значение максимального растягивающего (или максимального сжимающего) напряжения на свободном крае в середине пролета (т. е. $x = 0, z = b$) равномерно нагруженной прямоугольной пластины определяется из следующей формулы:

$$\sigma_a = \beta_2 \cdot q \cdot b^2 / t^2, \tag{4.34}$$

где β_2 — константа, которая зависит от соотношения a/B ; в этом случае значение $P_2 = 0,657$ получено с помощью интерполяции для соотношения $a/B = 1,278$:

$$\sigma_a = (0,657)(0,0424)(9,0)^2/(0,090)^2 = 279 \text{ фунт/дюйм}^2. \tag{4.34}$$

Значения напряжений, возникающие вдоль переднего края пластины, с простыми опорами будет существенно выше (почти в два раза), чем значения, которые будут получены для пластины с фиксированными боковыми опорами. Этот пример иллюстрирует важность выбора правильных опор в связи с их существенным влиянием на расчеты значений напряжений и прогибов.

4.5.3. Пластины неравномерной толщины

До этого момента речь шла о плоской пластине, имеющей одинаковую толщину. Но на практике существует гораздо больше примеров использования пластин неравномерной толщины. Пластина, как элемент пластмассового изделия, может иметь ребра, направляющие потока, бобышки, отверстия или элементы жесткости краев, которые могут располагаться на одной или обеих поверхностях (или в стенке в случае отверстия). Можно игнорировать влияние небольших элементов, например, маленькая круглая бобышка вряд ли будет оказывать воздействие на структурные свойства большой пластины (см. рис. 4.4), но изменение жесткости за счет ребер или других элементов не могут быть не учтены без последующей ошибки в расчетах.

В качестве примера приведем лоток для бумаги, который показан на рис. 4.60, сконструированный с локальным утолщением стенки вдоль переднего края снизу для уменьшения прогиба и напряжений вдоль него. Уравнения для пластины, которые использовались ранее, не пригодны для лотка с элементом жесткости на краю, поскольку толщина стенок пластины теперь не будет равномерной. Пренебрежение воздействием элементов жесткости или других элементов типа ребер может привести к существенным ошибкам. Для того чтобы получить приблизительную оценку прогиба и напряжения пластины более сложной геометрической формы, ее можно представить в виде набора перпендикулярно расположенных балок (рис. 4.60) [30]. Поддон содержит две балки, которые расположены перпендикулярно друг другу. Балка 1 представляет секцию, которая закреплена на правом и левом краях и подвергается действию равномерно распределенной нагрузке. Условия закрепления могут быть представлены как в виде простых опор, так и в виде фиксирующих, что зависит от того, является ли лоток свободным или он фиксирован. Нагрузка на балку, связанная с ее собственным весом, будет изменяться в соответствии с толщиной выбранного поперечного сечения, но значение внешней равномерно распределенной нагрузки будет постоянной. Поперечное сечение балки 1 будет постоянным по всей ее длине, и элементы жесткости на краях могут быть учтены с помощью процедуры, которая использовалась при рассмотрении балок с ребрами. Второй выделенный стержень — балка 2 перпендикулярна первой балке и представляет собой консоль, на которую действует равномерно распределенная нагрузка. В этом случае поперечное сечение консольной балки 2 постоянно за исключением свободного конца с элементом жесткости.

Увеличение толщины стенки не будет значительно увеличивать жесткость конструкции, так как выступ расположен перпендикулярно направлению прогиба балки 2. Суммарный прогиб пластины может быть рассчитан как сумма прогибов двух балок (1 и 2).

Суммарный прогиб в месте пересечения балок можно оценить, как:

$$1/Y_T = 1/Y_1 + 1/Y_2, \quad (4.35)$$

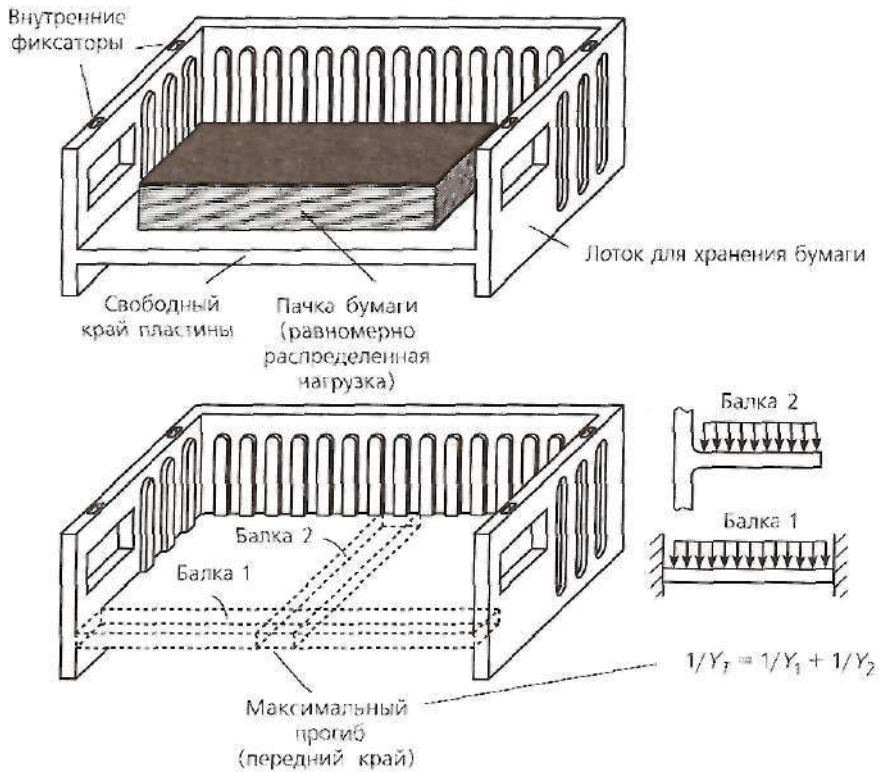


Рис. 4.60. Способ оценки прогибов для пластин более сложной геометрической формы [30]

Этот подход позволяет лишь грубо оценить значения прогиба или напряжения в конкретной области. Для получения более точных данных рекомендуется использовать метод анализа конечных элементов реализованный с помощью *CAD-систем* или реальные испытания прототипов, изготовленных в виде пластин с неравномерной толщиной. Более подробный анализ механических свойств пластин из пластмасс можно найти в специальной литературе [1].

4.6. Оболочки. Сосуды давления

4.6.1. Общие положения

Полимерные материалы часто используются для изготовления изделий, геометрическая форма которых может быть определена как оболочка, сосуд или труба. Особенно часто такие изделия используются в водопроводно-канализационных системах, пневматических устройствах или при транспортировке химикатов, где они могут применяться в виде гибких шлангов, жестких трубопроводов и разного рода фитингов.

Многие подобные изделия, используемые в автомобильной промышленности, упаковке продуктов и медицинских препаратов, представляют собой сосуды, работающие

под давлением. Пластмассовые сосуды, работающие под давлением, обычно используются в случаях, когда необходимо равномерно распределить внутренне давление. Например, отлитый из ПЭТФ сосуд для воды сливного бачка, показанный на рис. 4.61 сконструирован таким образом, что он способен выдерживать внутреннее давление величиной несколько атмосфер.

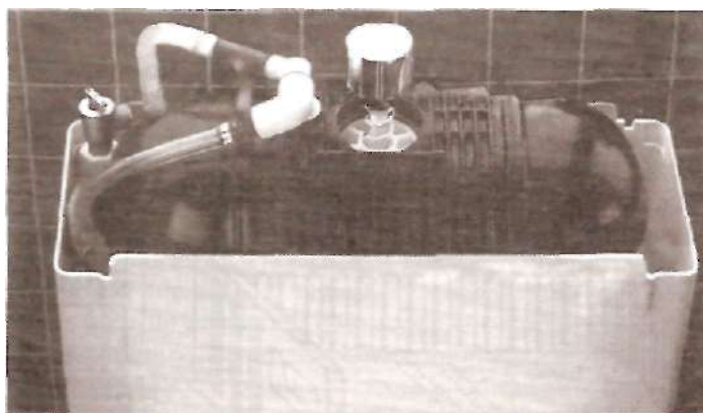


Рис. 4.61. Отлитый из ПЭТФ сосуд для воды выдерживает внутреннее давление, действующее постоянно

Как правило, сосуды, давления подвергаются действию равномерного внутреннего давления, но в некоторых случаях при эксплуатации изделия подвергаются действию внешних нагрузок. Такими примерами могут служить изделия, использующиеся для создания вакуума или глубокого погружения в различные среды.

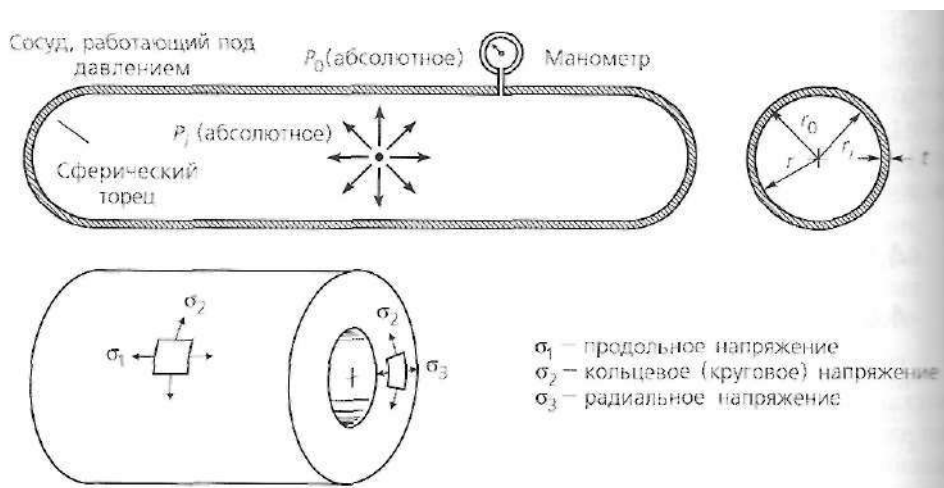


Рис. 4.62. Внутреннее давление, действующее на сосуд цилиндрической формы со сферическими торцами

Когда такие сосуды, как закрытый бак, показанный на рис. 4.62, подвергается воздействию внутреннего (или внешнего) давления, его стенки испытывают напряжение. К пространственным напряжениям относятся осевые или продольные, кольцевые или круговые, а также радиальные напряжения. Вместе со всеми этими напряжениями будут также наблюдаться соответствующие осевые, круговые или радиальные деформации. Формулы для расчета напряжений и деформаций сосудов, работающих под давлением, приведены в справочниках [2].

4.6.2. Тонкостенные сосуды, работающие под давлением

Для расчетов изделий в виде оболочек или труб с толщиной стенок t , на которые действует изнутри или снаружи равномерно распределенная нагрузка d , и у которых отношение радиуса r к толщине стенки мало ($r/t > 10$), следует применять специальные уравнения. В таких случаях допускается, что осевые и кольцевые напряжения почти равномерно распределены по толщине оболочки. Формулы для расчета напряжений и прогиба тонкостенных, цилиндрических, конических, сферических и тороидальных сосудов (с правильной геометрической формой) можно найти во многих справочниках. Уравнения для сосудов под давлением классифицированы для разных типов сосудов.

Пример 4.8. Тонкостенный сосуд давления

Бак для воды (рис. 4.62) представляет собой тонкостенный сосуд со сферическими торцами. Бак имеет внутренний диаметр величиной 6,2 дюйма, а толщина стенок равна 0,188 дюйма. Сосуд должен выдерживать внутреннее статическое давление воды величиной 40 фунт/дюйм непрерывно в течение 20 лет. Бак изготовлен из пластмассы, армированной стекловолокном. В таком изделии рассчитывается значение напряжения, приводящее вследствие ползучести материала к порче изделия (существенное искажение размеров и формы изделия) или даже к его разрушению. В этом случае обязательно используются данные испытаний на ползучесть материала, используемого для изготовления изделия.

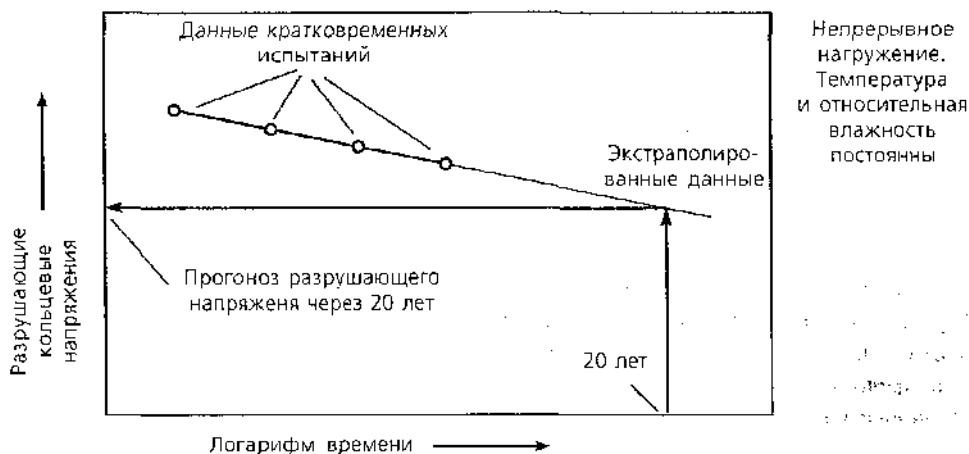


Рис. 4.63. Разрушающие кольцевые напряжения при ползучести для сосудов под давлением может быть определено путем экстраполяции данных кратковременных испытаний материалов

Результаты испытаний процесса ползучести получают в условиях, аналогичных эксплуатационным. При этом учитывают последствия долговременного воздействия воды (или более агрессивных химических компонентов) на пластмассу при повышенной температуре.

Используя уравнения для тонкостенных цилиндров с закрытыми торцами, подвергающихся воздействию равномерно распределенного внутреннего давления, определяются кольцевые напряжения вдали от торцов сосуда (напряжения растяжения считаются положительными):

$$\sigma_2 = q \cdot r / t = (40)(3,19) / (0,188) = 680 \text{ фунт/дюйм}^2. \quad (4.36)$$

Значение осевого продольного напряжения может быть определено путем деления силы, которая создается внутренним давлением, действующим на торцы сосуда, на площадь поперечного сечения цилиндрической оболочки.

$$F_l = \pi \cdot r_i^2 \cdot q = (3,14)(3,1)^2(40) = 1210 \text{ фунтов}; \quad (4.37)$$

$$A_s = \pi(r_o^2 - r_i^2) = (3,14)[(3,29)^2 - (3,10)^2] = 3,81 \text{ дюйма}^2; \quad (4.38)$$

$$\sigma_1 = F_l / A_s = (1210) / (3,81) = 318 \text{ фунт/дюйм}^2. \quad (4.39)$$

Поскольку толщина стенок цилиндра мала по сравнению с радиусом, то из уравнений (4.36) и (4.39) следует, что величина осевого напряжения будет в два раза меньше значения кольцевого напряжения.

Размеры сосуда, работающего под давлением, а именно радиус и длина вдоль продольной оси будут изменяться как под действием внутреннего давления, так и со временем вследствие ползучести материала. Изменения размеров могут быть определены, если известны характеристики процесса ползучести и коэффициента Пуассона для данного материала. Возможное изменение величины радиуса L_r в зависимости от времени и давления может быть определено следующим образом:

$$\Delta r = q \cdot r^2 [1 - (\nu / 2)] / E_T(t) \cdot t, \quad (4.40)$$

где $E_T(t)$ - функция, описывающая зависимость модуля ползучести при растяжении от времени. Изменение размера в продольном направлении, ΔL , может быть определено с помощью формулы:

$$\Delta L = q \cdot r \cdot L(0,5 - \nu) / E_T(t) \cdot t. \quad (4.41)$$

Вычисление значений напряжений и прогибов с помощью уравнений (4.36)-(4.41) можно считать приемлемыми для прямых труб, но если геометрия сосуда более сложная, решения этих упрощенных уравнений будут неточны. Это касается сосудов, имеющих такие особенности, как отверстия, фитинги, усиливающие ребра ил; торцевые элементы, которые были либо отлиты, либо присоединены к цилиндру в результате сборки.

Поперечные сечения, показанные на рис. 4.64, представляют собой классический пример плоских или сферических торцов сосудов. Исследования показали, что локальные напряжения в таких геометрически неоднородных местах, как соединение

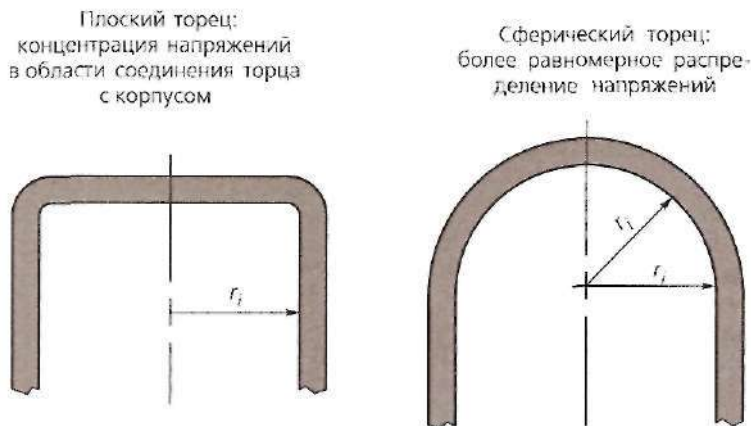


Рис. 4.64. Под давлением в плоских торцах сосуда создается высокая концентрация напряжений в углах, в сферических торцах распределение напряжений более равномерное

цилиндра и основания могут быть в 3-6 раз больше, чем значения кольцевых напряжений, определенных с помощью уравнения (4.36) [16,31]. Значения напряжения в углах изделия с плоскими торцами будут очень высоки ввиду наличия в этой области как кольцевых, так и изгибающих напряжений. Конструкция со сферическими торцами более совершенна, но она не всегда удобна при использовании изделия. Максимальные значения напряжения для большинства закрытых сосудов существенно выше тех, которые определяются из уравнений для кольцевых напряжений. Поэтому эти значения должны быть умножены на коэффициент концентрации напряжений, K , который зависит от конкретной конструкции торца:

$$\sigma_{\max} = K \cdot \sigma_2. \quad (4.42)$$

При оценке максимального напряжения должны быть учтены условия безопасности. Максимальное напряжение при эксплуатации должно быть существенно ниже, чем разрушающее напряжение при ползучести. Разница в этих значениях или уровень безопасности зависят от конкретного применения изделия и качества проведенных испытаний. Рабочее давление пластмассового сосуда, работающего под давлением, ограничивается одной шестой величины реального разрушающего давления, определенного по результатам гидростатических испытаний [31].

Почти невозможно рассчитать максимальные напряжения для сосудов под давлением, имеющих сложную геометрическую форму, поэтому в этом случае рекомендуется использовать метод конечных элементов. Производители материалов рекомендуют обязательно проводить консультации по поводу пластмассовых изделий, подвергающихся внутреннему давлению [24]. Метод конечных элементов дает довольно точные результаты, но применение его не исключает изготовления прототипов. Прототипирование особенно важно для изделий, подвергающихся воздействию агрессивных химикатов, а также динамическим или усталостным нагрузкам, поскольку эти ситуации очень трудно точно смоделировать.

4.6.3. Толстостенные сосуды, работающие под давлением

Расчеты толстостенных сосудов давления, то есть таких, у которых $r/t < 10$, аналогичны уравнениям для тонкостенных сосудов. Разница состоит в том, что для толстостенных сосудов более существенными становятся радиальные напряжения, и нельзя пренебрегать изменениями кольцевых напряжений по толщине стенки, следовательно, должны быть введены поправки, учитывающие эти изменения [2,32].

Толстостенные сосуды описываются как объекты, имеющие внутренний r_i и внешний r_o радиусы. Когда сосуд с толстыми стенками и заглушёнными торцами подвергается воздействию внутреннего давления, кольцевое напряжение при любом значении радиуса может быть определено из уравнения:

$$\sigma_2 = [q \cdot g^2(r_o^2 + r^2)] / [r^2(r_o^2 - r_i^2)], \quad (4.42)$$

где максимальное значение кольцевого напряжения наблюдается при $r=r_o$. Значение осевого напряжения будет определяться из уравнения:

$$\sigma_1 = q \cdot r_i^2 / (r_o^2 - r_i^2). \quad (4.43)$$

Радиальное напряжение будет определяться из уравнения:

$$\sigma_3 = [q \cdot r_i^2(r_o^2 - r^2)] / [r^2(r_o^2 - r_i^2)] \quad (4.44)$$

и максимальное значение наблюдается при $r = r_i$. Изменение r_o из-за внутреннего давления определяется с помощью следующего уравнения:

$$\Delta r_o = [q \cdot r_o \cdot r_i^2(2 - \nu)] / [(E_T(t)(r_o^2 - r_i^2)]. \quad (4.45)$$

В справочниках, на которые есть ссылки в данной книге (например, [2]), содержится обширный список формул, как для толстостенных, так и для тонкостенных сосудов.

4.7. Кручение

4.7.1. Общие положения

Некоторые изделия, содержащие отдельные детали в форме балок, могут подвергаться деформации кручения в большей степени, чем деформации на изгиб. Поперечное сечение бобышки, показанное на рис. 4.65, является примером того, что при конструировании зачастую необходимо принимать во внимание жесткость при скручивании.

Самонарезающие винты или машинные винты обычно используются в качестве крепежа при сборке корпусов бытовых устройств. Если винт слишком сильно затянут, могут происходить разрушения самого различного типа. Л именно: срыв резьбы, растрескивание бобышки, разрушение бобышки при кручении или даже разрушение винта при кручении.

Срыв резьбы имеет наименее разрушительные последствия, поскольку его обычно можно исправить, применив винт большей длины или диаметра.

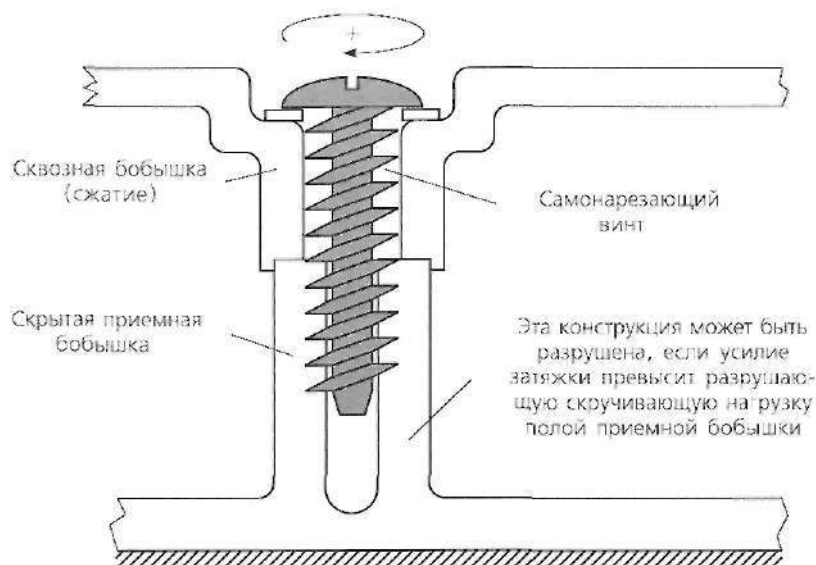


Рис. 4.65. Глухая бобышка с самонарезающим винтом потенциально опасна, поскольку может разрушиться при кручении, если винт слишком сильно затянут или стенки бобышки слишком тонкие

Бобышка, принимающая винт, должна иметь достаточное сопротивление кручению, чтобы выдерживать приложенное усилие кручения и не разрушиться при затягивании винта.

4.7.2. Кручение круглых стержней

Классические формулы можно использовать для оценки напряжений и углов поворота сечений у объектов правильной геометрической формы, подвергающихся скручиванию [2,12,24]. Эти формулы получены исходя из следующих предположений:

- стержень имеет плоское одинаковое поперечное сечение;
- стержень является сплошным или полым с сечением в форме кольца;
- стержень однороден и изотропен;
- скручивающий момент (пара сил) применен к торцам стержня в плоскости, перпендикулярной его оси;
- материал является упругим.

Если имеются справочные данные о соответствующих свойствах материала (например, данные о ползучести для долговременных приложений и т. д.), то формулы могут дать довольно точную оценку свойств изделия в условиях эксплуатации при кручении. Для изделий с неправильной геометрической формой метод конечных элементов является лучшим способом для прогнозирования поведения изделия при скручивании. Рассмотрим стержень, представляющий собой цилиндр из однородного

материала, подвергающийся воздействию скручивающей нагрузки (рис. 4.66). Прикладываемый внешний скручивающий момент за счет сдвиговых усилий передается вдоль оси вала.

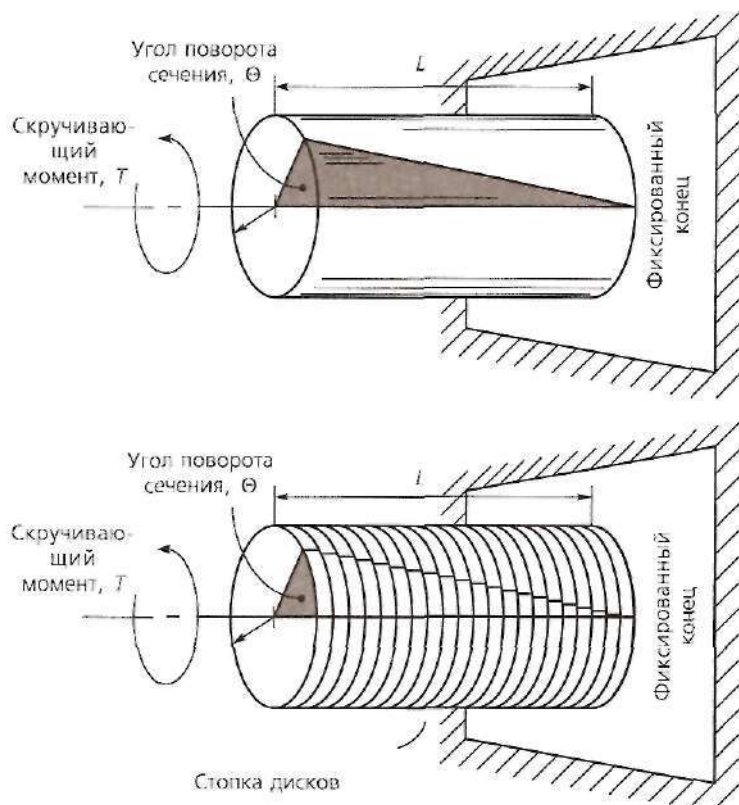


Рис. 4.66. Скручивающий момент, примененный к цилиндрическому стержню, приводит к его скручиванию. Скручивающий момент передается вдоль оси посредством сдвиговых усилий



Рис. 4.67. Разрушение при скручивании, при превышении сдвиговой прочности материала

Стержень можно считать стопкой дисков, которые подвергаются сдвиговым деформациям, возрастающим по мере удаления от плоскости закрепления. Относительное вращение между дисками приводит к сдвиговым (касательным) напряжениям, которые возрастают с увеличением расстояния от центра сечения (оси вращения) [2,24].

Свойства материала

Вал круглого сечения разрушается под действием крутящего момента при превышении допускаемого касательного напряжения. Разрушение при сдвиге возникает, когда прилегающие слои материала начинают смещаться относительно друг друга (рис. 4.67). Касательные напряжения определяются как отношение приложенной силы, F , к площади поверхности сдвига, A :

$$\tau = F/A. \tag{4.46}$$

Данные о значениях сдвиговых допускаемых напряжений для полимерных материалов не так широко распространены, как подобные данные о значениях для растяжения, сжатия или изгиба. Это также относится и к долговременным данным о процессах ползучести или релаксации напряжений. В том случае, если данные о допускаемых сдвиговых напряжениях для пластмассы недоступны, эта величина может быть рассчитана с помощью значения предела текучести при растяжении материала [33]:

$$\tau = \sigma_T / (3)^{1/2}. \tag{4.47}$$

В ряде случаев рекомендуется, чтобы максимальное напряжение сдвига в изделии не превышало 1/2 от значения предела текучести материала [12].

Значение модуля сдвига G также как и модули растяжения и сжатия, зависит от времени и уровня напряжения, а также от температуры и относительной влажности. Когда данные о значениях модуля сдвига не доступны, то модуль жесткости может быть рассчитан с помощью следующего уравнения:

$$G = E / [2(1 + \nu)], \tag{4.48}$$

где ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости.

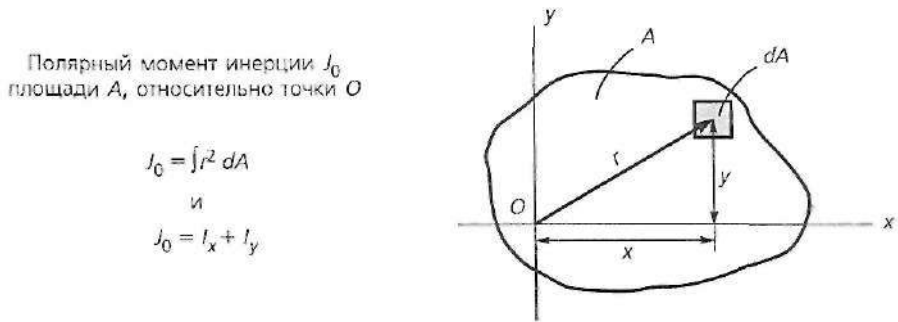


Рис. 4.68. Полярный момент инерции площади относительно точки равен сумме осевых моментов инерции относительно взаимно перпендикулярных осей, проходящих через эту точку

Поскольку у многих пластмасс значения ε отличаются при растяжении и сжатии, лучше использовать наименьшее из этих двух значений (при соответствующей температуре и относительной влажности). По возможности следует использовать реальное значение модуля жесткости для расчетов при кручении.

Формулы расчета напряжений и деформаций при кручении

Напряжения и деформации при кручении для стержня, на который действует скручивающая нагрузка, зависят от величины этой нагрузки, свойств материала и геометрической формы стержня. Большое значение играет полярный момент инерции, [17]. Полярный момент инерции площади A относительно точки O определяется из уравнения:

$$J_0 = \int r^2 \cdot dA, \quad (4.49)$$

где r — расстояние от точки O до dA .

Полярный момент инерции относительно точки O может быть также определен с помощью суммирования осевых моментов инерции (вторых моментов инерции сечения) относительно осей x и y , где x и y — оси, перпендикулярные друг другу и проходящие через точку O :

$$J_0 = I_x + I_y. \quad (4.50)$$

В большинстве случаев полярный момент инерции, необходимый для расчетов при кручении, — это полярный момент поперечного сечения относительно центральной оси c . Однако полярный момент инерции относительно любой другой точки O может быть найден с помощью следующей зависимости:

$$J_0 = J_c + A \cdot d^2, \quad (4.51)$$

где A — площадь поперечного сечения; J_c — полярный момент инерции относительно центра тяжести течения; d — расстояний от точки O до центра тяжести сечения c .

Для цилиндра с радиусом R полярный момент инерции относительно центра инерции составляет:

$$J_0 = I_x + I_y = (\pi \cdot R^4 / 4) + (\pi \cdot R^4 / 4) = \pi \cdot R^4 / 2. \quad (4.52)$$

Уравнения для вычисления касательных сдвиговых напряжений, τ , и угловой деформации, Θ (единицы измерения радианы) для цилиндрических элементов длиной l и радиусом R , подвергающиеся воздействию крутящего момента T , даны в уравнениях (4.52) и (4.53) соответственно:

$$\tau = T \cdot r / J; \quad (4.52)$$

$$\Theta = T \cdot l / J \cdot G. \quad (4.53)$$

Для сплошного цилиндра максимальное касательное напряжение возникает при $r = R$ и определяется как:

$$\tau_m = T \cdot R / J = 2 \cdot T / \pi \cdot R^3. \quad (4.54)$$

Максимальная угловая деформация (угол закручивания) наблюдается при $l = L$:

$$\Theta_m = T \cdot L / J \cdot G = 2 \cdot T \cdot L / \pi \cdot R^4 \cdot G. \quad (4.55)$$

4.7.3. Деформация при кручении некруглых стержней

Угол поворота сечений некруглых стержней, находящихся под действием крутящего момента, могут быть рассчитаны с помощью общего уравнения [2,24]:

$$\Theta = T \cdot L / K \cdot G, \quad (4.56)$$

где K — коэффициент, который зависит от размеров поперечного сечения стержня. Для круглых сечений $K = J$, а для других видов сечения K меньше, чем/.

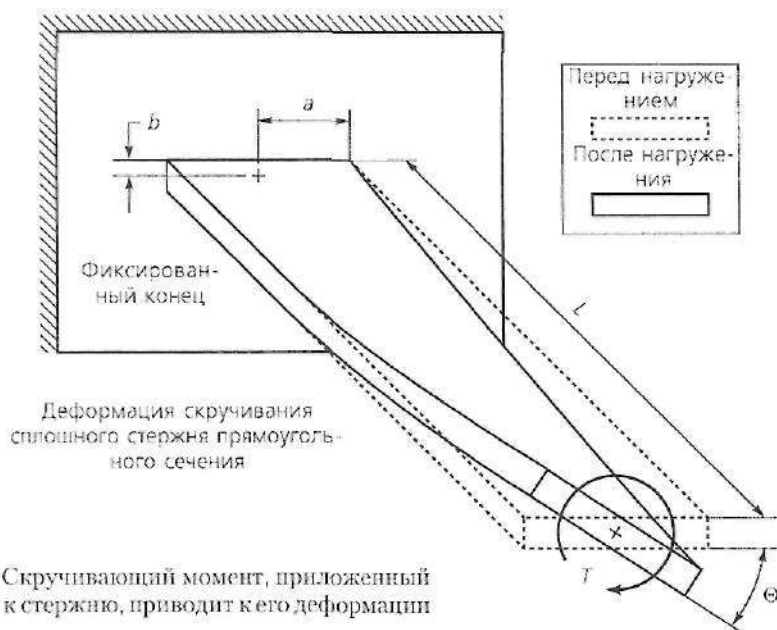


Рис. 4.69. Скручивающий момент, приложенный к стержню, приводит к его деформации

Значения K (или/) и максимальных сдвиговых напряжений для цилиндрического и прямоугольного поперечных сечений показаны на рис. 4.70. Более обширный материал для сечений других геометрических форм можно найти в справочниках [2]. Жесткость при кручении изделий, полученных литьем под давлением, может быть улучшена за счет усиливающих ребер. Жесткость при кручении и изгибе открытого контейнера, который показан на рис. 4.71, а, может быть существенно улучшена за счет внутренних ребер. Усиливающие элементы, у которых расположение ребер имеют X- или Z-образную форму, предпочтительнее для изделий, испытывающих крутящие нагрузки [34]. Нелицевая поверхность отливки (находится снизу) снабжена обычными поперечными пересекающимися ребрами П-образными, расположенными под углом (рис. 4.71, б). Такая комбинация обеспечивает неплохое сопротивление одновременно кручению и изгибу. Прогнозирование поведения изделий, которые имеют такую сложную геометрическую форму и подвергаются скручиванию, с помощью классических расчетов очень трудно; для этого необходимо использовать метод конечных элементов.

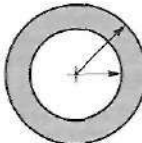
Геометрическая форма поперечного сечения	Полярный момент инерции (J_c)	K	Максимальное касательное напряжение
Круглое сплошное	 $\frac{\pi}{2} R^4$	$\frac{\pi}{2} R^4$	$\frac{2T}{\pi R^3}$ при $r=R$
Прямоугольное сплошное	 —	$ab^3 \left[\frac{16}{2} - 3,36 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right]$	$\frac{T(3a + 1,8b)}{8 a^3 b^2}$
Пустотелое (кольцеобразное)	 $\frac{\pi}{2} (r_0^4 - r_i^4)$	$\frac{\pi}{2} (r_0^4 - r_i^4)$	$\frac{2 T r_0}{\pi (r_0^4 - r_i^4)}$ при r_0

Рис. 4.70. Полярные моменты инерции и максимальные значения касательных напряжений для нескольких поперечных сечений

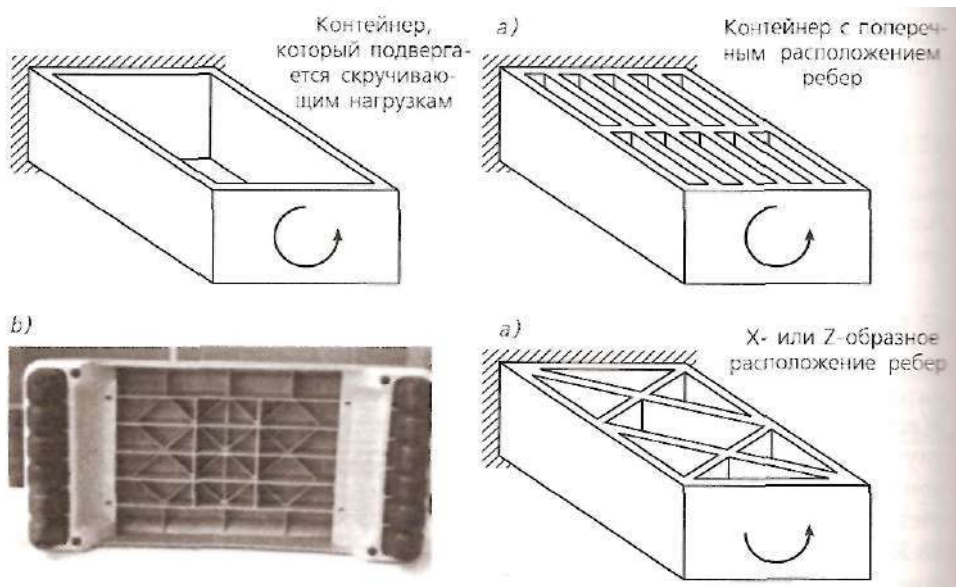


Рис. 4.71. а — поперечное расположение ребер (перпендикулярно стенкам) увеличивает жесткость конструкции при изгибающих нагрузках и влияет на жесткость при кручении. Диагональные ребра обеспечивают увеличение жесткости при кручении: б — на нижней части степ-доски для аэробики использованы как поперечные, так и диагональные ребра, что обеспечивает ей достаточную жесткость как при кручении, так и при изгибе

Пример 4.9. Напряжения при скручивании бобышки для винтового крепления

Изделия, которые показаны на рис. 4.72, изготовлены из смеси полифениленоксида/ПС и предназначены для сборки с использованием самонарезающего винта # 6 BT-25. Направляющая (приемная) бобышка имеет внешний диаметр 0,315 дюйма и внутренний диаметр 0,115 дюйма. Винт ввинчивается в бобышку и затягивается, создавая крутящий момент, равный 14 фунтов/дюйм.

Максимальные касательные напряжения могут быть определены из уравнения:

$$\tau_m = 2 \cdot T \cdot r_0 / \pi(r_0^4 - r_i^4);$$

$$\tau_m = (2)(14)(0,158) / (3,14)[(0,158)^4 - (0,0575)^4] = 2300 \text{ фунт/дюйм}^2.$$

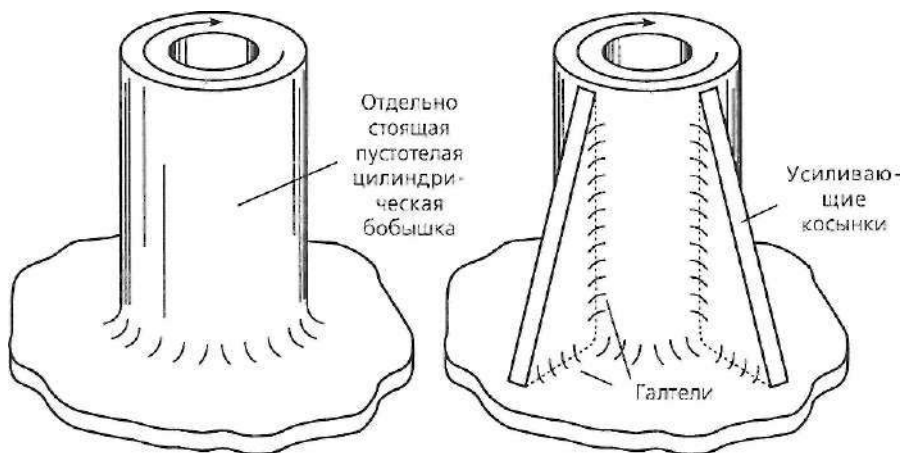


Рис. 4.72. Косынки обычно используются для улучшения жесткости бобышек при изгибе и кручении, они добавляются для улучшения характеристик заполнения формы, поскольку ускоряют движение потока

Если при растяжении значение предела текучести для полимерной смеси равно 7800 фунтов/дюйм² (при соответствующей скорости деформирования, температуре и т. д.), то значение максимального проектного напряжения при сдвиге составит половину этого значения, то есть 3900 фунтов/дюйм².

Усиливающие косынки добавляются с внешней стороны бобышек для улучшения жесткости при кручении без увеличения толщины стенок бобышки. Косынки улучшают течение расплава полимера в процессе литья под давлением тонкостенных бобышек.

4.8. Колонны (гибкие стержни)

Балки или гибкие колонны иногда используются в условиях приложения сжимающих нагрузок (на торцах), то есть напряжения сжатия. Сжимающее напряжение, действующее на колонну с однородным поперечным сечением площадью L , создается

сжимающей нагрузкой, F , приложенной к центр¹ сечения, определяется простым уравнением:

$$\sigma_c = F / A. \quad (4.58)$$

Превышение подобных сжимающих напряжений может вызвать значительные поперечные изгибы достаточно длинной тонкой колонны¹. Возникновение даже небольших отклонений от прямолинейности поперечных сил приведет к увеличению изгиба. Критическая нагрузка, вызывающая изгиб прямой колонны, может быть оценена с помощью теории устойчивости Эйлера. Эта теория может быть использована для длинных тонких колонн с однородным поперечным сечением, жесткость которых ($E \cdot I$) является постоянной величиной по всей длине [1]. Величина критической силы при таком изгибе зависит от геометрической формы поперечного сечения колонны, жесткости или модуля упругости полимера, E , длины колонны (без учета опор), L , и условий закрепления концов колонны. Некоторые способы закрепления концов колонны показаны на рис. 4.73.

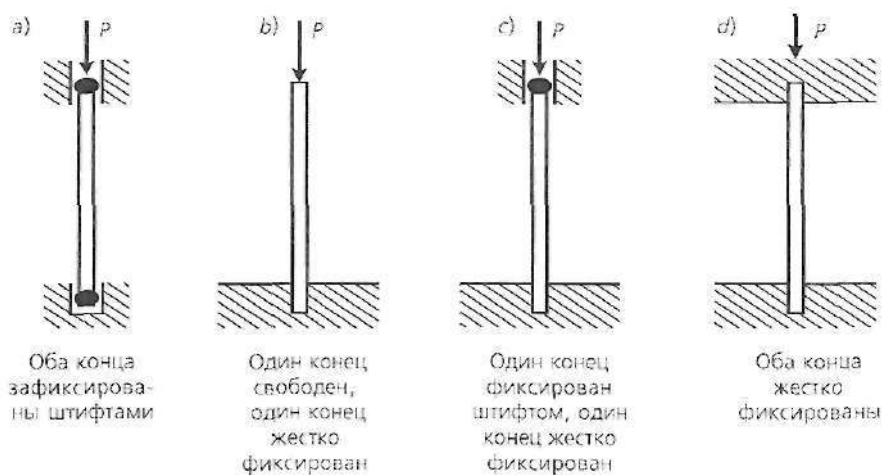


Рис. 4.73. Некоторые способы закрепления концов гибких колонн

Значения, показанные на рис. 4.79, являются идеальными и маловероятно, что они будут реализованы на практике. В условиях реальной эксплуатации способы закрепления концов в какой-то степени можно описать с помощью нескольких вариантов идеализированных условий закрепления [2]. Отлитые в форме колонн ножки столов, например, нельзя считать абсолютно жестко закрепленными при сжатии, так как столешница и ножки не представляют собой абсолютно жесткую конструкцию. Нижний конец (нижняя поверхность) ножки стола перпендикулярна оси колонны и воспринимает нагрузку поверхности стола, поэтому ее называют колонной с плоским торцом.

¹ Это явление носит название «потерн устойчивости» колонны. — Примеч. науч. ред.

Уравнение Эйлера позволяет вычислить критическую сжимающую нагрузку, F :

$$F_c = \pi^2 \cdot E \cdot A / (K \cdot L / r)^2, \quad (4.59)$$

где K — коэффициент приведенной длины, который определяется условиями закрепления торцов; E — модуль упругости; A — площадь поперечного сечения; r — это наименьший радиус инерции, который может быть определен с помощью уравнения (4.13), где I — наименьший осевой момент инерции относительно центральной оси. Коэффициент приведенной длины меняется в зависимости от способа закрепления концов [1]. Значение модуля должно отражать длительность нагрузки и условия окружающей среды, ожидаемые при эксплуатации. Более детальное описание устойчивости балок и пластин приводится в специальной литературе [1].

4.9. Динамические нагрузки

4.9.1. Общие положения

Пластмассовые детали, которые используются в бытовых устройствах, автомобильной промышленности и других изделиях длительного пользования, подвергаются динамическим нагрузкам — вибрационным, ударным и усталостным. Динамические нагрузки могут стать причиной существенного увеличения деформаций и напряжений по сравнению с теми, которые возникают при статических нагрузках. Деформации и напряжения, вызванные динамическими нагрузками, зависят от скорости нагружения, демпфирующих характеристик материала (характеристик вязкости) и геометрии изделия. Конструирование с учетом динамического нагружения гораздо сложнее, чем в статических условиях. В случае вибрационных нагрузок очень большие напряжения и деформации могут возникнуть, когда частота вибрации нагрузки становится близкой к собственной частоте колебаний структуры. Для изделий, подвергающихся нагрузкам этого типа, собственные резонансные частоты должны находиться вне диапазона частот нагрузки. Рекомендуется также использовать вибрационные изоляторы, которые могут уменьшить максимальные отклонения, возникающие в условиях резонанса [1, 39]. Подробное описание конструирования с учетом динамического нагружения изделий не входит в наши задачи, поэтому здесь буду определены лишь общие принципы, связанные с усталостными и ударными нагрузками.

4.9.2. Усталостное нагружение

Введение

Пластмассовые изделия часто используются в условиях периодических нагрузок. Рассмотренная нами парковая скамейка (рис. 4.40) является примером такого изделия. Элементы сидения периодически нагружаются и освобождаются (в произвольном порядке) таким образом, что создается нагрузка в виде прямоугольного колебания в одном направлении. Функция нагрузки описывается как периодическая, а не усталостная, поскольку: 1) произвольная частота нагрузки имеет слишком низкое значение (в диапазоне $3 \cdot 10^{-4}$ Гц) и 2) после возникновения нагрузка остается постоянной (статическая нагрузка). Очень низкая частота нагружения проявляется

в том, что температурный гистерезис (связанный с внутренним трением при нагружении-разгрузении) явно не наблюдается, поскольку есть достаточно времени для рассеивания тепла, выделяющегося в ходе нагрузочных циклов.

Другие пластмассовые изделия, например, детали машин, которые совершают возвратно-поступательные движения (это могут быть колеса или шестерни), подвергаются периодическим нагрузкам высокой частоты. Например, шестерня (рис. 4.75)

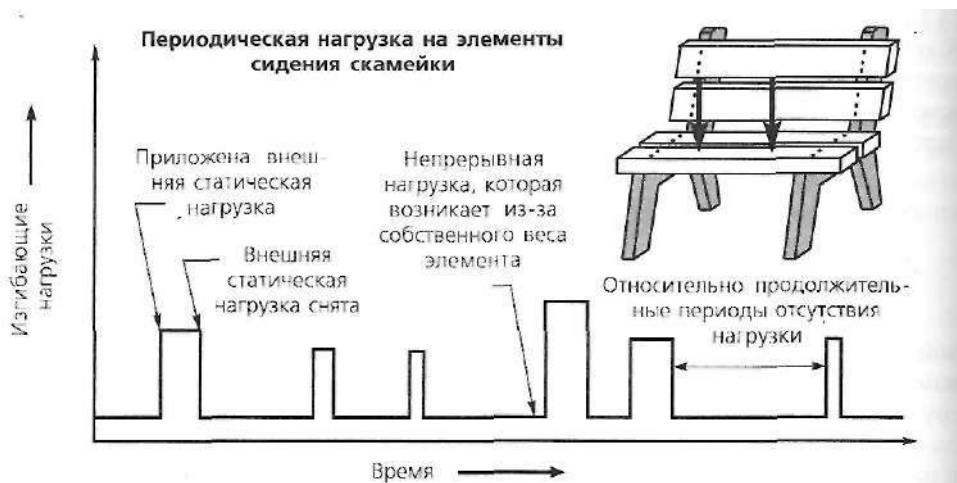


Рис. 4.74. Периодическая произвольная нагрузка низкой частоты, которая действует на элементы сидения парковой скамейки

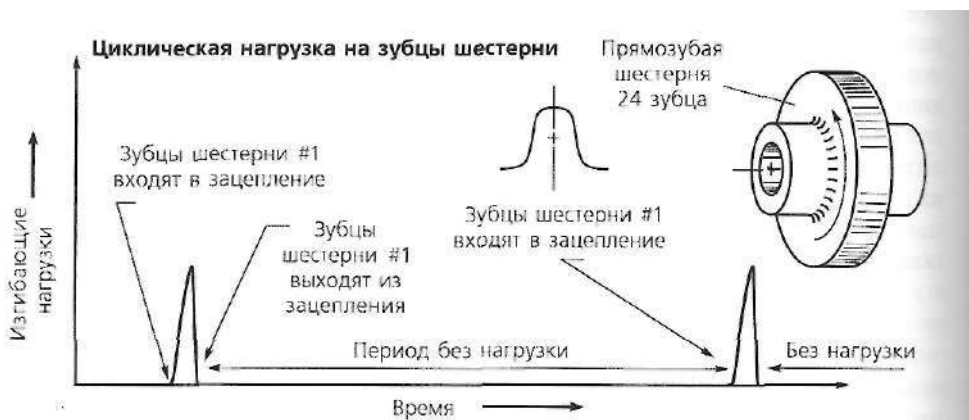


Рис. 4.75. Периодическая (циклическая) нагрузка на зубцы прямозубой шестерни

подвергается непрерывной вращательной нагрузке и локальным периодическим изгибающим нагрузкам, которые действуют на зубцы шестерни.

Каждый зубец входит в зацепление и освобождается от него в течение каждого оборота. В отличие от примера с садовой скамейкой, частота нагрузки в случае с зубцами

шестерни существенно больше. Например, шестерня, которая имеет 24 зубца и вращается с частотой 60 об/мин, будет подвергаться нагрузке на изгиб, действующей в течение 0,4 с, что соответствует частоте 2,5 Гц. Кроме того, нагрузка непрерывно меняется в течение 0,017 с, во время ее действия. Динамические нагрузки приводят к генерации тепла из-за вязкостной диссипации. Если шестерня изготовлена из полимера, для которого характерен высокий разогрев поверхности при трении, происходит разогревание участков поверхности и внутренний вязкостный разогрев. В ходе этого периодического процесса промежутки времени без нагрузки недостаточны для того, чтобы температура изделия достигла равновесной температуры окружающей среды. Это значит, что изделие будет эксплуатироваться при повышенных температурах [6, 37, 38]. Обычно рекомендуется, чтобы соотношение периодов нагрузки к периодам «отдыха» составляло 1/10 [38].

Функцию, описывающую нагружение шестерни, можно подобрать. Однако если изделие подвергается ветровым нагрузкам, прогнозировать режим нагружения и представить его в виде функции не представляется возможным. В большинстве случаев температурный гистерезис нежелателен.

Механическая деталь, предназначенная для передачи мощности, например, шестерня, обычно разрабатывается и изготавливается с использованием материалов, минимизирующих количество энергии, которое превращается в тепло. В тех случаях, когда необходимо демпфировать вибрационные колебания, при изготовлении изделия целенаправленно подбираются материалы, поглощающие энергию, например, «вязкие» термореактивные или термопластичные эластомеры, демпфирующие колебания. В других случаях, напротив, необходимо стремиться к уменьшению локального разогрева детали. Нагревание зубцов шестерни может быть минимизировано за счет снижения трения. Локальный разогрев из-за трения может быть минимизирован за счет использования материалов, имеющих хорошо смазанную поверхность, а вязкостный разогрев может быть минимизирован за счет использования более упругих материалов. Использование полимеров с наполнителями или армирующими добавками



Рис. 4.76. Площадь петли гистерезиса определяет диссипацию энергии при вязком трении

(особенно тех наполнителей, которые снижают коэффициент трения поверхности) увеличивает теплопроводность, жесткость, и, следовательно, срок службы изделия [38]. Любой способ, который способствует увеличению теплообмена между разогретыми динамическим нагружением пластмассовыми деталями и прилегающими к ним частями, увеличивает срок службы изделия. Увеличение диаметра шестерни может уменьшить рабочую температуру за счет увеличения времени отдыха изделия без нагрузки.

Толщина стенок также является важным фактором при разработке конструкции изделия с учетом динамических нагрузок. Стенки у изделий, подвергающихся усталостным нагрузкам, должны быть относительно тонкими (рис. 4.77). Изделия, имеющие тонкие стенки с ребрами или ребристыми поверхностями, позволяют уменьшить рабочие температуры за счет возрастания отношения площади поверхности изделия к его объему. Следует избегать, где это возможно, использования в изделиях, подвергающихся постоянным динамическим нагрузкам, толстых стенок, удерживающих тепло, при этом сохраняя требуемую жесткость. Условия литья или дополнительной обработки при изготовлении изделий, которые затем подвергаются усталостным нагрузкам, могут также оказывать существенное воздействие на сроки службы изделия. Например, остаточные напряжения, особенно те, которые сосредоточены вблизи поверхности отливки, могут существенно влиять на число циклов до разрушения. Условия первичной переработки или вторичных операций (таких как термообработка или отпуск термообработкой), способствующие продвижению сжимающих остаточных напряжений в направлении поверхности отлитого изделия, для некоторых полимеров является желательным, в то время как для растягивающих остаточных напряжений наблюдается обратный эффект [40].

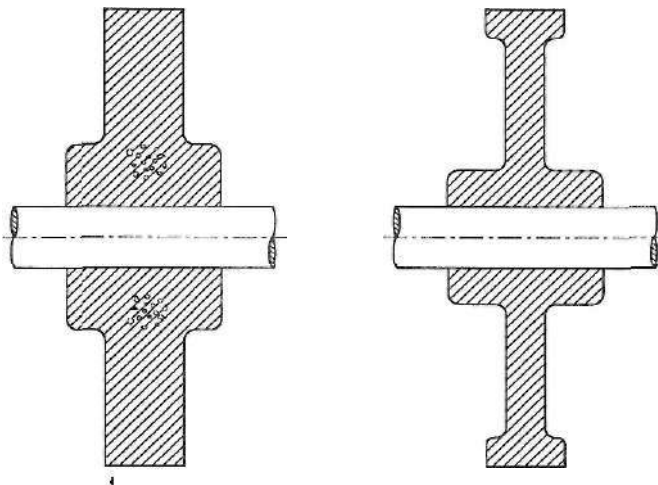


Рис. 4.77. Изделия, которые подвергаются усталостным нагрузкам, должны быть сконструированы с относительно тонкими стенками, чтобы обеспечить эффективный теплообмен и снизить вероятность образования остаточных напряжений или пустот

Испытания на усталость

Пластмассы, которые подвергаются воздействию циклических нагрузок, разрушаются при напряжениях, величина которых существенно ниже предела текучести при статическом нагружении. Кумулятивные эффекты многократного воздействия циклических нагрузок могут привести к усталостному разрушению при напряжениях, существенно более низких, чем при статическом нагружении. Характеристики усталости изделия влияют как на выбор материала, так и на конструкцию изделия. Усталостные нагрузки будут уменьшать время разрушения при данном уровне напряжений (по сравнению со статической нагрузкой) и могут привести к изменению характера разрушения — от пластического к хрупкому [41].

Усталостные характеристики пластмасс могут быть определены из тестов на усталость, в которых фиксируются напряжения или деформации при динамических испытаниях. При проведении испытаний на усталость контрольные образцы подвергаются циклическим нагрузкам, в ходе которых определяют зависимости между приложенным напряжением (или деформацией) и количеством циклов, которое необходимо провести до разрушения образца. Разрушающее напряжение при растяжении, изгибе, сжатии или сдвиге представляют на графике в виде функции, зависящей от числа циклов в логарифмическом или полулогарифмическом масштабе. Значения асимптотического напряжения при очень большом времени обычно называют пределом усталостной прочности материала. Эта кривая известна под названием кривая S/N (S — разрушающее напряжение, N — количество циклов).

Приложение нагрузки или закон нагружения, как правило, синусоидальный, но также возможны такие формы нагружения, как прямоугольник, пила и др. Очень важно, чтобы испытания на усталость проводились в условиях, близких к условиям эксплуатации изделия. Для проведения испытаний на усталость используются различные законы нагружения. Нагрузки могут иметь один знак (например, только растягивающее), тогда величина напряжения будет изменяться от минимального значения, то есть, как правило, от нуля до максимального значения.

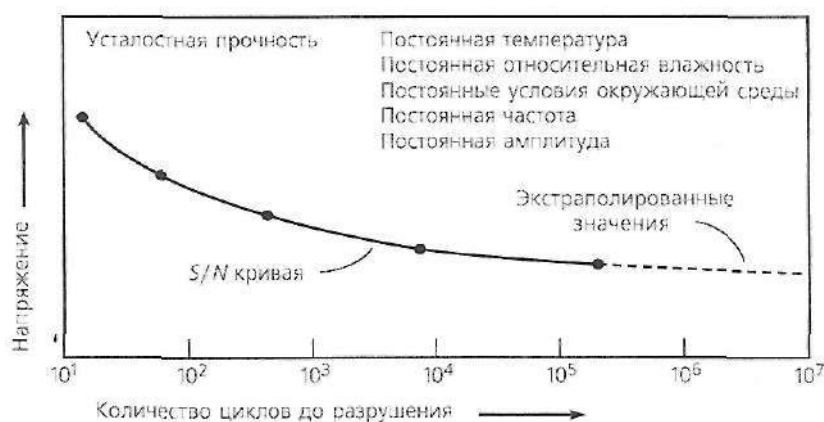


Рис. 4.78. Типичная кривая S/N (S — разрушающее напряжение, N — количество циклов) для полимерного материала

В других случаях изделия подвергаются нагрузке противоположного знака, и напряжение меняется от растягивающего к сжимающему. Полные циклы растяжения-сжатия считаются наиболее жесткими условиями испытаний [37]. Результаты усталостного теста на практике будут зависеть от большого числа параметров, значения которых выше или ниже тех, которые наблюдаются в условиях реального нагружения. Геометрическая форма образца и частота нагружения оказывают сильное воздействие на температурный гистерезис. При высоких частотах скорость выделения тепла может быть больше, чем скорость рассеяния тепла. Это приведет к размягчению полимера, изменению его морфологии и понижению сопротивления нагреванию. Частоты, которые обычно используются для оценки усталостных свойств полимерных материалов, лежат в диапазоне частот от 1 до 30 Гц [1,36]. Ускоренные испытания проводятся при частотах, равных (или возможно больших) 30 Гц (1800 циклов/мин) и, как правило, используются для металлов и практически неприменимы для пластмасс. Предпочтительней проводить испытания в диапазоне частот около 1 Гц, поскольку при этом отсутствует тепловыделение, однако уменьшение частоты приводит к возрастанию времени и стоимости испытаний.

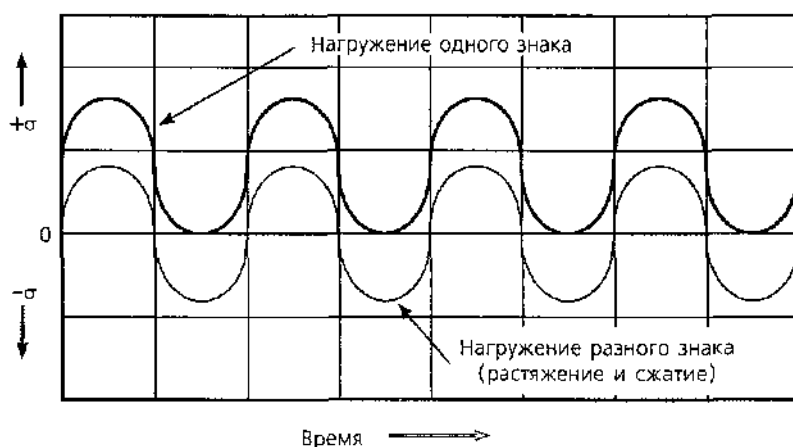


Рис. 4.79. Закон динамического нагружения оказывает существенное влияние на срок службы изделия. Например, циклические напряжения могут быть только одного или разного знака (растяжение и сжатие)

В идеальном случае частота нагружения при тестировании должна быть не меньше той, которая будет использоваться в конкретном применении изделия. Должна быть также учтена геометрия испытуемого образца. Такие факторы, как чистота образца, наличие усадочных пустот, отношение площади к объему, качество поверхности, остаточные поверхностные напряжения и степень ориентации образца являются одними из основных. Теоретически, использование хладагентов может ускорить испытания, но следует учитывать, что факторы окружающей среды оказывают очень большое влияние на усталостные свойства. Например, как было показано выше, вода уменьшает усталостную прочность ПК до 30 % [15].

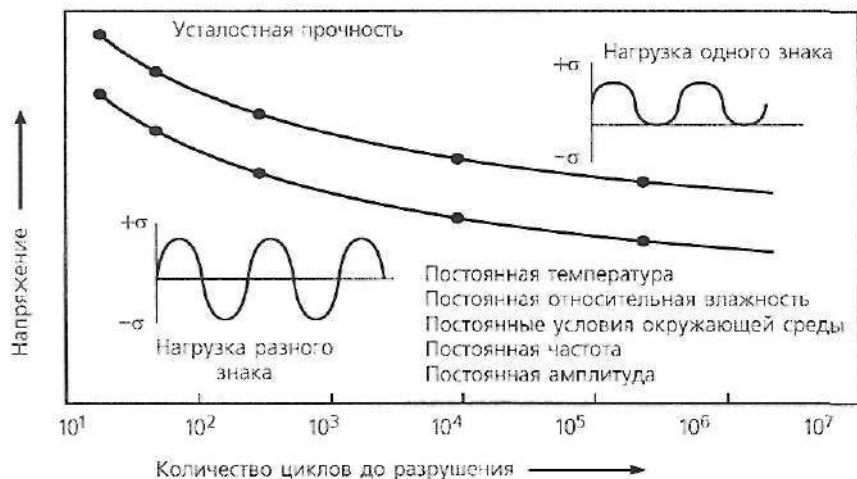


Рис. 4.80. Усталостные свойства пластмассы зависят от закона нагружения и некоторых других факторов

Рекомендации при разработке нового изделия, использующегося в усталостном режиме:

- закладывать при проектировании низкие уровни напряжения;
- уменьшать частоту нагрузок по мере возможности;
- для улучшения теплопередачи необходимо:
 - избегать толстостенных участков;
 - использовать ребра/ребристость для охлаждения;
 - использовать принудительное охлаждение воздухом;
- использовать материалы с малым гистерезисом;
- использовать материалы с высокой теплопроводностью;
- использовать материалы с высокой термостойкостью;
- использовать материалы, имеющие хорошо смазанные поверхности [36,37].

С помощью метода конечных элементов можно получить надежные данные об усталостных свойствах изделия, но эти результаты будут ошибочны, если геометрическая форма, условия нагружения и окружающей среды будут не точны [12,15,36].

При разработке изделий, подвергающихся усталостным нагрузкам, обычно закладываются высокие значения коэффициентов запаса прочности (хотя при этом следует избегать участков с толстыми стенками). Но замены тщательной экспериментальной оценке изделия не существует, особенно в тех случаях, когда оно подвергается усталостной нагрузке [38].

4.9.3. Ударная нагрузка

Классические уравнения, используемые для оценки напряжений и деформаций балок, пластин и оболочек, применимы только в ситуациях, когда нагрузки являются статическими или их изменение происходит достаточно постепенно. Однако

во многих случаях внешние нагрузки возникают быстро (в течение короткого периода времени) и их следует считать ударными или импульсными.

Если какой-нибудь предмет, например, книга, падает на лоток для бумаги (см. рис. 4.55), то это приведет к напряжениям и деформациям, которые в течение короткого времени будут намного больше напряжений и деформаций, возникающих в условиях статической нагрузки. Моментальное возрастание напряжения или деформации, вызванное кинетической энергией падающего тела, должно быть демпфировано. Если материал, использующийся для изготовления изделия, имеет упругие свойства, тогда восстановление напряжений и деформаций будет проходить по законам статического нагружения. Однако когда величина ударной нагрузки превышает критическое значение, происходит разрушение. Особенно важно учитывать ударные нагрузки при низких температурах (например, когда температура изделия становится меньше температуры стеклования полимера, из которого оно изготовлено).

Теоретические оценки напряжений, деформации и прогибов изделий, подвергающихся ударным нагрузкам, очень сложны и требуют динамического анализа. Приблизительные оценки могут быть сделаны с помощью классических формул для расчетов напряжений и деформаций. Рассчитанные таким образом аппроксимационные значения могут оказаться неоправданно высокими в сравнении с зависимостями напряжения от деформации, полученными в обычных условиях [2, 12, 24]. Тем не менее зависимости напряжения от деформации для полимерных материалов существенно зависят от скорости деформирования (см. рис. 4.15). Методы оценки ударного сопротивления изделий существенно различаются, и, к сожалению, получить экспериментальные данные не всегда возможно. Дополнительные сложности возникают из-за того, что скорость деформирования не всегда постоянна для деформируемого изделия. Кроме того, распределение напряжений в изделии, подвергаемом ударным нагрузкам, не будет совпадать с распределением напряжения в случае нагрузки, приложенной статически. В особенности это справедливо для тех случаев, когда тело, падающее на изделие, оказывает на него неравномерное воздействие (например, книга, падающая на лоток, может сначала упасть на его край). Очень трудно конструировать изделия, которые подвергаются ударным нагрузкам. Особенности конструкции, вызывающие концентрацию напряжений, такие как углы, отверстия и т. п., еще более существенны при ударном нагружении изделия. Очень важно, чтобы изделия, предназначенные для использования в условиях ударных или импульсных нагрузок, проходили тщательное тестирование в условиях ударного воздействия, ожидаемого в условиях эксплуатации.

Еще раз следует заметить, что нет альтернативы тщательному исследованию изделия, используемого в условиях динамических нагрузок [12, 24]. С помощью решения уравнений может быть получены лишь приблизительные значения:

$$y_i / y_s = \sigma_i / \sigma_s = V / (g \cdot y_s)^{1/2}, \quad (4.60)$$

где V — скорость удара; g — ускорение свободного падения.

Индекс i относится к значениям, связанным с ударными прогибами (деформациями) или напряжениями; индекс s относится к статическим значениям прогибов (деформации) или напряжения.

Пример 4.10. Ударное нагружение круглой пластины

Рассмотрим следующий пример: груз массой 10 фунтов падает в центр пустого контейнера, который показан на рис. 4.81, с высоты, Z , равной 12 дюймам.

Круглая плоская однородная пластина

- Постоянная толщина
- Нагрузка равномерно распределена по площади центрального круга
- Фиксированные края

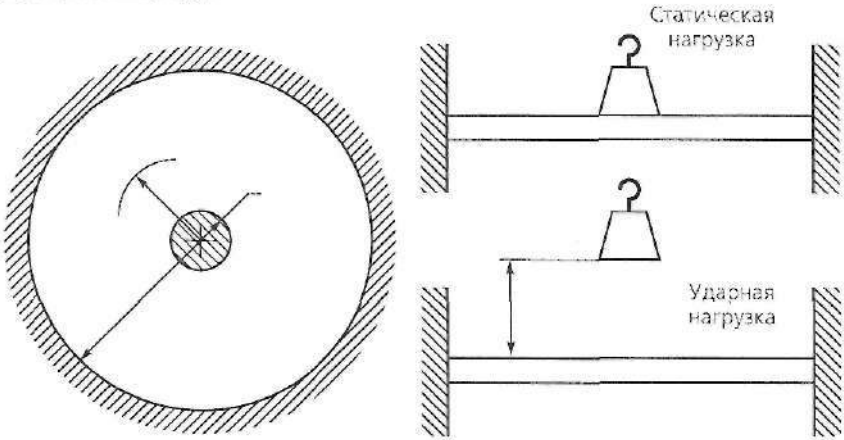


Рис. 4.81. Мгновенные значения напряжений и прогибов, возникших в результате воздействия ударной нагрузки существенно больше, чем соответствующие статические значения

Нижняя часть контейнера имеет форму диска с фиксированными краями. Если размер груза весом, W , мал по сравнению с диаметром круглой пластины и нагрузка приложена внутри малой нейтральной области, тогда уравнения для максимального прогиба (при $z = 0$) в условиях статической нагрузки будут выглядеть следующим образом:

$$y_s = -[W \cdot a^2(3 + \nu)] / [16 \cdot \pi \cdot D(1 + \nu)], \tag{4.61}$$

где ν — коэффициент Пуассона; D — константа пластины, которая определяется из уравнения:

$$D = E \cdot t^3 / [12 (1 - \nu^2)]. \tag{4.62}$$

Используя значение модуля упругости, полученное из кратковременных испытаний, $E = 300\,000$ фунт/дюйм² и коэффициент Пуассона 0,35; при толщине пластины $t = 0,125$ дюйма константа пластины будет равна:

$$D = (300\,000)(0,125)^3 / [(12)(1 - 0,35^2)] = 55,6 \text{ фунт/дюйм}. \tag{4.52}$$

Максимальный статический прогиб:

$$y_s = -[(1,0)(5)^2(3 + 0,35)] / [(16)(3,14)(55,6)(1 + 0,35)] = -0,022 \text{ дюйм}. \tag{4.61}$$

Скорость мгновенного удара, V , в результате падения груза с высоты, Z , равной 12 дюймов (предполагается, что начальная скорость груза равна 0) будет равна:

$$V = V_0 - (2 \cdot g \cdot h)^{1/2}; \quad (4.63)$$

$$V = 0 - [(2)(386)(12)]^{1/2} = -96,2 \text{ дюйм/с.}$$

Прогиб при ударе будет:

$$y_i = y_s \cdot V / (g \cdot y_s)^{1/2}; \quad (4.60)$$

$$y_i = -(0,022)(96,2) / [(386)(0,022)]^{1/2}.$$

Полученное таким образом значение максимального прогиба при ударе кажется слишком высоким, однако такая разница в величинах статического и динамического прогиба и напряжений только подчеркивает особое внимание, которое надо проявлять к ударным нагрузкам, и сколь важен вопрос о минимизации напряжений в зонах их концентрации.

Небольшие закругления, бобышки, косынки, фланцы, острые углы и изменения толщины стенок должны особым образом учитываться в расчетах. Поверхностные дефекты и даже текстура поверхности под воздействием значительных растягивающих напряжений могут стать местом концентрации напряжений [36]. Тщательное размещение линий спая, уменьшение остаточных напряжений и ориентации — все это также относится к важным факторам при проектировании изделий, подвергающихся ударным нагрузкам. В конструкцию изделий, подвергающихся ударным нагрузкам, полезно включить элементы, поглощающие энергию, такие как: гибкие элементы, вибрационные демпфирующие крепления или прокладки и т. п., где это только возможно. Следует также отметить, что зависимости напряжения от деформации для полимерных материалов обычно получают при невысокой скорости, хотя мгновенная скорость объекта, упавшего с высоты 12 дюймов, составляет 96 дюймов/с. Для того чтобы получить более точные сведения, тестирование должно проводиться в диапазоне скоростей и температур, как можно более соответствующих эксплуатационным условиям. Материалы, проявляющие пластичные свойства при комнатной температуре или при малых скоростях деформирования, при низких температурах или высоких скоростях деформирования могут проявлять хрупкие свойства [35].

4.10. Литература

1. Structural Plastics Design Manual, American Society of Civil Engineers, ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 63, April (1982).
2. Roark, R. and Young, W., Formulas for Stress & Strain, 5th ed., McGraw Hill, NY (1975).
3. Crate, J., Plastics Design Forum, 9 (4), 77 (1984).
4. Lee, C, Dubin, A., Elmer, D., SPE Annual Technical Conference, 37, 912 (1987).
5. Trantina, G., Minnichelli, M., SPE Annual Technical Conference, 37, 438 (1987).
6. Levy, S. and DuBois, J., Plastics Product Design Engineering Handbook, 2nd ed., Chapman and Hall, NY (1984).
7. Rolfe, S., and Barsom, J., Fracture & Fatigue Control in Structures, Applications in Fracture Mechanics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1977).
8. Technical Bulletin, Lelij, J., Engineering Design, E.I. DuPont de Nemours & Co., Wilmington, DEU991).

9. Technics! Bulletin, «Cabibre Polycarbonate Design Manual», Dow Chemical Company, Midland, MI (1988).
10. Mehta, K., SPE Annual Technical Conference, 38, 2058 (1992).
11. Technical Bulletin, Marks, F., Engineering Design, E.I. DuPont de Nemours & Co., Wilmington, DE (1989).
12. Technical Bulletin, «Designing with Plastics», Hoescht Celanese, Chatham, NJ (1989).
13. Aklonis, J., MacKnight, W., and Shen, M., Introduction to Polymer Viscoelasticity, Wiley Interscience, NY (1972).
14. Throne, J., and Progelhof, R., «Creep and Stress Relaxation» in Engineered Materials Handbook Vol 2, ASM, Metals Park, OH (1988),
15. Technical Bulletin, «Polycarbonate Design Manual», Mobay Corporation, Pittsburgh, PA.
16. Technical Bulletin, «Lexan Design Guide», General Electric Company Pittsfield, MA.
17. Beer, F. and Johnson, E., Mechanics for Engineers, McGraw Hill, NY (1976).
18. Anonymous, Plastics Design Forum, 15 (6), 42 (1990).
19. Allied Signal Corporation, Morristown, NJ.
20. Technical Bulletin, «Ultem Design Guide», General Electric Company Pittsfield, MA.
21. Technical Bulletin, «Delrin Acetal, Module III», E.I. DuPont de Nemours & Co., Wilmington, DE.
22. Technical Bulletin, «Noryl Design Guide», General Electric Company Pittsfield, MA.
23. Technical Bulletin, «Valox Design Guide», General Electric Company Pittsfield, MA.
24. Technical Bulletin, «Engineering Materials Design Guide», General Electric Company, Pittsfield, MA.
25. Throne, J., and Progelhof, R., SPE Annual Technical Conference, 35, 1637 (1989).
26. Nakayama, K., Mikio, K., and Motoichi, Y., SPE Annual Technical Conference, 32, 690 (1982).
27. Lifshay, A., Plastics Design Forum, 5 (2), 59 (1980).
28. Carnpo, E. A., Plastics Design Forum, 7 (6), 55 (1982).
29. Stuttgart, U., Kunststoffe, 72 (12), 24 (1982).
30. Menges, G. and Mohren, P., How to Make Injection Molds, Hanser, NY (1986).
31. Technical Bulletin, Tuschak, P., Engineering Design, E.I. DuPont de Nemours & Co., Wilmington, DE.
32. Gebler, H. and Racke, H., Kunststoffe, 72 (1), 17 (1982).
33. Anonymous, Plastics Design Forum, 1 (5), 25 (1976).
34. Technical Bulletin, Weckman, R., Engineering Design, E.I. DuPont de Nemours & Co., Wilmington, DE (1988).
35. Nimmer, R., «Impact Loading» in Engineered Materials Handbook, Vol 2, ASM, Metals Park, OH (1988).
36. Technical Bulletin, Hawley, J., Design Success Through Solution Engineering, Eastman Chemical Performance Plastics.
37. Levy, S., Plastics Design Forum, 2 (5), 42 (1977).
38. Yelle, H., and Estabrook, E., «Fatigue Loading» in Engineered Materials Handbook, Vol 2, ASM, Metals Park, OH (1988).
39. Technical Bulletin, Tuschak, P., Engineering Design, E.I. DuPont de Nemours & Co. Wilmington, DE (1989).
40. Hornberger, L. and DeVries, K., SPE Annual Technical Conference, 32, 672 (1986).
41. Powell, P., Engineering with Polymers, Chapman and Hall, NY (1983).

5. Прототипирование: изготовление и использование прототипов пластмассовых изделий

5.1. Прототипирование¹

Прототипирование является неотъемлемой частью подготовки производства пластмассовых изделий. Прототипирование позволяет получить ценную техническую информацию, провести маркетинговое исследование нового изделия на рынке, проверить некоторые функциональные свойства CAD-модели и будущего изделия, и многое другое.

5.1.1. Технологии прототипирования

Прежде чем приступить к серийному производству пластмассового изделия, необходимо изготовить один, а иногда даже несколько вариантов прототипов. В последнем случае это приводит к дополнительным затратам, однако их не избежать при

Прототипирование — процесс' изготовления прототипов пластмассовых изделий. Прототип (греч. — *protolypori*) — первоначальный образец; здесь — образец пластмассового изделия; физическая (материальная) модель или точная копия изделия; мастер-модель изделия, по которой создается форма для изготовления самого изделия-прототипа или (в зависимости от технологических особенностей материала формы и условий ее эксплуатации) малой (опытной) партии изделий. — *Примеч. науч. ред.*

работе с новыми или незнакомыми материалами, проектировании изделий сложной геометрической формы или отдельных нагруженных, несущих деталей — на практике требуется узнать реальные усадочные характеристики пластмассы, оценить возможности выдерживания допусков размеров и т. д. Отмеченное в равной степени относится к двум группам прототипов: точным факсимильным копиям изделий (для оценки внешнего вида и в других прикладных целях) и технологическим (полученным в опытной литейной форме для оценки процесса и некоторых свойств отливок [1, 2]).

Современные программные продукты *CAD/CAM/CAE-систем* позволяют анализировать процессы заполнения литейной формы, ее охлаждения, усадки и коробления отливок и т. д., дают ответы на вопросы, которые раньше можно было получить только после выполнения пробных циклов литья [3]. Компьютерная модель изделия позволяет получить информацию о расположении линий спая, потенциально слабых местах конструкции и наличии воздушных ловушек, склонности к короблению и возникновению внутренних напряжений в отливке (см. главу 2). Она помогает оптимизировать разработку технологического процесса и выбирать рациональные варианты конструкции изделия. Использование программных продуктов для анализа снижает, как минимум, необходимость изготовления большого числа модификаций конкретного формующего инструмента. Но прототипы позволяют решать не только аналитические прогнозные, но и насущные задачи производства, значительно ускоряя производственный цикл изготовления изделий, максимально способствуя обеспечению качества готовой продукции.

Существует много технологий изготовления прототипов пластмассовых изделий. Конкретный их выбор зависит от размеров изделий, средств и времени, которыми располагают разработчики, а также от того, насколько близки эксплуатационные характеристики прототипа и готового изделия. К основным технологиям изготовления прототипов относятся:

- механическая обработка;
- фотополимеризация;
- стереолитография;
- лазерное спекание порошковых материалов;
- послойное наложение расплавленной полимерной нити;
- склеивание (ламинирование) слоев;
- литье в эластичные силиконовые формы;
- литье под низким давлением;
- создание твердотельных объектов с помощью принтеров;
- изготовление моделей из вспененных пластмасс;
- литье прототипов в опытных формах.

Практически по любой из перечисленных технологий может быть получен прототип, модель, имеющие качественный внешний вид. Но реальную информацию о технических характеристиках изделия, его пригодности для изготовления литьем под давлением в массовом производстве и о соответствии заданным допускам на размеры предоставляет наиболее полно литье в опытной форме. Химические, термомеханические, электрические и размерные характеристики отливок зависят от процесса переработки. Это означает, что точная оценка технологического процесса возможна,

если прототип отлит из того же материала, который предполагается использовать в серийном производстве. Если стоимость и временные затраты на получение такого прототипа превышают допустимые производством возможности, ограничиваются (как было указано ранее) только компьютерным моделированием или другими способами моделирования, которые, к сожалению, не позволяют ответить на большинство вопросов, связанных с особенностями процесса литья под давлением.

5.1.2. Изготовление прототипов механической обработкой

Обычно используют традиционные способы механической обработки: сверление, разрезание, фрезерование, токарная обработка, а также, в меньшей степени, шлифование. Заготовки для изготовления прототипов — отлитые или экструдированные пластмассовые прутки, стержни, профили или листы. Иногда, перед декорированием и отделкой, прототип собирают или склеивают из нескольких деталей — пластмассовых, деревянных и металлических [1,4-6].

Механическая обработка позволяет получать прототипы с высокой точностью (до $\pm 0,025$ мм) [1]. Рекомендуемые технологические процессы и параметры механической обработки некоторых термопластов приведены в табл. 5.1 [7]. При механической обработке пластмасс нужно учитывать их специфические физические свойства, а именно: пластмассы являются хорошими изоляторами, и заготовки в процессе обработки могут нагреваться; размеры разогретой детали могут существенно отличаться от размеров остывшей из-за высокого коэффициента теплового расширения (КТР): локальный разогрев вызывает расширение в зоне обработки и может привести к трещинам, утяжинам и деформации прототипа.

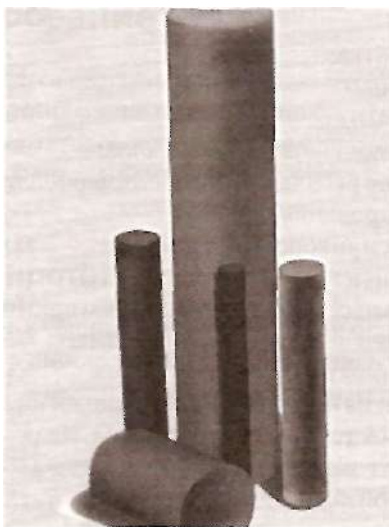


Рис. 5.1. Набор прутковых заготовок, которые служат исходным материалом для изготовления прототипов механической обработкой

Таблица 1. Параметры наиболее распространенных технологических процессов механической обработки некоторых термoplastов*

Материал	Параметры	Разрезание		Токарная обработка		Сверление	Фрезерование	Развертывание
		циркулярная пила	ленточная пила	обтачивание	нарезание резьбы			
Полиформальдегиды	Окружная скорость, футы ² в мин	4000–6000	600–2000	450–600	600	300–600	1000–3000	350–450
	Скорость подачи, дюйм/оборот	Быстрая, плавная		0,0045–0,010	0,003–0,004	0,004–0,015	0,004–0,016	0,0055–0,015
	Инструмент	Быстрорежущая инструментальная сталь; твердосплавный режущий						
	Задний боковой угол резца, град	От 20 до 30		От 10 до 25	От 10 до 25	От 10 до 25	От 10 до 20	
	Передний угол резца, град	0	От 0 до 15 (положительный)	От 0 до 5 (положительный)	От 0 до 15 (положительный)	От 0 до 10 (положительный)	От 0 до 5 (отрицательный)	От 0 до 10 (положительный)
	Угол при вершине сверла, град					От 90 до 118		
	Охлаждение			Сухой воздух, пар				
Акрилы	Окружная скорость, футы ² в мин	8000–12000	8000–12000	300–600	450–500	200–400	300–600	250–400
	Скорость подачи, дюйм/оборот	Быстрая, плавная		0,003–0,008	0,003–0,004	Медленная, устойчивая	0,003–0,010	0,006–0,012
	Инструмент	Быстрорежущая инструментальная сталь; твердосплавный режущий						
	Задний боковой угол резца, град	От 10 до 20		От 10 до 20	От 10 до 20	От 12 до 15	15	

* Ориентировочная обобщенная справочная информация. — Примеч. науч.ред.

Таблица 5.1. Окончание

Материал	Параметры	Разрезание		Токарная обработка		Сверление	Фрезеро- вание	Разверты- вание
		циркулярная пила	ленточная пила	обтачивание	нарезание резьбы			
Акрилы	Передний угол реза, град	От 0 до 10 (положительный)		От 0 до 5 (положитель- ный)	От 0 до 15 (положитель- ный)	От 0 до 5 (отрицательный)		От 0 до 10 (отрицатель- ный)
	Угол при вер- шине сверла, град Охлаждение					118		
Фторопласты	Окружная скорость, футы ² в мин	1000–12000	5000–7000	400–700	425–475	200–500	1000–3000	300–600
	Скорость по- дачи, дюйм/ оборот	Быстрая, плавная		0,002–0,010	0,003–0,004	0,002–0,010	0,004–0,016	0,006–0,015
	Инструмент	Быстрорежущая инструментальная сталь; твердосплавный режущий						
	Задний боко- вой угол реза, град	От 20 до 30		От 15 до 30	От 10 до 25	20	От 7 до 15	От 10 до 20
	Передний угол реза, град	От 0 до 5 (положитель- ный)	От 0 до 10 (положитель- ный)	От 0 до 5	От 3 до 15 (положитель- ный)	От 0 до 10 (отрицатель- ный)	От 3 до 15 (положитель- ный)	От 0 до 10 (отрицатель- ный)
Полиамиды	Угол при вер- шине сверла, град Охлаждение					От 90 до 118		
	Окружная скорость, футы ² в мин	4000–6000	4000–6000	500–700	700	180–450	1000–3000	300–450
	Скорость по- дачи, дюйм/ оборот	Быстрая, плавная		0,002–0,016	0,002–0,016	0,004–0,015	0,004–0,016	0,005–0,015

Полиамиды	Инструмент	Быстрорежущая инструментальная сталь; твердосплавный режущий						
	Задний боковой угол реза, град	От 20 до 30		От 5 до 10	От 7 до 15	От 10 до 15	От 7 до 15	
	Передний угол реза, град	15	От 0 до 15	От 0 до 5	От 0 до 5	От 0 до 5	От 0 до 10	
	Угол при вершине сверла, град	(положительный)	(положительный)		(положительный)	(отрицательный)	(положительный)	
	Охлаждение				От 90 до 110 (1/2" положительный) 118 больше 1/2"			
Полиолефины	Охлаждение	Сухой воздух, пар						
	Окружная скорость, футов ² в мин	1650 - 5000	3900 - 5000	600-800	425-475	200-600	1000-3000	280 - 600
	Скорость подачи, дюйм/оборот	Быстрая, плавная		0,0015-0,025	0,003-0,004	0,004-0,020	0,06-0,020	0,006-0,012
	Инструмент	Быстрорежущая инструментальная сталь; твердосплавный режущий						
	Задний боковой угол реза, град	15		От 15 до 25	От 15 до 25	От 10 до 20	От 10 до 20	От 10 до 20
	Передний угол реза, град	От 0 до 8	От 0 до 10	От 0 до 15	От 3 до 15	От 0 до 5	От 0 до 10	От 0 до 10
	Угол при вершине сверла, град	(положительный)	(положительный)		(положительный)	(положительный)	(положительный)	(отрицательный)
	Охлаждение	Сухой воздух, пар						
						От 90 до 118		



Рис. 5.2. Обработка прототипа пластмассового изделия на станке с ЧПУ

- На всех операциях механической обработки необходимо стремиться к устранению внутренних напряжений, которые возникли при изготовлении заготовки и могут привести к изменению размеров со временем или при повышении температуры.
- Тепло, возникшее в пластмассовой заготовке в процессе ее обработки, не рассеивается так же быстро, как в металлах, и поэтому может быть достигнута температура, соответствующая размягчению материала. Однако применения агрессивных охладителей следует избегать, поскольку они способствуют возникновению трещин. Такие методы охлаждения как обдув воздухом, водяной туман (или распыленная вода), мыльные водяные растворы и водорастворимые масла, также должны применяться с осторожностью. Охлаждение сжатым воздухом избавляет от необходимости чистки прототипа после механической обработки.
- При фиксации заготовки перед обработкой очень важно убедиться, что локальные деформации, напряжения в ней отсутствуют. В некоторых случаях могут потребоваться специальные зажимы. Иногда для закрепления пластмассовых заготовок используется скотч-лента.
- Для непродолжительной обработки на станках допускается использование обычного инструмента; для длительной обработки рекомендуются алмазный инструмент или из карбида вольфрама. Инструмент должен быть всегда очень острым. Все контактные поверхности должны быть тщательно отполированы.

Пластмасс, которые рационально подвергать механической обработке, довольно мало; это полиформальдегиды (ПФ), полиамиды (ПА), поливинилхлориды (ПВХ), поликарбонаты (ПК), АБС-пластики, некоторые другие высокотемпературные материалы, обладающие высоким модулем упругости, например, полиимиды и армированный фенолоформальдегидный слоистый пластик. К сожалению, прототипы.

полученные механической обработкой или собранные из деталей, полученных механической обработкой, не дают сведений о влиянии на качество изделия технологических факторов и режимов [4, 5]. Свойства таких прототипов будут отличаться от свойств отливок, даже если они изготовлены из одного и того же базового материала, с тем же набором добавок, с одинаковой молекулярной массой, морфологией и степенью ориентации. Иногда допускается изготовление прототипа изделия механической обработкой пластины, полученной литьем под давлением или литьевым прессованием из материала, который будет использоваться для производства изделия. Но и в этом случае степень ориентации, линии спая, характеристики поверхности, а также другие эффекты, возникающие в процессе переработки, не будут эквивалентны тем, которые характерны для серийных изделий [5].

Прототипы, изготовленные механическим обработкой, могут быть как дорогими, так и дешевыми — это зависит от их сложности, требуемого качества и необходимого количества.

В некоторых случаях, например, когда прототип служит мастер-моделью для изготовления опытной литьевой формы, он необходим в единственном экземпляре, поэтому механическая обработка — наиболее подходящий вариант. Для простых изделий может оказаться рентабельным изготовление механической обработкой десятка прототипов (до получения прототипа приемлемого качества), в то время как для сложных изделий изготовление механической обработкой даже двух прототипов неприемлемо по экономическим причинам.

Станки с ЧПУ и компьютерные С/Ш-системы помогают снизить производственные затраты на изготовление прототипов изделий, имеющих сложную геометрическую форму, например, модель протеза (рис. 5.3). Но все же могут потребоваться значительные производственные затраты на установку, фиксацию, а также ручную чистовую обработку каждого прототипа изделия по отдельности. Метод механической обработки пластмассовой заготовки до сих пор широко применяется для изготовления единичных прототипов. Эта технология является универсальной, поскольку использует доступное механическое оборудование и промышленные полимерные материалы.

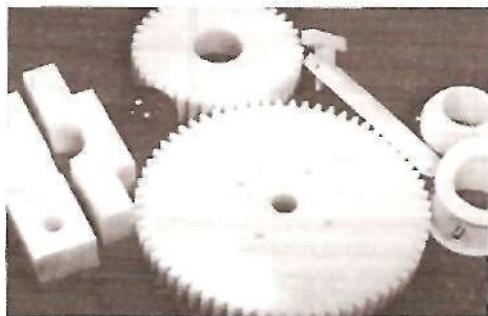


Рис. 5.3. Модели пластмассовых изделий, изготовленные из цилиндрической заготовки механической обработкой: слева — детали узла привода; справа — модель протеза

5.1.3. Некоторые технологии быстрого прототипирования

В последнее время активно развиваются технологии быстрого прототипирования, использующие компьютерные CAD-системы. Они сокращают время получения прототипов пластмассовых изделий исключительно сложной конструкции до нескольких часов. Процесс получения модели делится на следующие стадии (рис. 5.4):

- задание геометрии изделия с помощью CAD-системы (получение объемной модели);
- послойное разделение объемной модели на дискретные двухмерные (2D) слои;
- послойное изготовление трехмерной (3D) модели.

Технологии быстрого прототипирования устраняют возможность неправильной интерпретации модели изделия изготовителем формы (рис. 5.5, 5.6).



Рис. 5.4. Последовательность технологии быстрого прототипирования



Рис. 5.5 Сравнение технологий: традиционный метод механической обработки и быстрое Прототипирование

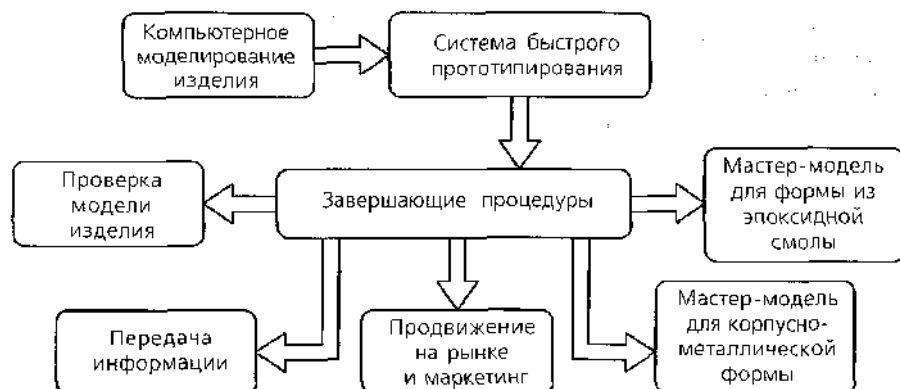


Рис. 5.6. Прототипы, изготовленные по технологии быстрого прототипирования могут использоваться для самых различных целей

5.1.3.1. Прототипирование методом фотополимеризации

Первые коммерческие технологии прототипирования были основаны на фотополимеризации [8-19]. По технологии, которая была названа стереолитографией (*JSLA, Stereo Lithography Apparatus®*) [20], можно получать прототипы сложных изделий в течение короткого времени цикла разработки. Процесс начинается с изготовления компьютерного оригинал-макета изделия [21].

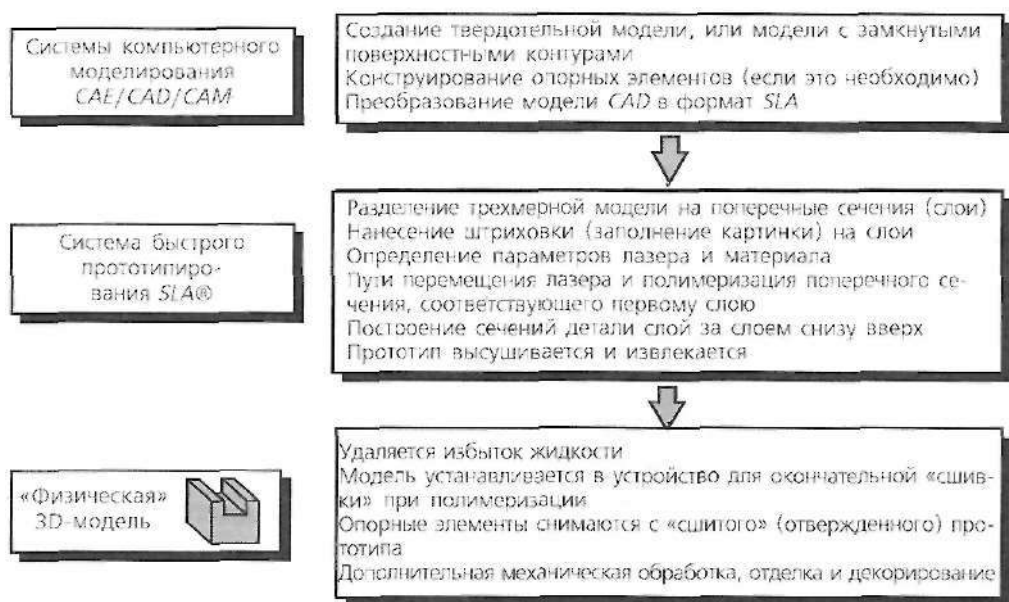


Рис. 5.7. Этапы быстрого прототипирования методом фотополимеризации

Далее 3D-модель разделяется на поперечные сечения (слои) толщиной 0,005–0,020 дюймов (0,013–0,51 мм) с помощью специальной программы. Построение сечений изделия протекает слой за слоем снизу вверх до тех пор, пока не будет полностью получен физический прототип. Оборудование для стереолитографии стоит довольно дорого (рис. 5.8, 5.9) [8].

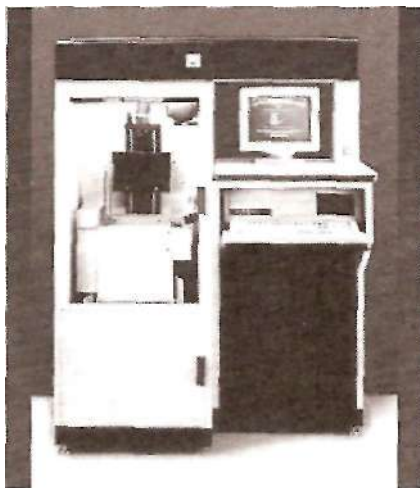


Рис. 5.8. Установка для быстрого прототипирования по технологии SLA



Рис. 5.9- Аппарат для полимеризации, используемый вместе с установкой по технологии SL\

Схема процесса прототипирования методом фотополимеризации (по технологии стереолитографии) приведена на рис. 5.10. Оборудование для стереолитографии состоит из УФ-лазера и соответствующей оптической системы, направляющего зеркала, емкости со светочувствительным материалом, очистителем поверхности, подъемным устройством, способным осуществлять перемещение вдоль оси z с заданным шагом, равным толщине слоя (установка соединена с моделью, разделенной на слои). Гелий-кадмиевый или ионный аргоновый УФ-лазер генерирует и фокусирует луч, направляющийся подвижным зеркалом на различные места на плоскости $x-y$ [19]. Стол подъемного устройства находится вблизи поверхности на расстоянии, равном толщине слоя. Лазер, активирующий реакцию, сканирует двухмерную поверхность, выполняя сложные перемещения и «сшивая» материал в соответствующих областях — жидкий полимер сшивается только там, где его касается лазерный луч. Новый слой жидкого полимера распространяется по отвердевшей поверхности, и контур следующего слоя вычерчивается лазером. Процесс повторяется автоматически до полного построения прототипа, после чего он извлекается, сушится и очищается. Чистка осуществляется спиртом, растворителем или ультразвуком [8,9].



Рис. 5.10. Схема прототипирования методом фотополимеризации

Для этой технологии используются различные фотополимеризующиеся жидкости. После «сшивки» пластмассовые изделия могут обладать свойствами хрупких, стекловидных, пластичных или даже резиноподобных материалов [21, 22]. Степень полимеризации определяется суммарным количеством световой энергии, поглощенной светочувствительным материалом. Чтобы предотвратить избыточное облучение лазером ранее облученных нижних слоев, свет не должен проникать на глубину,

большую определенного значения. В изделия могут быть предусмотрены сливные отверстия, чтобы упростить его перемещение в емкости во время формования. Извлеченный прототип находится, как любой частично «сшитый» материал, в размягченном состоянии и с ним надо обращаться очень осторожно.

Затем прототип устанавливают на вращающийся стол внутри аппарата для полимеризации, где под действием УФ-излучения большой интенсивности завершается процесс «сшивки» [22].

В стереолитографии раньше использовались только хрупкие пластмассы, но в настоящее время стали доступны более совершенные материалы с малой усадкой, пластичные или даже резиноподобные. Один из наиболее эластичных материалов близок по свойствам к АБС-пластикам со средними значениями ударной прочности [11,18]. Кроме того, сейчас появились новые материалы на основе эпоксидных смол, которые имеют на порядок меньшую усадку, чем обычные материалы на основе акрила. Малая усадка дает возможность существенно повысить размерную точность прототипа [11].

Исходную модель, выполненную в С/Ш-системе, обычно корректируют, чтобы можно было установить вспомогательные опорные элементы (подпорки). Они удаляются в процессе отделки.

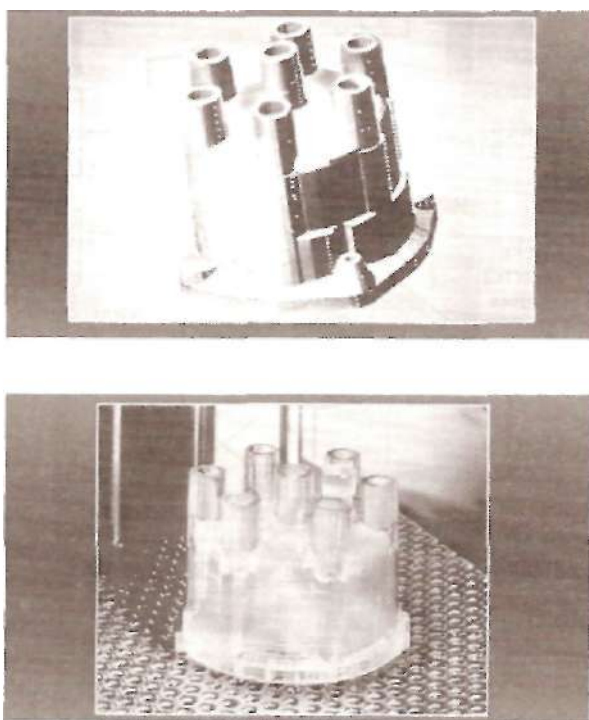


Рис. 5.11. С/Ш-объемная модель крышки распределителя зажигания (вверху) и прототип, изготовленный по технологии *SLA* (внизу)

Время, необходимое для конструирования и получения прототипа, зависит от сложности изделия. Время формирования слоев может быть сокращено за счет создания внутренней пористой структуры. Она заполняет пространство между внутренней и наружной стенками прототипа, и полимеризация завершается в ходе последующей (дополнительной) «сшивки» [9].

Изделия, отверждающиеся по традиционной технологии, напротив, содержат до 40-60% жидкого полимера между твердыми топкими стенками прототипа. Это является причиной коробления и возникновения внутренних напряжений. Усадка и коробление могут происходить даже после извлечения прототипа из аппарата полимеризации. Чтобы минимизировать коробление, был разработан метод «переплетения», который позволяет быстро достигать 96-98 %-ной степени «сшивки» модели [19]. Время изготовления существенно зависит от размера прототипа и требуемой точности размеров. Размеры прототипов, изготовленных по технологии *SLA*, могут достигать 51 x 51 x 61 см. Стандартные изделия среднего размера и средней или повышенной сложности изготавливают целиком в течение нескольких часов [8, 13]. Очень большие изделия могут быть изготовлены по частям, а затем части соединяют шпонками или склеивают.

Ключевым вопросом является выбор исходной ориентации прототипа изделия. Наружная сторона прототипа обычно становится верхней. Поскольку процесс основан на приращении слоев, это приводит к появлению слоистой ступенчатой структуры на вертикальных стенках, наклонных или рельефных поверхностях. Меньший шаг приращения повышает качество таких поверхностей, но увеличивает время изготовления прототипов. Плоские или перпендикулярные поверхности изготавливать проще всего.

Прототипы, полученные методом фотополимеризации, необходимо освобождать от подпорок и проводить чистовую обработку поверхности с помощью ручной пескоструйной или дробеструйной очистки (рис. 5.12) [11, 19]. После чистовой обработки прототипы могут быть окрашены, тонированы или декорированы (рис. 5.13) [8-10].

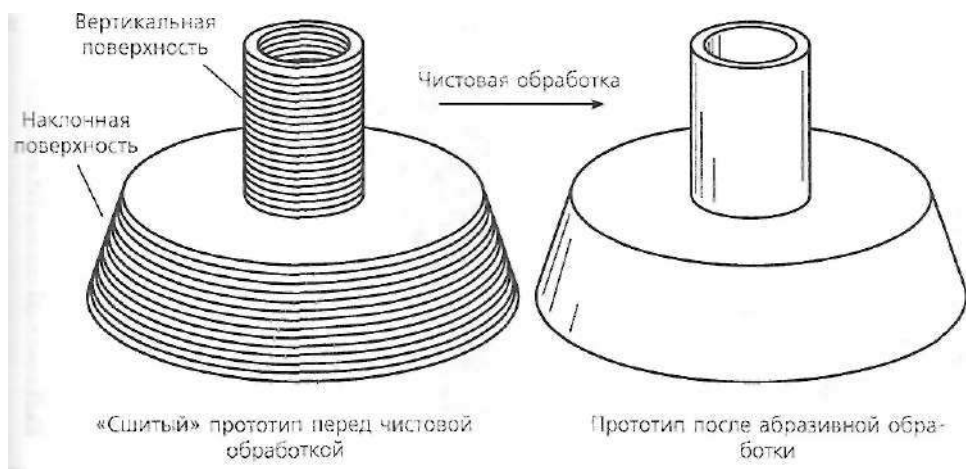


Рис. 5.12. Прототип до обработки (слева); прототип после обработки (справа)

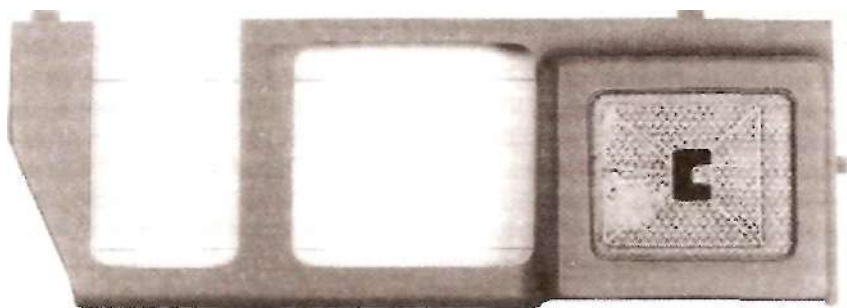


Рис. 5.13. Обработанный и окрашенный прототип, полученный по технологии быстрого прототипирования

Сейчас на рынке представлено несколько разновидностей описанной технологии [19,23-26].

5.1.3.2. Лазерное спекание порошковых материалов

Другой технологией в области быстрого прототипирования является лазерное спекание порошковых материалов (*SLS, Selective Laser Sintering®*) [27]. Этот процесс в некоторой степени аналогичен *SLA*, поскольку, чтобы получить прототип, здесь также используют мощный лазер (лазер на диоксиде углерода). В этой технологии вместо жидкого фотополимера используют порошок термопласта. Эта технология позволяет получать прототипы изделия из того же материала, что и само изделие [28-29]. Следует учитывать, что процессы литья и спекания сильно отличаются, и прототипы, изготовленные по *SLS*, не могут стать полноценной заменой отлитых моделей изделий (рис. 5.14).

Процесс лазерного спекания схематически изображен на рис. 5.15. Он начинается с создания объемной модели изделия в CAD-системе, которая затем разбивается

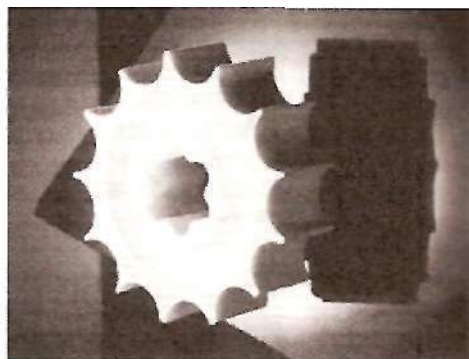
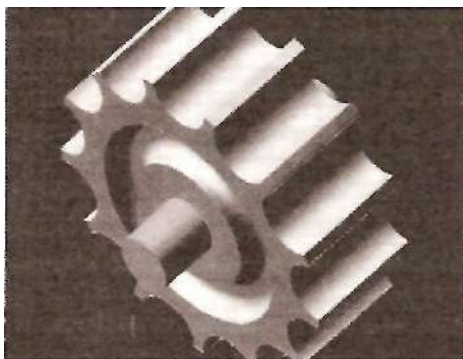


Рис. 5.14. CAD-объемная модель шестеренки привода (слева) и прототип, изготовленный по технологии лазерного спекания (справа)

на поперечные слои толщиной 0,005-0,020 дюймов (0,13 до 0,51 мм). После этого прототип слой за слоем воссоздается в емкости, заполненной термопластом или воском.

Стационарный лазер генерирует луч, который отражается от направляющего зеркала, задающего поперечное сечение x -у слоя, перпендикулярного оси z . В данном случае, в отличие от 51Л-технологии, лазерный луч является не источником света, а источником тепла. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу в соответствии с геометрией детали. Поршень, на который устанавливают опорную платформу, и формирующийся прототип опускаются на шаг вдоль оси z , а емкость с порошком открывается. Новый слой порошка укладывается с помощью выравнивающего вала, затем процесс повторяется. Преимущество данной технологии заключается в том, что неспекшийся порошок, окружающий затвердевшие участки изделия, становится опорной структурой, поддерживающей слабые области изделия [19]. Теоретически для прототипирования по такой технологии может быть использован порошок любого термопласта. При этом мощность лазера должна соответствовать характеристикам его спекания. Чаще всего для 515-прототипирования используют ПК, ПА и ПВХ [15,19,28,29].

Лазерное спекание порошковых материалов может быть использовано для изготовления оформляющих вставок, матриц и пуансонов при изготовлении опытных форм. Обоймы матриц и пуансонов создают напрямую за счет спекания смеси металлического порошка со связующим полимерным материалом. Затем такие детали нагревают в печи, где они приобретают пористую металлическую структуру. После этого детали нагревают в медном фильтрате (медь пропитывает детали) и получают

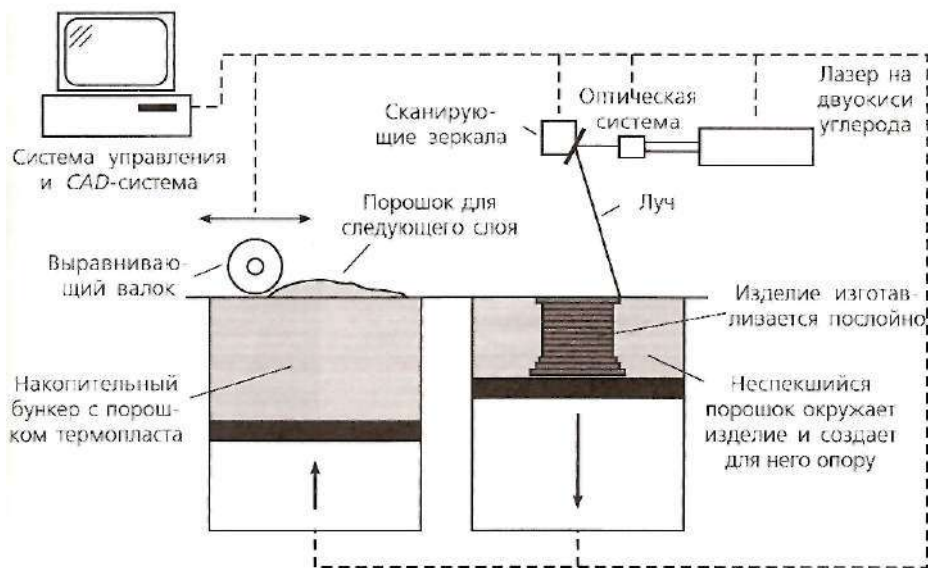


Рис. 5.15. Схема технологии быстрого прототипирования путем лазерного спекания порошковых материалов

пуансон и матрицу из плотного твердого сплава [11, 12]. Эта технология позволяет создавать за короткое время не только прототип изделия, но и опытные формы непосредственно из металлического порошка [19]. Износостойкость подобного «быстрого» формующего инструмента находится в границах между износостойкостью алюминия и стали Р-20.

5.1.3.3. Послойное наложение расплавленной полимерной нити

Процесс прототипирования по технологии послойного наложения расплавленной полимерной нити (*FDM, Fused Deposition Manufacturing®*) также начинается с создания разделенной на слои 3ГК модели, полученной в CAD-системе; толщина слоев составляет 0,001-0,050 дюймов (0,025-0,13 мм). Для получения прототипа через экструзионную головку с контролируемой температурой подается нить из термопласта диаметром приблизительно 0,050 дюймов (0,13 мм) [30]. Перемещение головки в плоскости *x-y* осуществляется с помощью компьютера (рис. 5.16). Горячий материал очень тонкими слоями наносится на неподвижное основание. Последующие слои ложатся на предыдущие, отвердевая и соединяясь друг с другом. При изготовлении изделий сложной геометрической формы автоматически генерируются опорные элементы для нависающих фрагментов модели. Установки работают с различными «моделирующими» термопластами, которые используются и в производстве готовых изделий.

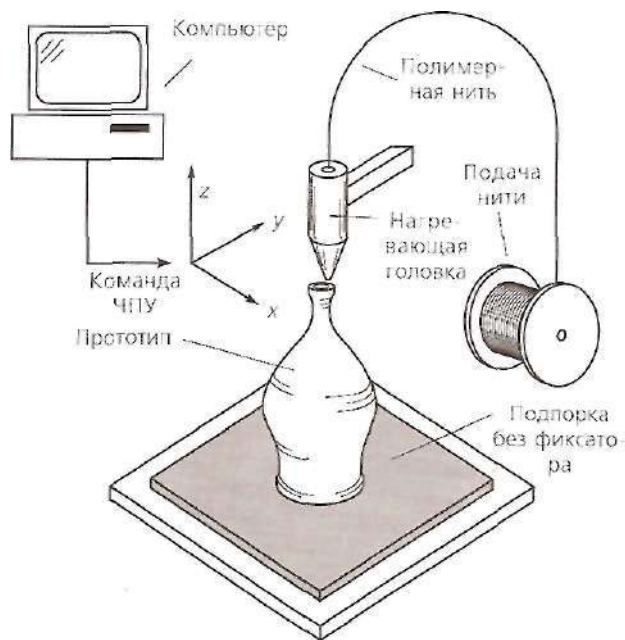


Рис. 5.16. Схема технологии прототипирования послойным наложением расплавленной полимерной нити (слева); модель, изготовленная по этой технологии (справа)

FZW-установки имеют относительно несложное устройство, а простота технологии позволяет затрачивать на изготовление прототипов считанные часы (в зависимости от размера модели).

После изготовления прототип можно практически сразу использовать: ему не требуется длительная дополнительная обработка [11,15,19,30,31].

5.1.3.4. Прототипирование склеиванием (ламинированием) слоев

При изготовлении моделей прототипов ламинированием слоев (*ЮМ, Laminated Object Manufacturing®*) также используется лазер на основе двуокиси углерода, настроенный на глубину одного слоя [32]. Материал, в качестве которого используются бумага с декоративным покрытием, полимерный или композиционный материал, находится в рулонах, из которых подается в устройство, где лазер по заданной траектории вырезает слои, соответствующие поперечным сечениям модели. Толщины листов, которые используются в данной технологии, составляют 0,002-0,010 дюйма (0,051-0,25 мм). Модель изготавливается послойно (с нижнего слоя до верхнего). Отдельные листы укладываются один на другой и привариваются горячим валком [17,19].

5.1.4. Имитация поверхности готового литьевого изделия на прототипе

Часто необходимо, чтобы прототипы изделий, изготовленные механической обработкой или собранные из разных деталей, имели бы тот же цвет поверхности, глянец и текстуру, что и готовое изделие. Большинство формованных изделий однородно окрашены по всему объему и обладают блеском и текстурой, которые «создаются» при переработке. Очень трудно имитировать такую же поверхность, используя традиционные методы декорирования прототипов. Конструктор может оценить внешний вид изделия, сделав контрольные отливки в форме дисков с различной окраской, текстурой и шероховатостью поверхности. Прототипы, предназначенные для маркетинговых оценок, подвергаются отделке и традиционной технологии окрашивания [33].

5.1.4.1. Цвет и качество поверхности готового литьевого изделия

Требования к качеству поверхности матриц и пуансонов установлены стандартами *SP1ⁱ* [34] или другими нормативами.

Поверхность изделия не обязательно зеркально отображает рабочую поверхность формующего инструмента (особенно когда используются пластмассы с высокой вязкостью или наполненные материалы). Естественные неровности рабочей поверхности (такие как следы от впускных литников или видимые линии спая) меньше проявляются на матовой или рельефной поверхности. Для оценки влияния реального состояния рабочей поверхности формующего инструмента и параметров процесса переработки на цвет *PI* качество поверхности готового изделия необходимо изготовить в опытной форме изделия из того же полимерного материала (со всеми требуемыми ингредиентами), который будет использован в серийном производстве. Если

есть предположения, что на поверхности изделия может произойти «выпотевание» и концентрация каких-либо ингредиентов (добавок) в виде налета или выделения капель и т. п., необходимо детально отработать технологию в лабораторных условиях, для чего используют стандартные формы для получения контрольных образцов или любую «старую» литевную форму (желательно, чтобы была возможность получать изделие с участками различной текстуры).

Идеально, если есть возможность для сравнительной оценки изготовить набор изделий с разными текстурами и шероховатостью поверхности. Прототип даст возможность конструктору визуально оценить внешний вид изделия. Контрольный прототип также может быть использован как хороший индикатор, отражающий влияние изменений условий переработки на внешний вид изделия. Кроме того, прототип используют для оценки физических свойств и усадки материала.

Таблица 5.2. Имитация поверхности готового пластмассового изделия при ее ручной обработке

Обозначение поверхности литевой формы по стандартам SPI/SPE ¹	Обозначение поверхности изделия по стандартам SPI	Среднеквадратическое значение величины шероховатости, мкм	Технологические операции при ручной обработке поверхности изделия
#1	A-1	0,5–1,0	Добавить прозрачный лак в цветную грунтовку Поверхность изделия подвергнуть пескоструйной обработке и отполировать шлифовальной пастой Нанести на поверхность изделия несколько слоев прозрачного лака Обработать поверхность изделия лаковым растворителем (для выравнивания поверхности)
#2	A-3	1,0–2,0	Добавить прозрачный лак в цветную грунтовку Нанести на поверхность изделия прозрачный лак Выровнять поверхность изделия пескоструйной обработкой (песок 600) Равномерно обработать поверхность изделия шлифовальной пастой, совершая движение в одном направлении, оставляя только тонкие царапины
#3	B-3	7,0–7,5	Добавить прозрачный лак в цветную грунтовку Поверхность изделия подвергнуть пескоструйной обработке (песок 600)
#4	C-3	12–15	Добавить прозрачный лак в цветную грунтовку Поверхность изделия подвергнуть пескоструйной обработке (песок 400)
#5	D-2	26–32	Добавить прозрачный лак в цветную грунтовку
#6	D-3	160–190	К смеси для покрытия изделия добавлены компоненты, придающие ей текстуру «под замшу»

¹ Society of Plastics Engineers — Международное общество инженеров по производству, переработке и применению пластмасс.

5.1.4.2. Технологии имитации поверхности готового литьевого изделия на прототипе

Гладкие поверхности

Чтобы внешний вид прототипа совпадал с внешним видом проектируемого изделия, модели, полученные механической обработкой, обычно шлифуются и окрашиваются. Для окраски могут быть использованы автомобильные краски — в виде лаков и эмалей и наносятся распылителем. При этом лаки наиболее предпочтительны, так как они создают защитную пленку отличного качества. Эмали обеспечивают лучший блеск и отличаются хорошей текучестью при распылении, но на таком покрытии чаще возникают поверхностные дефекты [33]. Мичанд описал несколько методов нанесения лаковых покрытий, которые могут быть использованы для имитации различных поверхностей [34,35]. Сначала прототип грунтуется герметиком для защиты материала от агрессивных растворителей, которые содержатся в лаке. Затем наносится грунтовка (прочная твердая краска), которая создает на поверхности необходимую шероховатость. Рекомендуется использовать грунтовки светло-серого цвета, поскольку они лучше отражают свет.

Таблица 5.3. Обозначения поверхности литевой формы (по стандартам SPI)

Обозначение поверхности литевой формы по стандарту SPI (новое обозначение)	Обозначение поверхности литевой формы по стандарту SPI/SPE (старое обозначение)	Обработка поверхности формирующей полости литевой формы Средства обработки
A-1	#1	#3 алмазный полировальный круг (1–5 мкм /9000–7000 эквивалент зернистости)
A-2	—	#6 алмазный полировальный круг (4–8 мкм /5000–2500 эквивалент зернистости)
A-3	#2	#15 алмазный полировальный круг (8–22 мкм /1300–900 эквивалент зернистости)
B-1	—	600 наждачная бумага
B-2	—	400 наждачная бумага
B-3	#3	320 наждачная бумага
C-1	—	600 абразивный камень
C-2	—	400 абразивный камень
C-3	Прибл. #4	320 абразивный камень
D-1	—	Сухие стеклянные шарики, дробеструйная обработка
D-2	#5	Сухие окислы, дробеструйная обработка
D-3	#6	Дробеструйная обработка сухими окислами

Глубокие царапины можно устранить нанесением шпаклевки или нескольких слоев грунтовки. Затем на загрунтованную поверхность наносят покрытие на лаковой основе. Белое покрытие лучше подходит для создания поверхности пастельных тонов, а темно-серая грунтовка используется для темных тонов. Поверхность прототипа

[34, 35] может быть подготовлена шлифованием и механической обработкой (см. табл. 5.2) [31].

В настоящее время существует 12 стандартов *SPI*, в отличие от 6 стандартов *SPI/SPE*, которые существовали ранее. Все обозначения поверхности литьевой формы и подготовки поверхности описаны в новом стандарте *SPI*, основы которого приведен в табл. 5.3 [34].

Имитация текстурных поверхностей

Некоторые текстурные поверхности можно получить при распылении краски под высоким давлением. В качестве альтернативы иногда используют вулканизацию при комнатной температуре, с помощью которой можно получить поверхность нужной структуры. Другой способ — нанесение на поверхность формирующей полости вязкой краски или специального покрытия, которые создают тонкую эластичную текстурную пленку, остающуюся на поверхности прототипа [33].

5.1.5. Литье под низким давлением

Последние достижения в области литья пластмасс привели к широкому распространению технологии литья под низким давлением [1,36,37], позволяющей получать с относительно небольшими затратами относительно большое количество прототипов изделий и малые партии готовых изделий.

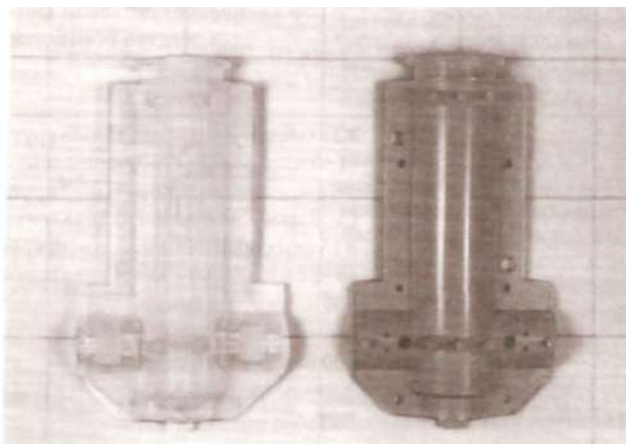


Рис. 5.17. Прототип, полученный с помощью стереолитографии, используется в качестве мастер-модели для изготовления силиконовой литьевой формы (слева); цветная отливка из полиуретана, изготовленная в силиконовой литьевой форме (справа)

Технология литья под низким давлением требует сначала создания мастер-модели. Она может быть изготовлена из дерева, пластмассы (например, винилового пластизоля), мягкого металла или глины, и будет использована в качестве шаблона для литьевой формы, которую обычно изготавливают из силикона с отвердителем. Форма может состоять из двух или более частей (компонентов), и поэтому па мастер-модели

необходимо иметь хорошо выраженные линии разреза и места расположения впускных литников.

Из жесткого гипса, который используют в меньшей степени, обычно получают простые модели — с закругленными краями, без поднутрений. Одноразовый растворимый в воде гипс позволяет получить прототипы сложной геометрической формы. Гипс имеет относительно короткое время затвердевания, но до достижения максимальной прочности при толщине стенок 2-4 дюйма (51-102 мм) необходимо до 72 ч [38]. Перед использованием оснастка из гипса должна быть абсолютно сухой.

Наиболее популярным материалом для литейной формы остается силикон. Он отлично воспроизводит структуру поверхности, имеет сравнительно большой срок службы (может выдерживать до 25 циклов литья), стоек к химическому воздействию, эластичен (допускает поднутрения ограниченных размеров), имеет малую усадку, а также устойчив при транспортировке. «Быструю» форму можно получить и из других материалов, однако тогда потребуются специальные дополнительные механизмы для извлечения изделий. Современное оборудование для изготовления литейных форм, позволяет быстро и качественно их изготавливать [37]. Смешение силикона с отвердителем производится автоматически под вакуумом.

Форма может быть изготовлена разными способами:

Если прототип геометрически относительно не сложен и может быть сделан целиком, то на мастер-модели все имеющиеся отверстия заклеивают липкой лентой, которую, кроме того, наклеивают на торец стенки прототипа по линии будущего разреза формы. Затем закрепляют литники и выпоры. При необходимости поверхность прототипа покрывают разделительной смазкой или специальными лаками для создания требуемой текстуры. Подготовленный таким образом прототип подвешивают в опалубке и полностью заливают силиконом с отвердителем (рис. 5.18), а опалубку целиком помещают в установку для дополнительной дегазации. Отверждение на воздухе производится при комнатной температуре в течение 24 ч. Далее блок силикона с прототипом извлекают из опалубки, разрезают по волнистой линии острым ножом на 2 части до цветной ленты, которая далее служит линией разреза. Прототип и выпоры извлекают.

Если прототип достаточно сложен конструктивно, имеет большие габариты, то может потребоваться отливка двух полуформ: матрицу и пуансон отливают отдельно и последовательно (рис. 5.19).

Перед началом изготовления формы изготавливают опалубку — из дерева, металла, пластмассы или пенопласта, и она должна быть по всем габаритным размерам на несколько сантиметров больше прототипа. Линия разреза полуформ может быть сделана с помощью подмодельной плиты или формовочной глины. Подмодельная плита и глина также служат опорой для прототипа в процессе изготовления формы. После отверждения силикона опалубку с литейной формой переворачивают и подмодельную плиту (глину) удаляют. После очистки прототип покрывают разделительной смазкой, и заливают вторую полуформу. Вентиляционные и литниковые каналы отливают напрямую или изготавливают механически после отверждения формы. Литниковая система должна иметь такую конфигурацию, чтобы она способствовала воздушной вентиляции в момент заполнения литейной формы [1].

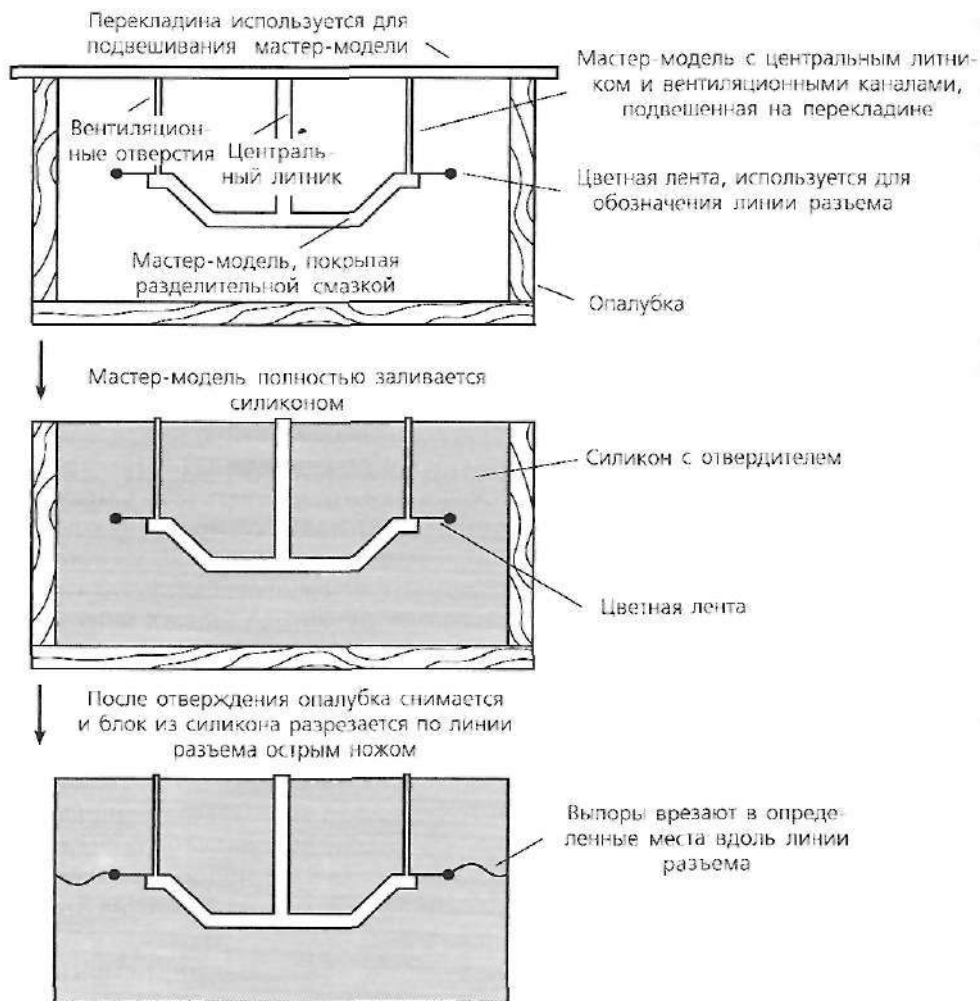


Рис. 5.18. Последовательность действий при изготовлении силиконовой формы

Поскольку силикон относится к вязким материалам, небольшие отверстия изготавливают с помощью оформляющих вставок и знаков. Они обычно выточены из металла или отлиты из пластмассы и крепятся к верхней полуформе (рис. 5.20 и 5.21). Вставки увеличивают срок службы литейной формы, упрочняя тонкие зоны изделия, и способствуют извлечению изделия с глубокими поднутрениями.

Прототипы и даже малые партии изделий отливают из эпоксидных смол, термоактивных сложных полиэфиров или полиуретанов в силиконовых формах. Перед заполнением литейной формы пластмассы с низкой вязкостью тщательно смешивают и подвергают вакуумной деаэрации. Современные установки позволяют осуществлять смешение и литье под вакуумом.

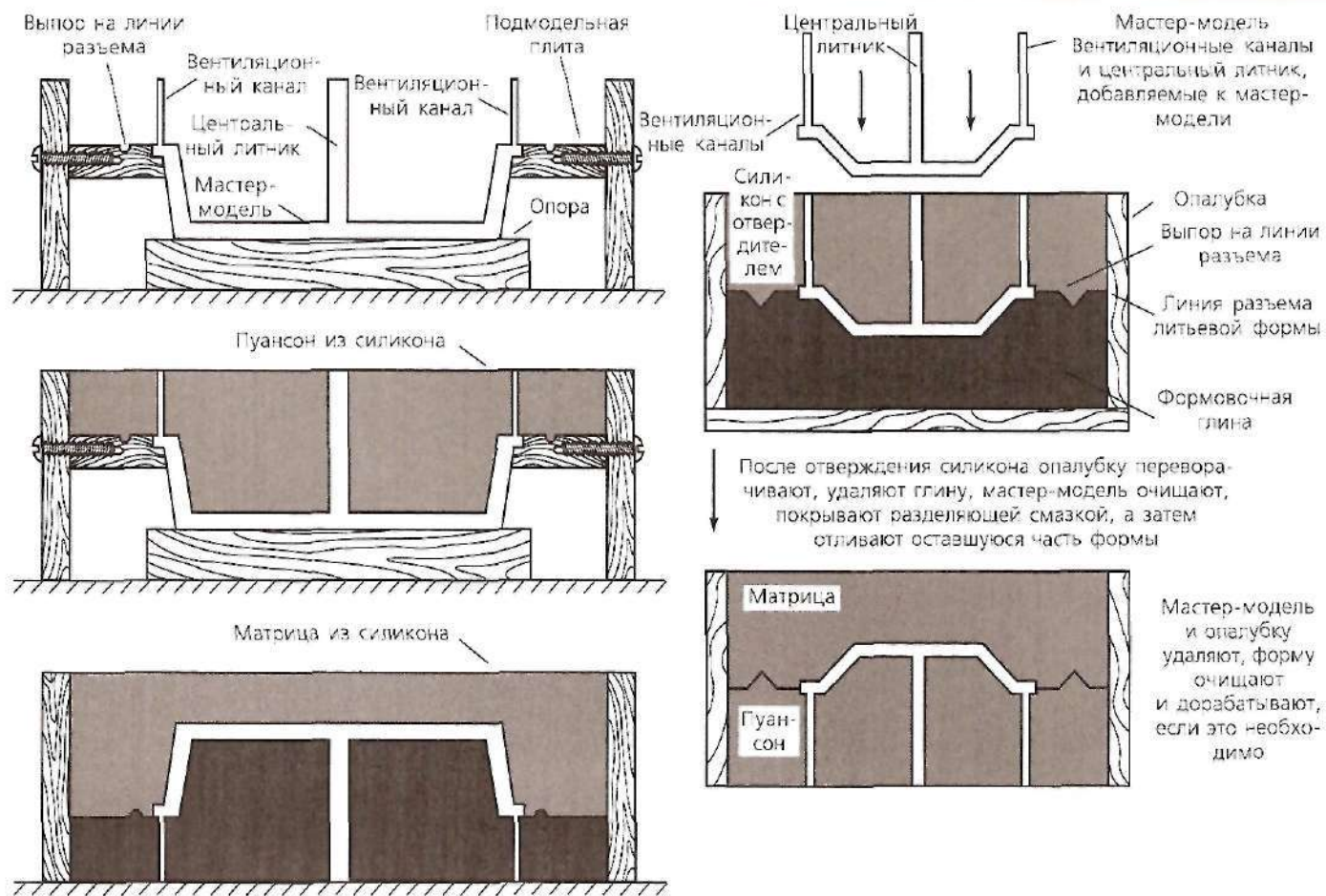


Рис. 5.19. Этапы получения двух силиконовых полуформ с использованием подмодельной плиты (слева); получение двух полуформ с использованием формовочной глины (справа)

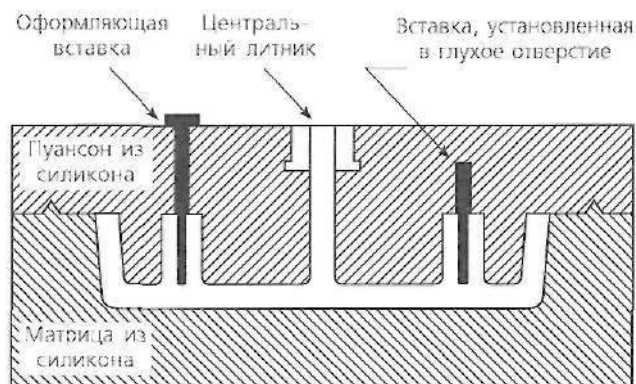


Рис. 5.20. Оформляющие вставки для образования отверстий. Альтернативный способ нелучения отверстий — последующая механическая обработка

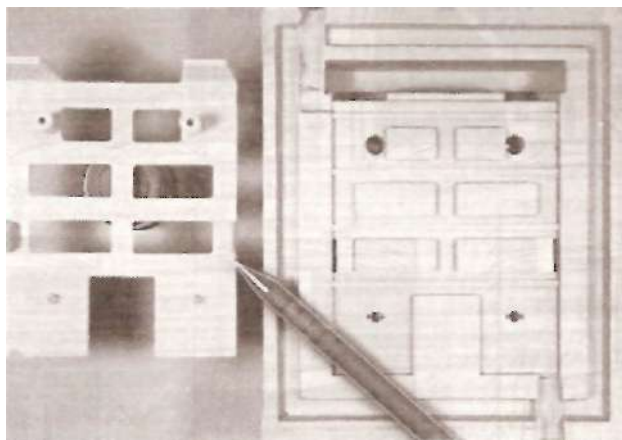


Рис. 5.21. Изделие, отлитое из полиуретана (слева) и силиконовая литевая форма (справа), в которой установлены алюминиевые оформляющие вставки

Все инструменты и емкости для смешения должны быть тщательно очищены и вытерты насухо, поскольку влага и загрязнения негативно влияют на процесс отверждения [36]. Предварительный нагрев материала может временно снизить его вязкость, что важно для заполнения тонкостенных участков, но это сокращает срок службы заливочной установки. Отверждение прототипа происходит в термощкафу, благодаря чему возможно получить плотную структуру материала без утяжин [1]. Если отверждение протекает при комнатной температуре, процесс может занять до 24 ч, в зависимости от типа и марки полимерного материала.

Наибольшее распространение для изготовления изделий литьем в силиконовые формы получили полиуретаны. Прочность некоторых марок близка к прочности АБС-пластика (при несколько пониженной термостойкости).

Огнестойкие марки полиуретанов имеют уровень защиты от УФ-облучения — 94 V-0 для образцов толщиной 1/4 дюйма (5,4 мм); существуют также прозрачные марки [1, 36, 39]. Красители либо смешивают с полимером, либо изделие окрашивают уже после отливки. Полиуретаны обладают малой усадкой, но при получении точных размеров готового изделия могут возникнуть трудности. В таких случаях следует измерять размеры прототипов и первый пригодный использовать в качестве новой модели.

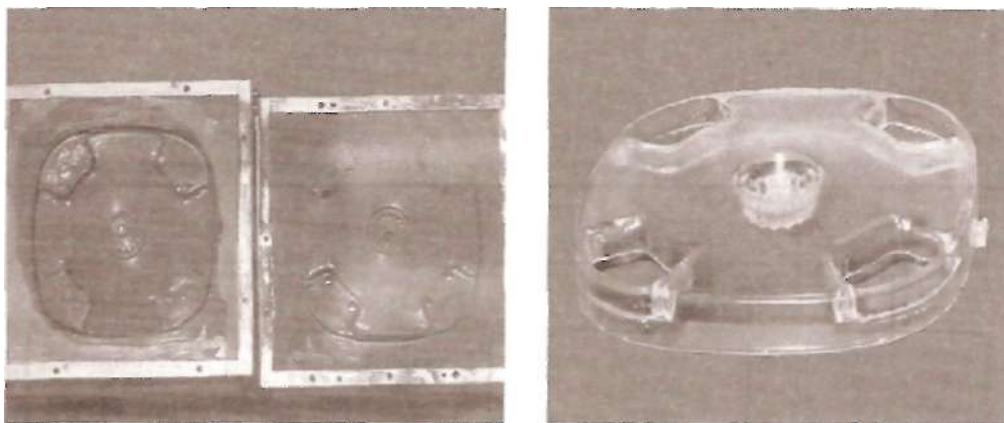


Рис. 5.22. Прототип крышки (справа), изготовленный из прозрачного полиуретана литьем в силиконовую форму (слева).

5.1.6. Формы для изготовления прототипов

В практике производства находит применение термин «опытная форма». Конструктор изделий под опытной формой понимает так называемую «быструю» (*rapid*) форму, не предназначенную для серийного производства, а используемую для изготовления прототипа или малой партии готовых изделий. Конструктор формы под опытной формой может понимать модель, которая была изготовлена для получения ответа на вопрос: правильно ли спроектирована литьевая форма. Стандарты *SPI* классифицирует литьевые формы и оформляющие вставки в них в соответствии с их качеством и сроком службы. Классификация опытных форм основана на тех же стандартах [40].

Бюджет изготовления опытной литьевой формы включает стоимость изготовления 3/)-моделей и, если необходимо, ее модификаций. Цикл изготовления прототипа в форме иногда может быть больше, чем время отливки серийного изделия. Это объясняется и меньшей «мощностью» системы охлаждения такой формы, и ее ручной установкой.

Прототипы и готовые изделия, которые получены в опытной форме, могут требовать некоторой дополнительной обработки или изменения конфигурации и корректировки размеров и поверхности.

Таблица 5.4. Система классификации литьевых форм по стандарту SPI

Обозначение классов	Усилие смыкания литьевой формы, т	Предполагаемое количество циклов	Условная оценка производительности литьевой формы
101	< 400	$> 1 \times 10^6$	Высокая
102	< 400	$< 1 \times 10^6$	От средней до высокой
103	< 400	$< 5 \times 10^5$	Средняя
104	< 400	$< 1 \times 10^5$	Низкая
105	< 400	$< 5 \times 10^2$	Только для прототипирования
401	> 400	$> 5 \times 10^5$	Высокая
402	> 400	$< 5 \times 10^5$	От средней до высокой
403	> 400	$< 1 \times 10^5$	От средней до высокой
404	> 400	$< 5 \times 10^2$	Только для прототипирования

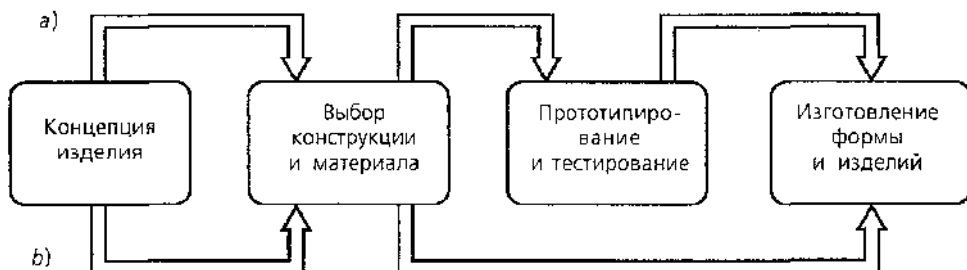


Рис. 5.23. Самый продуктивный путь разработки изделий (а) включает прототипирование хотя путь (б) изначально выглядит более прямым, он не дает возможности выявить возможные проблемы до начала серийного производства изделия. Вели вероятность, что этот путь станет более дорогим и на него придется потратить больше времени

Опытная форма чаще всего является одногнездовой с одним впускным литником. Но чем крупнее прототип, тем больше для него такая форма не подходит. У таких прототипов, как, например, автомобильный бампер, могут возникнуть проблемы с вилковыми линиями спая (рис. 5.24). В таком случае очень важно выдержать при изготовлении прототипов производственные технологические параметры и геометрические соотношения возможно более близкими к реальным. Опытная форма должна быть сконструирована с учетом числа, типа и расположения впускных литников и конфигурации системы охлаждения [3,5]. Кроме того, может быть более выгодно сконструировать для прототипов форму из эластичных полимеров. Определенное число вероятных литниковых систем может быть встроено в опытную форму заранее, если считается, что расположение литников может создать определенные проблемы (см. рис. 5.27) [3,5].

В тех случаях, когда прототипирование проводится не в целях отработки технологии и качества изделий, а для маркетинговых исследований, прототипы могут быть

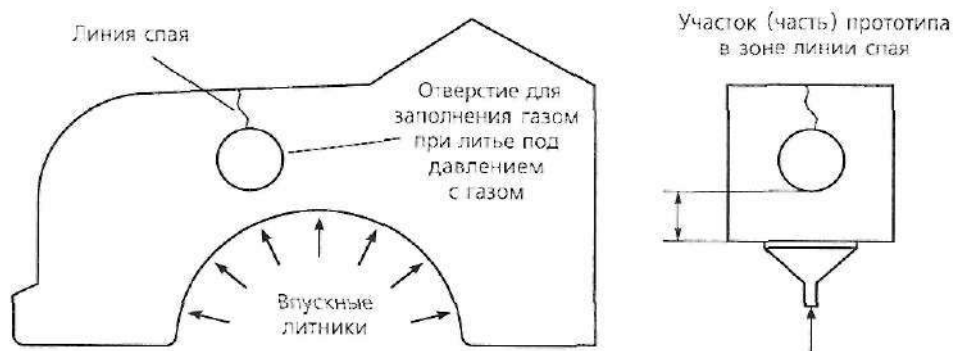


Рис. 5.24. Прототип изделия с упрощенной геометрией, использующийся для анализа качества определенных участков (в данном случае, это участок линии спая)

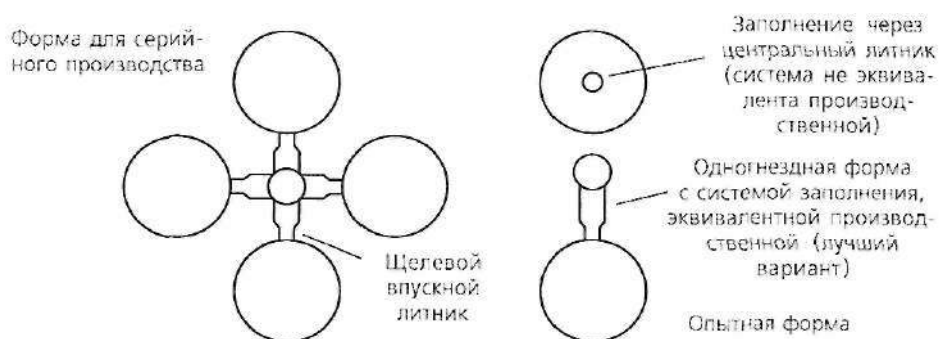


Рис. 5.25- Прототипы должны изготавливаться в тех же условиях заполнения формирующей полости, которую планируется использовать при изготовлении готового изделия

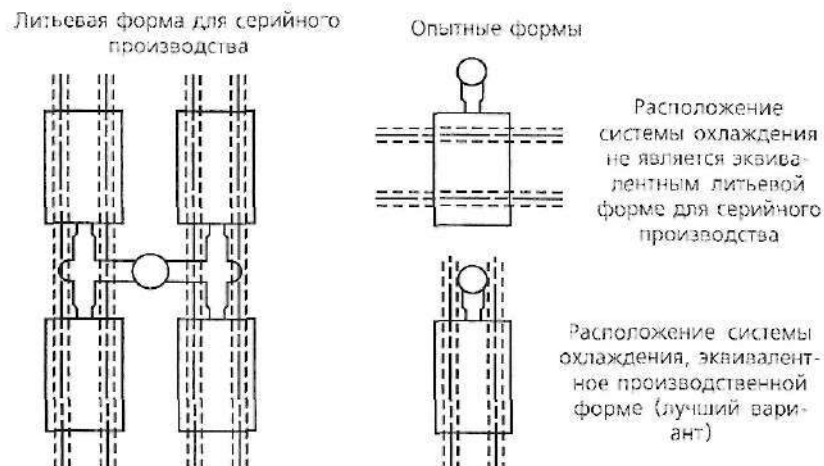


Рис. 5.26. Система охлаждения опытной формы должна соответствовать системе охлаждения, которая будет использоваться в форме для серийного производства

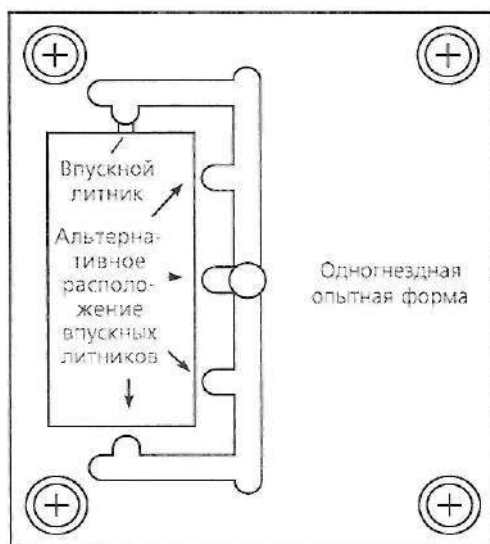


Рис. 5.27. Опытная форма должна быть универсальной. В данном случае определенное количество впускных литников размешено для экспериментальной оценки различных вариантов заполнения формующей полости

изготовлены из пластмасс непромышленного назначения в менее жесткой и более дешевой форме, применяя ручную окончательную обработку, однако при условии использования мастер-моделей, которые являются точными копиями готового изделия [38].

Опытные литейные формы могут быть классифицированы по условной оценке производительности (см. табл. 5.4). Альтернативной: является классификация по материалам и основным технологическим операциям, которые используются для изготовления форм — напылением металлов, спеканием или с помощью механической обработки. Опытные формы могут быть изготовлены из дерева, гипса, пластмассы воска или «мягкого» металла, например, алюминия.

Таблица 5.5. Классификация литейных форм для производства изделий и прототипов из термопластов [2]¹

Уровни требований к изделию, форме, производству	Основные требования или допущения	Материалы и основные технологические операции изготовления формы
I	Изделие «грубое», не точное Геометрия изделия простая Может потребоваться дополнительная обработка Небольшое количество изделий (для начальной оценки)	Эпоксидная смола или глина Погружение в металл или напыление металла

¹ Предложено более расширенное название таблицы, чем у автора. — Примеч. науч. ред.

Таблица 5.5. Окончание

Уровни требований к изделию, форме, производству	Основные требования или допущения	Материалы и основные технологические операции изготовления формы
I	Кратчайший период освоения производства Минимальные капитальные вложения Типичное (наиболее простое) расположение центрального литника	
II	Изделие с относительно жестким допуском Относительно ограниченная прочность конструкции литьевой формы Ручные операции по установке/извлечению вставок	Алюминий, латушь, мягкая сталь Литье или механическая обработка Пальмовоэластика
III	Изделие высокой точности и высокая степень соответствия заданным допускам Относительно большие размеры прототипов и изделий Автоматическое извлечение/боковое смещение Эквивалентное производственной форме расположение литниковой системы и системы охлаждения Возможность всесторонней оценки эксплуатационных характеристик изделия, конструкции литьевой формы и технологических параметров процесса Время цикла литья должно быть близко ко времени производственного цикла	Плита из механически обработанного алюминия или мягкой стали
IV	Одногнездная форма для изготовления фрагмента изделия Полностью автоматизированное изготовление, полное соответствие заданным допускам Возможность использовать форму в качестве резервной, если на производстве требуется увеличить программу выпуска или заменить форму, находящуюся в ремонте	Закаленная сталь Закаливание до или после экспериментальных оценок, чтобы можно было внести изменения, соответствующие изменениям конструкции изделия

5.1.6.1. Опытные формы из эпоксидной смолы

Для изготовления форм с ограниченным сроком службы, которые из-за этого должны быть недорогими, могут быть использованы эпоксидные смолы с наполнителями или армирующими добавками [4,8,38]. В качестве наполнителей используется алюминиевая, чугунная или стальная стружки (порошки). Такие наполнители влияют на повышение сопротивления сжатию, увеличивают удельную теплопроводность, уменьшают усадку и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР).

Малая усадка эпоксидной смолы обусловлена ее химической структурой. Поскольку отверждение смолы происходит при комнатной температуре, то в качестве

материалов для изготовления прототипов могут применяться пластмассы, дерево или даже воск (для низкотемпературных экзотермических систем) [38]. Технология включает в себя операцию заливки жидкой пластмассы, которая обволакивает хорошо смазанную мастер-модель, закрепленную на раме. Рама должна обеспечивать нужное усилие смыкания и быть достаточно жесткой, чтобы не допустить изгиба опоры: из-за давления в формующей полости. Иногда может потребоваться дополнительная ручная обработка прототипа или заполнение герметиком неровностей поверхности. Форма может быть изменена, откорректирована — или механической обработкой, или добавлением в необходимых местах пластмассы. Формы из эпоксидной смолы: используют в технологиях литья под низким давлением, но срок их службы весьма ограничен. Правильно расположенные металлические вставки (литниковые втулки, толкатели и т. д.) могут значительно увеличить срок службы эпоксидных форм.

5.1.6.2. Корпусно-металлические формы

Корпусно-металлическая форма, изготовленная из эпоксидной смолы с наполнителями или армирующими добавками (из металла или керамики или из сплавов с низкой температурой плавления), считается формой средней производительности. Формы такого типа имеют более длительный срок службы, чем отлитые только из эпоксидной смолы, и позволяют получать более сложные прототипы и изделия (до 1000 штук, если в качестве материала для корпуса формы используются цинковые или алюминиевые сплавы) [42,43].

При изготовлении корпусно-металлических форм используют мастер-модели, которые могут выдерживать повышенные температуры в течение относительно короткого времени. В мастер-модели можно предусмотреть специальные каналы для водяного охлаждения.

Набор материалов, которые используются для изготовления корпусно-металлических форм достаточно широк — от сплавов висмута (с низкой температурой плавления) до твердого никеля. Корпус изготавливают окунанием, напылением, гальвакопластикой или осаждением паров [4,38,42-44]. Простейшим способом изготовления матрицы является погружение мастер-модели в ванну с расплавленным сплавом и выдержка там при температуре, которая немного выше температуры плавления. К сожалению, детали форм из легкоплавких материалов не всегда имеют длительные срок службы. Корпусно-металлические формы с более длительным сроком службы могут быть получены осаждением никеля из паровой фазы [43,44], при этом карбонил никеля смешивается с транспортирующим газом и подается в герметичную камеру, где находится мастер-модель. Когда эта смесь вступает в контакт с нагретой поверхностью мастер-модели, карбонил никеля распадается, и осажденный чистый никель покрывает мастер-модель (чистота никеля составляет 99,9 %). Мастер-модель изготавливают из алюминия механической обработкой и равномерно нагревают приблизительно до температуры 175 °С.

Скорость роста слоя покрытия составляет 0,010-0,050 дюйма (0,25-1,25 мм/ч). Толщина осажденного слоя может быть менее 0,001 дюйма (0,025 мм) и достигать максимального значения 1000 дюймов (25 мм). Этот процесс может быть использован при изготовлении форм разного размера. После того как никелевый корпус сформировался

наплавляются медные трубки для подачи эпоксидной смолы или пенопласта. Затем корпусно-металлическую форму устанавливают внутри металлической рамы (способной выдерживать усилие смыкания и рабочее давление, возникающее в процессе литья), куда поступает эпоксидная смола с высоким содержанием наполнителя. Затем каналы подачи смолы или пенопласта очищают, и они служат каналами охлаждения.

Легкоплавкие металлы (сплавы алюминия или цинка) могут использоваться для изготовления корпусно-металлических матриц. Для этого проволоку из сплава алюминия или цинка пропускают через горелку, под действием струи горящего газа или электрической дуги металл напыляют на мастер-модель. Изготовление корпусно-металлических форм напылением можно использовать для получения матриц любого размера [8,28,31]. Этапы изготовления корпусно-металлических форм напылением с помощью электрической дуги показаны на рис. 5.28 [42]:

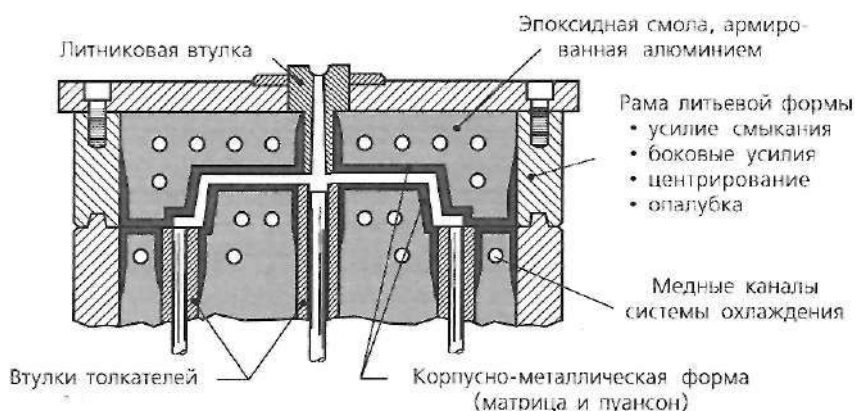


Рис. 5.28. Основные компоненты корпусно-металлической опытной оснастки

1. Сначала из дерева, гипса, металла, пластмассы, формовочной глины или смолы изготавливают мастер-модель. Она может быть изготовлена также по одной из современных технологий быстрого прототипирования, поскольку напыление с помощью электрической дуги проходит при относительно низкой температуре, и поэтому могут быть использованы материалы с различной температурой плавления. Затем определяют линию разреза, а мастер-модель устанавливают на подмодельной плите. Все углы и поднутрения прототипа должны быть хорошо формлены и гладко отшлифованы.
2. Мастер-модель очищают и покрывают несколькими слоями разделительной смазки (обычно ПВА), чтобы облегчить процесс ее извлечения.
3. Металл напыляют с одной стороны модели; слои постепенно добавляются до толщины примерно 1,6 мм.
4. Металлический корпус устанавливают на раму с разрезами для фиксаторов, фиксирующими болтами, втулками для совмещения и фитингами системы охлаждения. Рама должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать напряжения, возникающие под действием усилия смыкания и внутреннего давления в литейной форме.

5. Затем металлический корпус формы покрывают эпоксидной композицией; как только эта операция завершена, трубки охлаждающих каналов устанавливают на место, подсоединяя к раме с помощью фиксирующих фитингов; каналы системы охлаждения должны огибать корпус.
6. После монтажа системы охлаждения, разогретая до высокой температуры эпоксидная смола смешивается с алюминиевой стружкой, иголками или порошком, и этой смесью заполняют корпус. Для полного удаления воздуха на форму рекомендуется воздействовать вибрацией, а затем охлаждать холодной водой.
7. После того как эпоксидная смола полностью затвердела, форму раскрывают или переворачивают (если форма состоит из двух полуформ) и снимают под модельную плиту.
8. Технологические операции с 1 по 7 повторяют для изготовления второй полуформы.
9. Затем полуформы разделяют, модель извлекают, а поверхность формы очищают теплой водой, чтобы убрать остатки разделительного состава. Готовая форма может быть отполирована или покрыта металлом для улучшения функциональных свойств поверхности.

Часто применяемый альтернативный вариант изготовления корпуса — гальванопластика, конкретно-электролитическое осаждение никеля. Такой корпус может выдерживать более высокие температуры и давления, чем металлические корпуса, полученные методом напыления; для того чтобы его изготовить, мастер-модель из проводящего материала (или с соответствующим покрытием) помещают в ванну с электролитическим раствором, где никель осаждается, пока не будет достигнута соответствующая толщина 0,050 до 0,15 дюймов (от 1,27 до 3,18 мм). Эта технология достаточно длительная, но хорошо подходит для изготовления матриц сложной формы [33]. Материалом для формы в этих случаях служит металлический порошок, эпоксидные смолы с наполнителями, алюминий, легкоплавкие сплавы цинка, алюминия и меди.

5.1.6.3. Опытные литевые формы, полученные механической обработкой

Опытные литевые формы небольших, средних и больших габаритов изготавливают традиционными технологиями механической обработки, шлифованием или электроимпульсной обработкой. Опытные формы изготавливают из алюминия, латуни, а также незакаленной или предварительно упрочненной стали. Сталь марки P-20 часто используют для высокопроизводительного формующего инструмента, в котором требуется исполнение очень жестких допусков. Алюминий считается наиболее приемлемым материалом — его нетрудно обрабатывать, он обладает повышенной теплопроводностью, но следует учитывать, что алюминиевые сплавы, по сравнению со стальными сплавами, не обладают достаточной жесткостью и имеют низкие пределы текучести. Преимущества алюминия проявляются, когда необходимо изготавливать формы среднего и большого размеров, где требуется большой объем механической обработки.

Традиционно для алюминиевых литевых форм применяют сплав 7075-T3 (для самолетостроения). Фирма *Alcoa* представляет алюминиевый сплав *QC-1*, который

имеет большую твердость и прочность, чем сплав 7075. Сплав широко используется для изготовления литевых форм, и в настоящее время его можно приобрести в виде толстолистового проката толщиной до 150 мм. Когда для опытной литевой формы используют алюминий, то в местах, которые подвергаются абразивному воздействию, где возникают напряжения при изгибе или напряжения сжатия, обычно используют стальные оформляющие вставки. В таких формах возможно изготовить от тысяч и до десятков тысяч изделий. Срок службы форм из незакаленного металла (то есть количество циклов литья) зависит от большого числа влияющих факторов, к которым относятся: материал, конструкция изделия, конструкция оснастки, условия процесса переработки пластмасс и последующего технического обслуживания.

Таблица 5.6. Сравнение свойств алюминия и стали [47]

Свойства	Алюминий (марки)		Сталь (марки)	
	QC-7	7075-T6	P-20	H-13
Типичная твердость по Роквеллу	16	14	28-32	52-54
Предел текучести, тыс. фунт/дюйм ²	79-74	73-48	125-135	225
Коэффициент теплопроводности, британская тепловая единица/час/фунт ² /Т/фут	91	75	20	16
Среднее значение коэффициента термического расширения дюймы/°F × 10 ⁶	12,8	13,1	7,10	6,10
Плотность, фунты/дюйм ³	0,101	0,101	0,284	0,280

Опытные литевые формы, изготовленные механической обработкой, требуют относительно больших капиталовложений; их можно изготавливать на обычных станках с ЧПУ с соблюдением очень жестких допусков [45]. Подобные формы позволяют получить реальные результаты при оценке — по прототипу — технических характеристик изделия, но при условии, что форма охлаждается вентилируется и заполняется аналогично (эквивалентно) серийному производству (см. рис. 5.25 и 5.26). Опытные литевые формы, изготовленные из незакаленного металла, могут быть значительно более универсальными, например, они позволяют использовать «вариантную» литниковую систему (рис. 5.27). Конструкции литевых форм со сменными оформляющими вставками удобны при изготовлении вариантов прототипов и т. д. [46].

5.1.6.4. Опыт изготовления прототипов пластмассовых изделий в оснастке для литья металлических сплавов¹

Существующую оснастку для литья металлических сплавов в некоторых случаях можно использовать для изготовления прототипов, и даже для производства небольшой серии пластмассовых изделий [48,49].

Рекомендации автора не безусловны; они ориентируют на использование упрощенных кустарных приемов и не убедительны с точки зрения преимуществ в скорости подготовки производства прототипов и изделий. — *Примеч. науч. ред.*

Такая оснастка может быть установлена в типовом термопластавтомате, но практически всегда она больше по габаритам, чем литьевые формы для изделий из термопластов. Кроме дополнительного пространства для ее установки, как правило необходима определенная ее переделка, так как изделия, отлитые из металла, обычно имеют более толстые стенки и острые углы по сравнению с пластмассовыми. Может также потребоваться дополнительная обработка поверхности матрицы и пуансона. Оснастка для литья металлических сплавов обычно конструируется с большим количеством вентиляционных каналов, что способствует быстрому заполнению формы, поэтому для литья пластмасс количество и глубина вентиляционных каналов может быть уменьшена, чтобы избежать образования избыточного облоя вдоль линии разъема формы.

Размеры пластмассовых изделий, изготовленных в оснастке для литья металлических сплавов, могут отличаться от размеров тех металлических деталей, которые в ней отливались ранее: усадки цинка и алюминия в литьевых формах значительно меньше, чем усадка у частично кристаллизующихся термопластов, например, усадка полиамида ПА 6.6 может достигать 2,5%, и если допуски размеров пластмассовых изделий назначаются очень жесткими, то потребуются механическая обработка изделия. Использование оснасток для литья металлических сплавов в целях изготовления прототипов пластмассовых изделий позволяет сократить время подготовки производства.

5.1.7. Прототипы из вспененных пластмасс

Необходимость в изготовлении прототипов при подготовке производства изделий из вспененных термопластов, возможно, даже выше, чем для изделий из других термопластов. Данные о различных свойствах этих анизотропных и неоднородных материалов очень ограничены [2].

5.1.7.1. Точные копии изделий

Прототипы из вспененных полимерных материалов могут выполнять функции мастер-моделей для последующего литья под давлением. Обычно они изготавливаются из блочных или листовых заготовок. Однако в этом случае конструкция и поверхность прототипа не очень точно передает особенности изделия. Выпуклые поверхности получают за счет нагрева листов [2]. Прототипы, изготавливаемые вручную, могут быть получены сразу по форме и размерам изделия, но возможности их применения для анализа технологического процесса довольно ограничены, а стоимость относительно высока. С помощью таких прототипов можно определить зоны высоких напряжений и прогибов, чтобы знать, в каких местах надо разместить ребра жесткости, а в каких увеличить толщину стенок. Точные прототипы (из вспененных материалов) изделий сложной геометрической формы могут быть сделаны с помощью известных технологий прототипирования или получены литьем под низким давлением.

5.1.7.2. Прототипирование

Изготовить прототипы или малые серии изделий можно практически из любого вспенивающегося термопласта. Для этого используются самые различные формы — от очень «мягких» одноразовых до длительно работающих металлических, либо!

степени сложности. «Мягкие» формы дешевле, и их можно быстрее получить, но они имеют короткий срок службы. Очень важно, чтобы формы имели хорошую вентиляцию. Следует быть особенно внимательными при установке формы, поскольку даже очень небольшие усилия смыкания могут привести к ее повреждению.

Литье под низким давлением со вспениванием в гипсовых литевых формах

Использование гипсовых форм, возможно, является одним из самых дешевых способов для литья при низком давлении со вспениванием. Но срок службы подобного формующего инструмента может ограничиваться одним циклом или изготовлением (в одногнездной форме) одного изделия. Поскольку предоставляется «только один шанс» получить изделие, пластмассе дают возможность образовывать облой для снятия избыточного внутреннего давления и точного определения момента окончания заполнения литевой формы.

Литье со вспениванием в оснастке для литья металлических сплавов

В тех случаях, когда предоставляется такая возможность, существующую оснастку необходимо определенным образом переделывать (см. раздел 5.1.6.4). Для относительно плоских изделий на линию разъема формы может быть установлена прокладка, позволяющая изготовить изделие большей толщины; боковые стенки и ребра останутся при этом тонкими. В этом случае необходима высокая скорость заполнения формы.

Литье со вспениванием в литевых формах из эпоксидной композиции

Формы из эпоксидной композиции (смола с наполнителем или армирующими добавками) могут быть использованы для изготовления любых изделий в количестве от 25 до 100 штук, в зависимости от сложности. Эпоксидные смолы с наполнителями или армирующими добавками имеют меньшую литевую усадку, повышенную жесткость и теплопроводность, а также низкий КЛТР. Если требуется изготовить несколько изделий, каналы системы охлаждения должны быть отлиты вместе с формой. Срок службы мягкой эпоксидной формы зависит от величины внутреннего давления и температуры, а также износа поверхности линии разъема.

Вместо эпоксидных форм для изготовления малого количества изделий могут быть использованы формы из силикона.

Литье со вспениванием в корпусно-металлических литевых формах

Формы из эпоксидных композиций с более продолжительным сроком эксплуатации могут быть изготовлены напылением металла или гальванопластикой (см. раздел 5.1.6.2). Тонкие металлические корпуса, которые формируются вокруг мастер-модели, заполняют эпоксидной композицией. Корпусно-металлическая форма с относительно большим сроком службы может быть изготовлена по цене в несколько раз меньшей, чем литевые формы, изготовленные механической обработкой.

Литье со вспениванием в литевых формах, изготовленных из литого металла или металлических пластин

Литевые формы из сплавов алюминия, цинка или даже бериллия-меди (для малогабаритных изделий) способны выдержать более 1000 производственных циклов.

Таблица 5.7. Условное сравнение стоимости изготовления литевых форм для прототипирования

Материал литевой формы	Относительная стоимость*
Сталь (механическая обработка)	100
Алюминий (механическая обработка)	50-70
Алюминий (литье)	40-50
Эпоксидная композиция/корпусно-металлическая форма	30-40
Эпоксидная композиция	20-30

* Для оценки используется индекс, максимальное значение которого принято равным 100.

5.1.8. Координатно-измерительные машины

Точные измерения пластмассовых изделий и их прототипов могут быть осуществлены с помощью координатно-измерительных машин. Они позволяют производить измерения размеров и отклонений от правильной геометрической формы в несколько раз быстрее, чем обычные средства измерения [50], особенно при оценке качества изделий высокоточных квалитетов.

5.1.8.1. Контактные системы измерения

Координатно-измерительная машина состоит из манипулятора с сенсорным датчиком, который устанавливается вертикально на верхнюю стойку или кренится горизонтально к вертикальной направляющей штанге. Трехмерное перемещение осуществляется за счет перемещения датчика в плоскости $x \sim y$ и перемещение стойки или штанги вдоль оси z . В определенных случаях датчик может вращаться. Изделие устанавливается на прочный стол из гранитного блока, который сохраняет высокую стабильность размеров; далее датчик, привод которого осуществляется от двигателей, сканирует поверхность изделия (автоматически или вручную). Когда датчик касается изделия, то определяются координаты $\#-Z/-ZTO4KN$ касания. Затем датчик перемещается к следующей точке измерения и т. д. Эти данные интерполируются для определения расстояний между точками, и на их основе определяются размеры изделия. Координатно-измерительные машины необходимы для определения разницы между реальными и заданными размерами прототипов изделия.

5.1.8.2. Бесконтактные системы измерения

На координатно-измерительных машинах производят измерения с точностью до 0,0001 дюйма (0,0025 мм), но полученные результаты зависят от уровня влажности окружающей среды, вибрации и температуры. Для компенсации подобных влияний используют гранитные столы, керамические компоненты машин и элементы управления параметрами окружающей среды. К новым метрологическим технологиям относится бесконтактное измерение с помощью лазеров и видеокамер. Одна из измерительных систем использует метод лазерной триангуляции для фиксации положения точки, а аналоговые измерительные преобразователи линейных перемещений

определяют положение оси датчика [50]. Другие системы состоят из фиксированных столов и вращающихся видеокамер. В процессе вращения камер цифровой лазерный измеритель производит порядка 250 000 трехмерных измерений в течение нескольких минут. Результаты этих измерений можно увидеть на экране компьютера и загрузить в память станка с ЧПУ [8]. Хотя бесконтактные технологии обладают целым рядом преимуществ, они чувствительны к качеству поверхности изделия ее способности отражать свет, особенно если необходимо проводить измерения внутренних размеров. Перспективные метрологические технологии, к которым относятся методы магнитно-резонансной визуализации, дают возможность осуществлять измерение размеров изделия и одновременно обнаруживать дефекты в материале.

5.2. Использование прототипов для экспериментального анализа напряжений в изделиях

5.2.1. Общие положения

Прототипы часто используются для прогнозирования, оценки и проверки эксплуатационных характеристик пластмассовых изделий, но надежные результаты можно получить только, если для прототипа используют материал, аналогичный применяемому (или предполагаемому для применения) на производстве.

Прототипы дают возможность конструктору всесторонне оценить конструкцию изделия и проанализировать проблемы, обусловленные геометрией изделия; на основе экспериментальной оценки он вносит изменения в конструкцию. В прототипах исследуют прочность материала в зоне сгиба и особенность ориентации макромолекул. Обычной целью экспериментального исследования технологических параметров является оценка характеристик изделия в стандартных условиях эксплуатации и нагрузках, или в жестких условиях окружающей среды. При этом может понадобиться мониторинг эксплуатационных нагрузок и параметров окружающей среды — в качестве части общей программы оценки изделия — с помощью прототипирования, хотя необходимые пределы эксплуатационных параметров должны быть количественно определены уже на самых ранних этапах проектирования. Важно разрабатывать и поддерживать базу данных, содержащую результаты испытаний.

В этом разделе описаны некоторые основные методы, которые могут быть использованы для оценки уровня напряжения в прототипах или готовых изделиях. Очень важно указать, что экспериментальный анализ напряжений не означает измерения напряжений, он скорее подразумевает измерения деформаций. Измеренные величины деформаций затем преобразуются в напряжения с использованием линейных или нелинейных зависимостей напряжения от деформации. Диапазон возможных конфигураций и размеров изделий и их прототипов очень широк. Соответственно, для их исследования используется большое число экспериментальных методов анализа напряжений. К ним относятся: простые экстензометрические измерения, метод

хрупких покрытий, измерение электропроводности при приложенных нагрузках, испытание расплавов и прямые оптические измерения. Выбор оптимального метода определяется местом проведения исследования, типом деформации и ее ожидаемым проявлением. Как правило, правильным решением является комбинация методов [51,52].

5.2.2. Метод хрупких (лаковых) покрытий

Метод хрупких (лаковых) покрытий основан на том, что в тонком лаковом слое при определенных значениях деформации материала, на который это покрытие нанесено, появляются трещины. Этот метод применяется, когда направление и характер (распределения) деформации неизвестны. Сплошной слой или полоски чувствительного к напряжениям лака напыляют на поверхность образца, затем лаку дают высохнуть и наблюдают за ним после воздействия внешней нагрузки. Хрупкое покрытие будет растрескиваться. Расположение трещин дает информацию об общем распределении деформации [6, 51, 52, 54, 56].

Такой метод позволяет быстро обнаружить области высоких напряжений в изделии или предварительно определить проблемные зоны, чтобы затем провести точные измерения с помощью датчиков деформации (тензодатчиков). В покрытии образуется трещина в случае преодоления предельно допустимого значения деформации, что дает возможность конструктору приблизительно оценить максимальный уровень напряжения. Значение напряжения в области трещины рассчитывается с учетом соответствующего значения модуля упругости пластмассы E и порога деформации ϵ , хрупкого покрытия по уравнению:

$$\sigma_p \geq E_p \epsilon_t \quad (5.1)$$

Такой тест дает менее точные результаты, чем датчики деформации [51,52], однако его преимущество заключается в том, что он делает видимым поле деформации, его градиент. Метод относится к «качественно-количественным» и требует использования контрольных образцов правильной геометрической формы.



Рис. 5.29. Трещины, которые проявляются на корпусе прототипа пластмассового изделия, покрытого лаком, после приложения нагрузки

Метод хрупких (лаковых) покрытий имеет некоторые ограничения. Покрытие, которое наносится на изделие, содержит определенные химические вещества и растворители, которые могут взаимодействовать с поверхностью изделия. Кроме того, слой лака должен быть максимально тонким, чтобы избежать эффектов увеличения. Метод предполагает хорошую адгезию между чувствительным к деформации покрытием и поверхностью изделия, на которое оно нанесено. Использование шпатлевок или грунтовок может улучшить передачу напряжений и служить барьером для химического взаимодействия. Пользоваться шпатлевками нужно только в тех случаях, когда это абсолютно необходимо, потому что в результате происходит увеличение толщины покрытия и возникает эффект увеличения. С помощью этого метода достаточно сложно определить остаточные напряжения, поэтому он используется прежде всего для оценки напряжений, которые возникают в процессе сборки или эксплуатации. Напряжение, которое здесь определяется, носит оценочный характер, поскольку результаты тестирования зависят от химического состава покрытия, его температуры и толщины. После использования метода хрупкого покрытия необходимо провести другие испытания, которые дадут более точную количественную оценку, например, измерение с помощью датчиков деформации [54].

5.2.3. Датчики деформации (тензодатчики)

Это наиболее широко распространенный метод испытаний. Используются датчики деформации, генерирующие пропорциональный напряжению электрический сигнал. Тензодатчики очень полезны для количественного анализа поверхностной деформации, связанной с внешними нагрузками или снятием внутренних напряжений [51,53-55].

Сопротивление R , длина l , и площадь поперечного сечения A электрического проводника связаны уравнением:

$$R = \rho l / A, \quad (5.2)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление.

Если проводник подвергается растяжению или сжатию, то его сопротивление будет изменяться в зависимости от изменения его длины и площади поперечного сечения, а пьезоэлектрическое сопротивление проводника будет зависеть от величины механического напряжения. Проводники, приклеенные к поверхности пластмассовых изделий, будут преобразовывать деформацию, вызванную приложенным давлением, в электрическое сопротивление (зависимость между деформацией и сопротивлением линейная) [45,57].

Датчик — это очень тонкое электрическое сопротивление, чувствительное к деформации. Когда датчик прикреплен к испытательному образцу, он преобразует деформацию поверхности, вызванную приложенным давлением, в изменение электрического сопротивления датчика. Чувствительные проводящие элементы изготавливают из тонких пленок толщиной меньше, чем 0,0010 дюймов (0,005 мм); более толстые используют для изготовления фотоэлектрических датчиков. Геометрическая форма датчика такова, что длина его максимальна вдоль одной оси. Линейная тонкопленочная

структура датчика (рис. 5.30) имеет широкие контакты, уменьшающие чувствительность датчика в поперечном направлении и снижающие величину ложного входного сигнала. Такой датчик предназначен для измерения той составляющей деформации, которая направлена вдоль его наибольшей длины. Тонкопленочные датчики имеют луженые контакты или луженые провода [57].

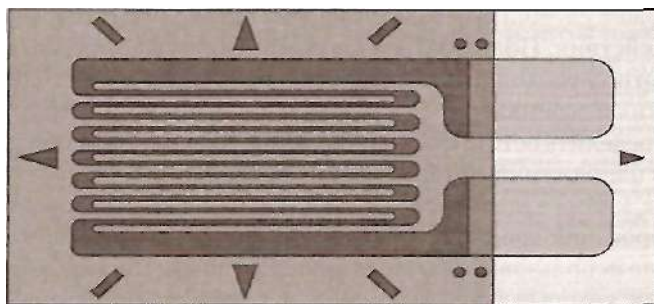


Рис. 5.30. Типичный тонкопленочный датчик для измерения деформации (тензодатчик)

Чаще всего датчики изготавливают из медно-никелевого или никель-хромовой сплава, работающего в диапазоне очень низких или очень высоких температур [51,55]. Полупроводниковые и пьезоэлектрические датчики применяют для измерения деформации при очень малых нагрузках [51,53,57]. Тонкопленочные датчики изготавливаются на подложке из тонкой пленки, которая имеет толщину порядка 0,0010 дюйма (0,025 мм), при этом общая толщина датчика достигает 0,0012 дюйма (0,037 мм) плюс толщина клея, с помощью которого он крепится на поверхности изделия.

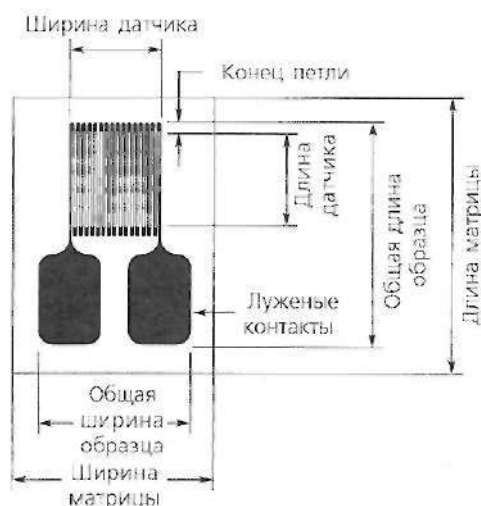


Рис. 5.31. Основные параметры и внешний вид типичного тонкопленочного датчика для измерения деформации (тензодатчика)

В качестве клея для фиксации тензодатчиков обычно используют активные мономерные связующие; по образующейся линии соединения они обладают хорошими прочностными характеристиками и низкой вязкостью. Качество клеевого соединения имеет ключевое значение для функционирования датчика, поскольку соединение обеспечивает связь между образцом и подложкой. Проблемы в области клеевого соединения могут возникнуть на очень малой поверхности или при проведении измерений в условиях повышенной температуры и влажности.

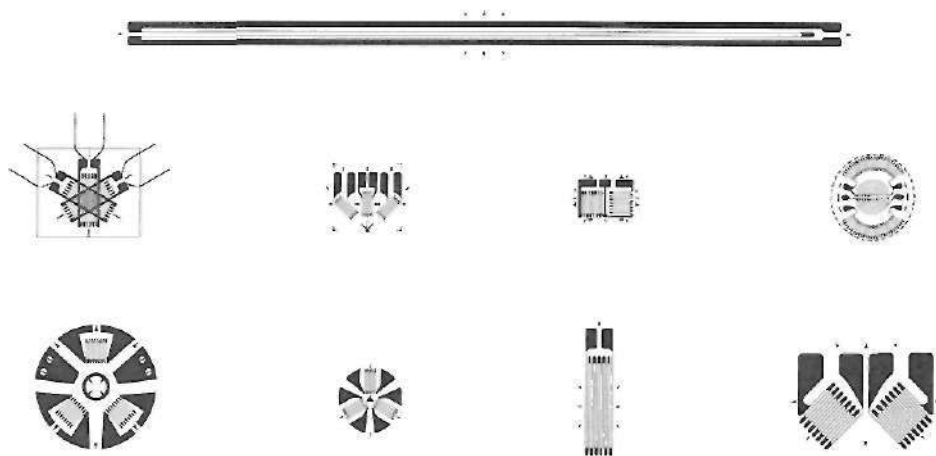


Рис. 5.32. Наиболее распространенные конфигурации приклеиваемых тонкопленочных датчиков деформации, включая одноосные, плоские многорешетчатые и многослойные многорешетчатые датчики

Активная решетчатая зона у датчиков составляет величину от 0,010 до 4,0 дюймов (0,25 до 102 мм). Невозможно получить значение деформации в одной точке, поскольку измерительная зона датчика занимает некоторую область. Если градиент деформации в изделии под активной зоной датчика носит линейный характер, то среднее значение может быть равным значению деформации в средней точке по длине датчика. Если градиент не является линейным, то точка, которой соответствуют показания датчика, становится неопределенной. Эта неопределенность уменьшается вместе со снижением линейных размеров датчика. Тензодатчики малых размеров предпочтительнее использовать в местах, где есть резкие изменения градиента деформации, например, в местах пересечения стенок [57].

Чувствительность датчика к величине деформации — коэффициент тензочувствительности — определяя его как отношение относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ к относительному изменению деформации $\Delta L/L$ по обобщенному уравнению:

$$G_f = (\Delta R/R)/(\Delta L/L) = 1 + 2\nu + (\Delta \rho/\rho)/(\Delta L/L), \quad (5.3)$$

где ν — коэффициент Пуассона материала датчика.

Коэффициент тензочувствительности датчика определяется суммой изменений сопротивления, связанных с изменением длины и площади, а также изменений, связанных с пьезоэлектрическим эффектом. Деформации датчика (и изделия) затем могут быть определены путем измерения изменения сопротивления в зависимости от нагрузки:

$$\varepsilon = (\Delta R/R)(1/G_f). \quad (5.4)$$

Значения коэффициента тензочувствительности, которые указаны в комплекте поставки датчиков, получают индивидуально для каждого из них.



Рис. 533. Примеры тонкоилепочных датчиков, используемые для оценки деформации поверхности пластмассового изделия

В настоящее время выпускают наборы многоэлементных датчиков деформации различной конфигурации. Многорешетчатые датчики деформации дают возможность сократить время установки и повысить точность измерений за счет устранения необходимости точного совмещения нескольких отдельных одноосных датчиков. Тройной многорешетчатый датчик представляет собой планарную решетку (рис. 5.34) и дает возможность определить величину и направление напряжений, которые заранее неизвестны [51, 52, 54–57]. В идеальной схеме три датчика должны быть установлены под разными углами в одной и той же точке. Качество работы многослойного многорешетчатого датчика зависит от перегрева и ошибок, возникающих с возрастанием деформации [57]. В тех случаях, когда известны главные направления двухосного поля напряжений, необходимо осуществить только два независимых измерения деформации, чтобы определить главные значения напряжения. Это может быть сделано с помощью двойного многорешетчатого датчика, в котором два одноосных датчика расположены под углом 90° и направлены вдоль главных осей [51]. В этом случае для определения расположения и направления главных осей напряжения до использования датчиков деформации используется метод хрупких покрытий [53].

Устройство тензодатчика, как правило, использует электронную схему моста Уитстона, в котором сопротивление датчика образует одно из плечей моста. На результаты

Многорешетчатый датчик
с расположением одноосных
датчиков под углом 120°

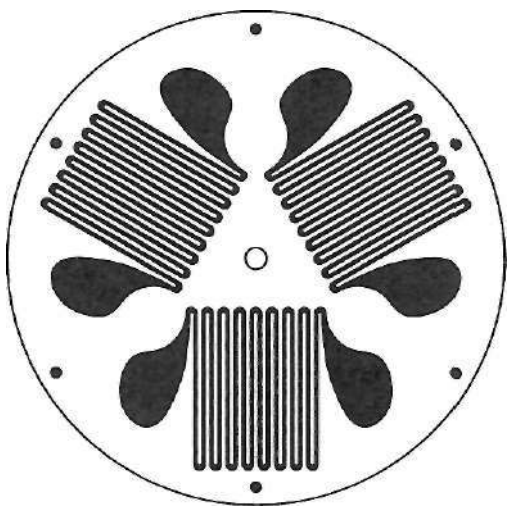


Рис. 534. Типичная многорешетчатая геометрия датчика

Измерения деформации оказывают сильное воздействие температура и влажность. Изменение температуры влияет как на сопротивление тонкопленочного датчика, так и на размеры всех компонентов системы. Изменение влажности может привести к изменению размеров толщины клея, подложки и самой пластмассовой детали. Различия в изменении размеров пластмассового изделия и подложки датчика в зависимости от температуры и влажности может привести к существенным ошибкам в расчетах. Для решения данной проблемы могут быть использованы датчики с компенсацией температурных эффектов или дополнительный датчик, установленный на другой образец, который не подвергается нагрузке. Вспомогательный и главный датчики устанавливаются в прилегающих плечах моста Уитстона, чтобы таким образом компенсировать изменения сопротивления, связанные с изменениями параметров окружающей среды, и исключить суммарный эффект на выходе моста [57].

Остаточные напряжения, которые возникают в изделии при литье под давлением, также можно оценить с помощью тензодатчиков. Величину остаточных напряжений знать необходимо, поскольку они могут приводить к возникновению трещин под воздействием окружающей среды, короблению при повышенных температурах или могут вносить свой вклад в разрушение изделия в процессе его эксплуатации.

Остаточные напряжения могут быть оценены с помощью теста, называемого «свободное коробление» [58], или метода с просверливанием глухого отверстия [54]. Первый представляет собой процедуру термообработки, проходящую на «незафиксированных» изделиях при повышенной температуре. При просверливании глухого отверстия используют многорешетчатые датчики (3-элементные планарные тонкопленочные датчики с расположением их под углом 120°), которые устанавливаются на поверхности изделия. Сверление небольшого глухого отверстия в многорешетчатом датчике приводит к снятию внутренних напряжений в этой точке, что вызывает деформацию, которая измеряется датчиком вокруг отверстия.

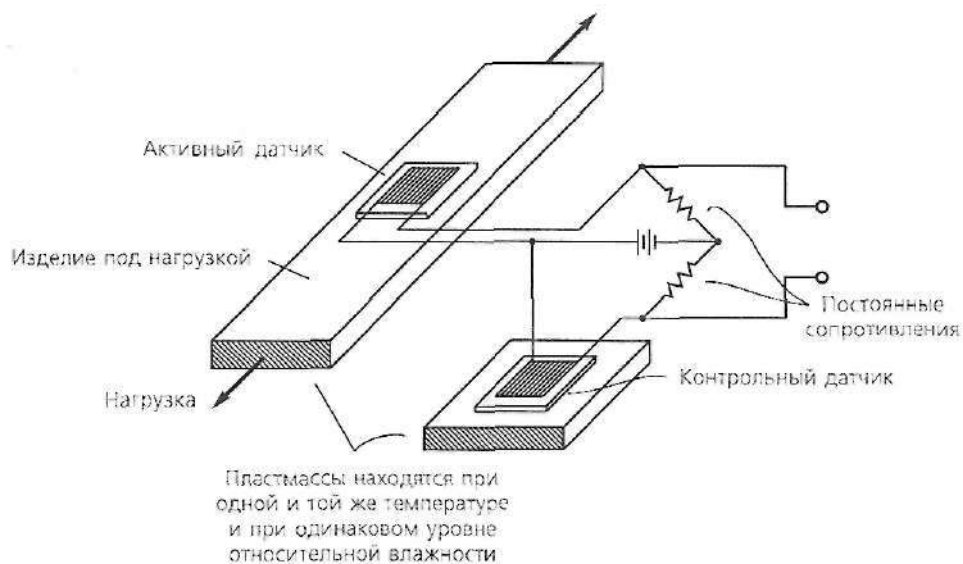


Рис. 5.35. Цепь моста Уитстона с использованием измерительного датчика и контрольного датчика для компенсации изменения температуры

Приклеиваемые тонкопленочные тепзодатчики являются единственно возможным инструментом количественного измерения величины напряжения. Этим методом возможно регистрировать деформацию величиной 1 мкм/м , и он может быть использован в широком диапазоне изменений условий окружающей среды. Кроме того, он пригоден для определения величины остаточных напряжений. Основной недостаток такого метода — считается, что с его помощью определяется средний уровень поверхностных напряжений в локальной области, а не деформация в конкретной точке [51].

5.2.4. Испытания с помощью химических растворителей

Наличие напряжений (внешних или внутренних) в изделии уменьшает его устойчивость к действию растворителей. Это может стать серьезной проблемой при эксплуатации изделий, и привести к образованию микротрещин, больших трещин :: даже к разрушению изделий. В определенных условиях эффект появления трещин под действием нагрузки и конкретного растворителя может быть использован для экспериментальной оценки уровня напряжений в изделии.

Применяют две жидкости, которые смешиваются в различных пропорциях. Одна из жидкостей — сильный растворитель конкретной пластмассы, а вторая обладает способностью хорошо смешиваться с первой (понятие «сильный» в данном случае характеризуется параметром растворимости). Считается, что при отсутствии сильных связей в полимере (таких, как водородные связи), растворимость полимера в растворителе может происходить, если разница между параметрами их растворимости составляет от 1,7 до 2,0.

Полиметилметакрилат (ГТММЛ) с параметром растворимости 9,10 будет полностью растворяться в бензине, у которого параметр растворимости 9,15, но он не будет растворим в метаноле с параметром растворимости 14,5 [59]. Смеси растворителя могут быть различной концентрации, чтобы получить растворители разной степени агрессивности. Для поликарбоната (ПК) можно использовать смеси толуола, и-пропилового спирта, этилацетата или метилового спирта [54].

Пластмассовые изделия помещают под нагрузку в емкость с растворителем или они смачиваются смесями растворителей при определенной температуре в течение заданного периода времени. Затем изделия промывают и высушивают, чтобы удалить избыточное количество растворителя. Появление трещин и микротрещин на поверхности изделий означает, что приданной концентрации растворителя уровень напряжений в конкретном месте выше критического. Эти уровни критического, или предельного, напряжения для каждой смеси будут определять экспериментальные уровни напряжений нагружения растворителей образцов правильной геометрической формы, для которых теоретические расчеты напряжений могут быть сопоставлены с началом образования трещин. Трещины будут появляться в направлении, перпендикулярном приложенному усилию. Начало образования трещин в контрольных образцах может быть сопоставлено с ожидаемым уровнем критических напряжений в изделии с помощью соответствующих расчетов. Точность теста определяется количеством используемых смесей с разной концентрацией растворителя и опытом испытателя, поскольку результаты визуального осмотра носят субъективный характер.

Другой вариант анализа основан на непрерывном воздействии растворителем на контрольный образец [52, 60]. Этот метод особенно эффективен для полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), который устойчив к действию большинства растворителей. Изделия размещают под нагрузкой в прозрачном контейнере, заполненном растворителем или его парами, после чего образцы фотографируют или осматривают через равные промежутки времени. Проведение испытаний можно ускорить за счет повышения температуры, хотя результаты, полученные при этом, могут быть недостаточно точными. Трещины появляются в местах возникновения максимального напряжения (рис. 5.36) [58].

Метод анализа напряжений с помощью растворителей используют при определении уровней остаточных напряжений, но он может также применяться для оценки напряжений, которые создаются внешними нагрузками. Использование этого метода требует от испытателя выполнения повышенных требований техники безопасности: осторожного обращения с опасными для здоровья органическими растворителями при обязательной хорошей вентиляции производственного помещения.

5.2.5. Фотоупругие испытания

Фотоупругость — это объемный визуальный метод измерения напряжений. Некоторые изотропные пластмассы имеют переменный показатель двойного лучепреломления, который будет изменяться в зависимости от уровня напряжения (или деформации) — эти оптические свойства являются основой метода фотоупругих испытаний. Образец, сделанный из фотоупругого материала, подвергается нагрузкам

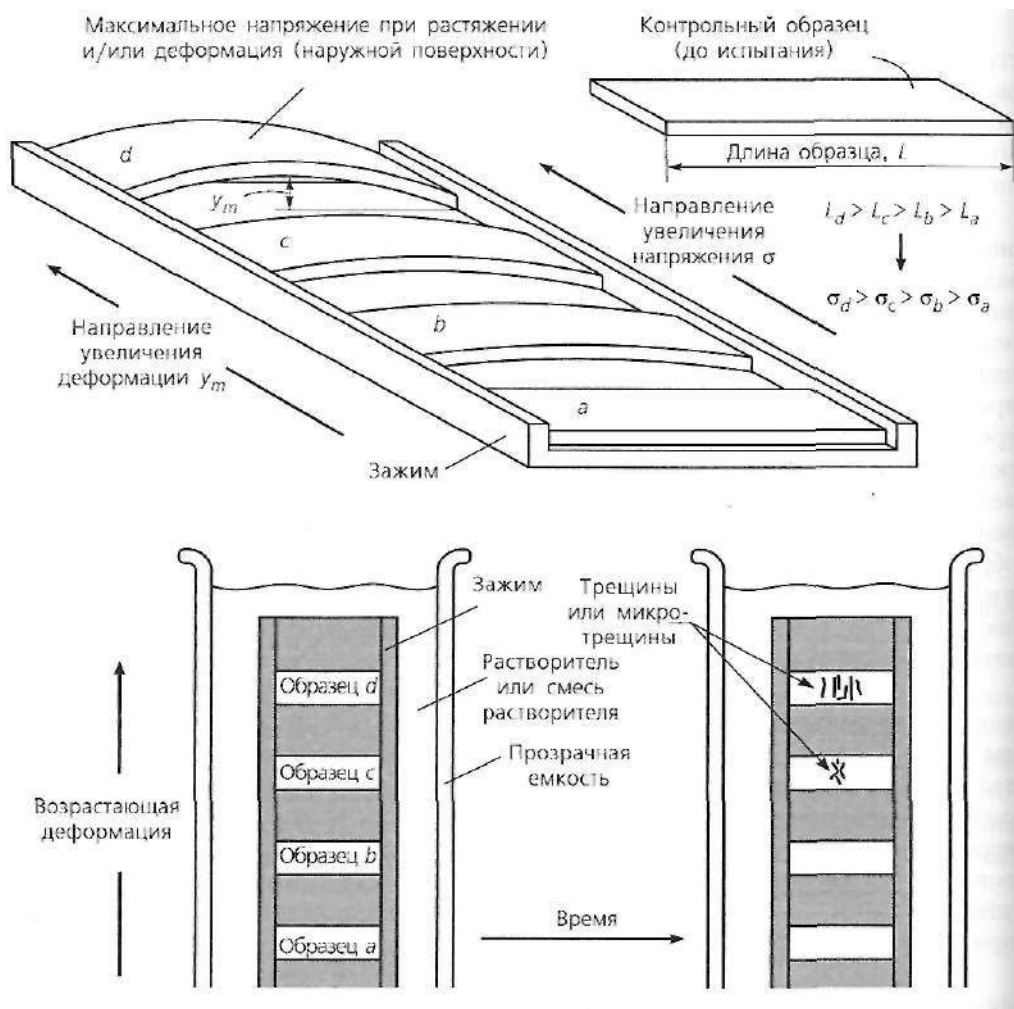


Рис. 5.36. Химические растворители используются для оценки уровня напряжения для многих пластмасс, но стойкость к образованию трещин под действием напряжения в пластмассе должна быть определена количественно. Контрольные образцы из той же пластмассы, которая была использована для получения изделия, могут использоваться для экспериментального получения соотношения между уровнем напряжения и возникновением трещин (в присутствии конкретного растворителя)

в поляризованном свете. В результате получают цветную картину интерференционных полос (рис. 5.37), которая позволяет регистрировать точную величину и направление напряжений в данной области.

Этот метод используют для оценки как внутренних, так и внешних напряжений. Поляризованный свет, проходящий через материал, который находится под нагрузкой, разделяется на два луча. Эти лучи имеют разные скорости и в каждом из них

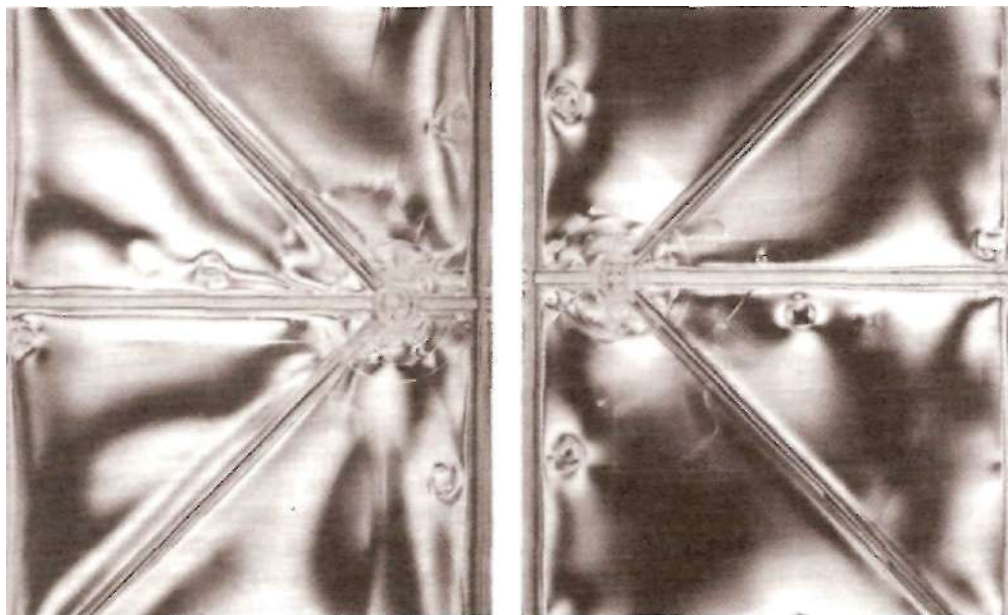


Рис. 537. Уровень остаточных напряжений в отливках из поликарбоната (*Lexan®*) оценивают с помощью фотоупругого испытания. Слева — изделие отлито по обычной технологии литья под давлением; справа — изделие изготовлено по технологии литьевого прессования, что обеспечивает минимальный уровень внутренних напряжений

колебания происходят в плоскости, которые совпадают с направлениями главных напряжений. Сдвиг фаз между двумя лучами и приводит к образованию цветной картины интерференционных полос, которую можно наблюдать через полярископ. Использование полярископов позволяет установить плоскость колебаний в проходящих лучах, что, соответственно, позволят определить направление напряжений. Сдвиг фаз, который измеряется с помощью метода оптической компенсации, дает возможность определить величину напряжений [51,62].

Метод фотоупругих испытаний используют в двухмерных или трехмерных образцах, а также в изделиях, покрытых фотоупругим материалом. Анализ фотоупругих образцов необходим на ранних стадиях проектирования изделий из поликарбоната (ПК), полиметилметакрилата (ПММА) или полиэфиров. Двухмерные модели обычно вырезаются из плоских листов пластмассы (без внутренних напряжений) толщиной обычно 0,250 дюймов (5,35 мм). Затем они подвергаются механической обработке (с минимальными механическими напряжениями). Лист располагается в полярископе, работающем на пропускание, вместе с волновыми пластинками. Размер изделия ограничивается размерами полярископа и размерами образцов (рис. 5.37). Подобный метод экспериментального анализа напряжений особенно нужен для оценки концентрации напряжений вокруг отверстий, поднутрений и других неоднородностей поверхности [6, 54,58, 61, 62].

Один из вариантов метода состоит в нагружении трехмерных моделей, находящихся в подогретом состоянии в печи. Затем образцы медленно охлаждаются до комнатной температуры, что приводит к фиксации картины интерференционных полос [51,62,63]. Образцы могут быть разделены на двухмерные тонкие слои, а затем проанализированы с помощью полярископа, работающего на пропускание, или микроскопа с поляризатором и источником света переменной интенсивности.

Другой тест заключается в том, что образец покрывается тонким равномерным слоем фотоупругого материала. Затем с помощью полярископа, работающего на отражение, осуществляется анализ воздействия на образец внешнего нагружения. Эта технология очень перспективна, поскольку может быть использована для изделий любого размера, формы или материала (даже такого, который не пропускает свет). Распределение деформации по поверхности может быть установлено по всей площади изделия даже в случае очень больших градиентов деформации.

5.2.6. Оптические методы измерения напряжения

Оптические методы измерения напряжений широко используются при экспериментальном анализе; они основаны на принципах оптической интерференции. К оптическим методам относят метод муаровых полос и лазерную или голографическую интерферометрию.

Метод муаровых полос

Муаровая полоса — это оптический эффект, который наблюдается, когда две группы (сетки) близко расположенных параллельных непрозрачных линий с одинаковыми по ширине прозрачными зонами между ними, накладываются друг на друга. Если промежуток между линиями или ориентация одной из сеток изменяются, то наблюдается периодическая механическая интерференция проходящего или отраженного света. Принцип метода основан на том, что одна из идентичных сеток накладывается на изделие до того, как оно будет подвергаться нагрузке, а вторая сетка используется в качестве эталонной. Сетки совмещены до того, как тестируемое изделие подвергается воздействию нагрузки. Когда изделие находится под нагрузкой, деформации поверхности меняют форму сетки [6, 51]. Интерференция возникает только из-за геометрического блокирования света (обычного белого света), когда он проходит насквозь или отражается от деталей сетки. Для образования и проектирования изображений сеток в методе муаровых полос могут также использоваться фотографические изображения. Это эффективно при высоких температурах и сильных упругих деформациях, однако возникают трудности при необходимости точного измерения деформации [39].

5.3. Литература

1. Metelnick, J., *Plastics Design Forum*, 14 (3) 31 (1989).
2. Anonymous, *Plastics Design Forum*, 3(3)72(1978).
3. Anonymous, *British Plastics*, July / August, 17 (1984).
4. Shimel, J., *Plastics Design Forum*, 9(1)75 (1984).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОТИПОВ ПЛАСТМАССОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

5. Kelly, W., British Plastics and Rubber, July/August, 12 (1984).
6. Ehrenstein, G. and Erhard, G., Designing With Plastics, Manser, NY (1984).
7. Technical Bulletin, CadCo Engineering Plastics, Cadillac Plastic and Chemical Co., Troy, MI.
8. Deitz, D., Mechanical Engineering, 112 (2) 34 (1990).
9. Dowler, C, Plastics Engineering, 45 (4) 43 (1989).
10. Anonymous, Modern Plastics, 66 (3) 84 (1989).
11. Ogando, J., Plastics Technology, 40 (1) 40 (1994).
12. Kirkland, C, Injection Molding, 1 (3) 41 (1994).
13. Lindsey, K., Modern Plastics, 67 (8) 40 (1990).
14. Technical Bulletin, 3D Systems Incorporated, Valencia, CA.
15. Leonard, L., Plastics Design Forum, 16 (1) 15 (1991).
16. Lindsay, K., Modern Plastics, 68 (6) 216 (1991).
17. Gabriele, M., Plastics Technology, 37 (6) 45 (1991).
18. Charnas, D., Plastics News, 3 (21) 7 (1991).
19. Ashley, S., Mechanical Engineering, 113 (4) 34 (1991).
20. 3D Systems, 26081 Avenue Hall, Valencia, CA 91355.
21. Technical Bulletin, Cibatool SL XB 5081, Ciba-Geigy, East Lansing, MI.
22. Jacobs, P., Rapid Prototyping and Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI (1992).
23. QuadraX, 300 High Point Avenue, Portsmouth, RI 02871.
24. Light Sculpting, 4815 N. Marlborough Drive, Milwaukee, WI 53217.
25. Cubital, P. O. Box 330, Herzlia B 46103, Israel / Cubital America Inc., Troy, MI.
26. DuPont Somos Venture, New Castle Corporate Commons, Two Penns Way, New Castle, DE 19720.
27. DTM Corporation, 1611 Headway Circle, Building 2, Austin, TX 78754.
28. Anonymous, Plastics Technology, 36 (13) 23 (1990).
29. Meyer, A., Micro CAD News, January / February, 25 (1990).
30. Stratasys Inc., Eden Prairie, MN.
31. Fallon, M., Plastics Technology, 36 (8) 50 (1990).
32. Helisys, Inc., Torrance, CA.
33. Michaud, G., Plastics Design Forum, 6 (3) 56 (1981).
34. Mold Finish Standards, Moldmakers Division, The Society of the Plastics Industry, Washington, DC 20005.
35. Ilaaxma, H., Mold Finishing and Polishing Manual, I. T. Quamstrom Foundation / Society of Plastics Engineers, Brookfield, CT (1985).
36. Sheehan, J., Technical Paper, Society of Plastics Engineers RETEC, Rochester, NY, L-1 (1990).
37. MCP Systems, Inc., 511 Commerce Drive, Fairfield, CT 06430-5541.
38. Schwartz, S., Plastics Design Forum, 10 (2) 57 (1985).
39. Geresy, W., Plastics Design Forum, 10 (2) 70 (1985).
40. Standard Classification of Injection Molds, Moldmakers Division, The Society of the Plastics Industry, Washington, DC 20005.
41. Brewer, D., Plastics Design Forum, 7 (3) 95 (1982).
42. Technical Bulletin, # 300-D10622, TAFE Incorporated, Concord, NH.
43. Hanna, S., Obtaining Durable Molds from Rapid Prototype Patterns, MS Project, Department of Manufacturing Engineering, University of Mass Lowell (1992).

44. Microtech, Incorporated, Toronto, Canada.
45. Dryce, D. M., Structural Plastics Conference, Society of the Plastics Industry, 146 (1992).
46. Technical Bulletin, Master Unit Die Products, Inc. P. O. Box 520, Greenville, MI 48838.
47. Galli, E., Injection Molding, 1 (1) 53 (1994).
48. Mannis, E, Plastics Design Forum, 2 (3) 52 (1977).
49. MacDermott, C, Selecting Thermoplastics for Engineering Applications, Marcel Dekker. Inc. NY (1984).
50. Anonymous, Plastics Technology, 36 (5) 67 (1990).
51. Corby, T. and Redner, S., Plastics Design Forum, 6 (1) 43 (1981).
52. Crites, N., Product Engineering, October 16, 90, (1961).
53. Rowand, R., Plastics News, I (33) 6 (1989).
54. Mchta, K., SPE Annual Technical Conference, 32, 155 (1986).
55. Crites, N., Product Engineering, February 19, 69, (1962).
56. Roark, R., and Young, W., Formulas for Stress and Strain, McGraw Hill, NY (1975).
57. Doebelin, E., Measurement Systems, McGraw Hill, NY (1984).
58. Levy, S., Plastics Design Forum, 9 (4) 83 (1984).
59. Billmeyer, F., Textbook of Polymer Science, Wiley Interscience, NY (1971).
60. Standard Test Method D1693, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. PA, 8.02, 53 (1989).
61. Sullivan, T. and Matsuoka, S., SPE Annual Technical Conference, 35, 790 (1989).
62. Crites, N., Grover, H., and Hunter, A., Product Engineering, September 3, 57, (1962).
63. Miller, H., Plastics Design Forum, 6 (4) 33 (1981).

6. Сборка изделий, изготовленных литьем под давлением

6.1. Общие положения

Многие детали, изготовленные литьем под давлением, представляют собой элементы более крупных сборочных узлов. Они сочетаются друг с другом или с деталями из других материалов. Метод крепления или сборки должен обеспечить механическую связь между различными деталями, которые дополняют друг друга в конструкции. Во многих случаях процесс сборки осуществляется в процессе дополнительной обработки, хотя в некоторых случаях сборку изделия выполняет заказчик деталей. Иногда возникает необходимость уменьшить количество деталей и материалов, входящих в состав изделия, чтобы упростить его конструкцию или уменьшить затраты, связанные со сборкой и изготовлением [1,2]. Главной целью при конструировании большинства пластмассовых изделий является минимизация количества сборочных операций за счет объединения их функций и формования элементов крепежа заодно с пластмассовой деталью. Пластмассовые детали, изготовленные литьем под давлением, должны идеально соответствовать требованиям сборки, так как они могут иметь очень сложную геометрию. Эти требования относительно просты. Необходимо минимизировать число деталей, входящих в сборочный узел и изделие в целом. Нужно как можно реже использовать винты, вставки и аналогичные им крепежные элементы (особенно это касается механического крепежа, требующего при сборке вращения). Необходимо уменьшить количество таких технологических процессов, как, например, склеивание или сварка. К сожалению, это трудно осуществить на практике.

Для формирования деталей со сложной геометрией, необходимы литейные формы сложной конструкции. Усложняется и процесс литья под давлением. Поэтому экономия затрат при сборке может быть сбалансирована ростом стоимости оснастки и операции формования. Надежность литейной формы в процессе формования может играть большую роль, чем усложнение ее конструкции. Рассмотрим пример, приведенный на рис. 6.1.

Технология изготовления мячей для гольфа включает в себя первичный процесс литья под давлением и вторичный процесс сборки (прямого прессования или сварки). Две отлитые из термопласта оболочки мяча (в форме полусфер) совмещают торцами, вводя в образованную ими полость шарообразную вставку (заполнитель), отлитый из эластомера. Затем все три детали устанавливают в подогретую пресс-форму, где внешние оболочки размягчаются, формируется рельеф их внешней поверхности и осуществляется их сварка. После этого пресс-форма охлаждается, давая возможность оболочке из термопласта затвердеть. Мяч для гольфа может быть изготовлен

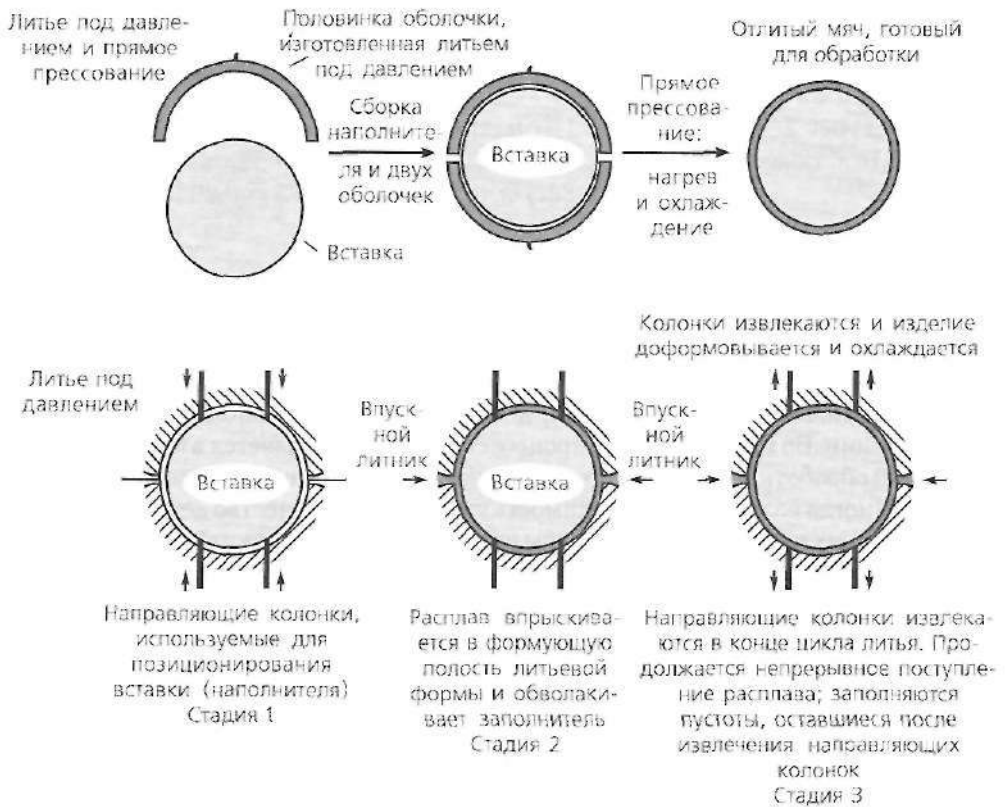


Рис. 6.1. Процесс изготовления мячей для гольфа включает в себя литье под давлением, после которого выполняется прямое прессование, либо литье под давлением с использованием литейной формы более сложной формы

и за один цикл, в ходе которого сердцевина из эластомера отливается внутри формующей полости литьевой формы, затем происходит впрыск расплава термопласта, который создает оболочку. Сердцевина мяча изначально фиксируется с помощью опорных штифтов, которые последовательно извлекаются в ходе процесса или в конце заполнения формующей полости.

Этот вариант процесса устраняет необходимость вторичной обработки: сварки или формования, но при этом возникает необходимость значительно более трудоемкого и дорогого процесса первичной обработки (литья за один цикл).

Качество изделий, изготовленных с использованием конкурирующих систем крепления, не может быть одинаковым. Использование самонарезающих винтов или других крепежных механических элементов легко заменяется введением в конструкцию отлитых заодно целое с деталями крючков. Винтовые и замковые соединения не конкурируют друг с другом в качестве используемых средств фиксации, поскольку готовые изделия будут совершенно разными. Если замок в процессе эксплуатации ломается, то все изделие поступает в отходы. Если повреждается резьба, то соединение может быть отремонтировано с помощью винтов большего диаметра или большей длины. В некоторых случаях, когда ни один из методов сборки не удовлетворяет требованиям, используют комбинированное соединение. Согласно этому методу на начальном этапе сборки применяют склеивание, а затем в наиболее нагруженных местах, для повышения надежности, размещают механические крепежные элементы.

В этой главе будут рассмотрены различные методы сборки. К ним относятся:

- прессовые соединения;
- замковые соединения;
- механическое крепление;
- сварка;
- клеевые соединения;
- соединение с помощью растворителей.

Выбор метода сборки, который максимально соответствует данному изделию, осуществляется с учетом ряда требований, и прежде всего экономических. Очень большое значение имеют материалы, из которых изготавливают сборочные единицы. Например, для деталей из ГЭ лучше использовать прессовые или замковые соединения, поскольку с го химическая стойкость и низкая поверхностная энергия затрудняют применение клеевых соединений. Сварные соединения предпочтительны для термопластов, но не для реактопластов. Если соединяемые детали изготовлены из разнородных материалов, или в процессе сборки вовлекается третий материал, как это имеет место при склеивании или механическом креплении, нужно уделять повышенное внимание КЛТР.

На метод сборки влияют упругие свойства материала. Самонарезающие винты используются вместе с глухими бобышками для крепления корпусных деталей с крышками, если высокие требования предъявляются к внешнему виду только одной поверхности. Такое соединение недопустимо, если высокие требования предъявляются как к верхней, так и к нижней поверхностям корпуса. Параметры окружающей среды и конструкция изделия также влияют на выбор способа крепления. Если изделие из термопласта будет использоваться при повышенной температуре и влажности, механическое крепление и сварка предпочтительнее, чем клеевое соединение. Существует

ряд факторов, влияющих на выбор метода соединения. К ним относятся характеристики соединения при действии ударных, усталостных, статических нагрузок, а также остаточных или термически индуцированных напряжений [3]. К одному из очень важных требований к соединению относится возможность осуществления его повторной сборки или разборки для ремонта или замены какого-либо компонента изделия. Физико-химические процессы, которые протекают при выполнении клеевых или сварных соединений, не допускают повторную сборку, а замковое, прессовое или механическое крепление деталей такую возможность допускают. Изделие, собранное с помощью самонарезающих винтов, может быть собрано и разобрано один-два раза, но если предполагается собирать и разбирать изделие чаще, следует использовать винты для металлов в сочетании со вставками.

В последние годы получил распространение принцип конструирования, обеспечивающий разборку, повторное использование материала и деталей изделий [4,5]. Сущность этого принципа очень проста:

- 1) снижение количества материалов и деталей, которые используются для изготовления изделия;
- 2) использование материалов, которые легко могут быть переработаны повторно;
- 3) использование технологии, допускающей повторную сборку.

При этом, по мере возможности, нужно избегать такие финишные операции, как окрашивание, печатание и металлизация поверхности. Метод крепления играет решающую роль в обеспечении разборки. Замковые соединения, элементы которых отлиты вместе с деталями, или винты, допускающие обратный ход, позволяют осуществлять многократную сборку и разборку, и их применение предпочтительнее, чем склеивание или сварка. Электромагнитная сварка или временное клеевое соединение являются перспективными технологиями, но остатки клея могут оказывать отрицательное воздействие на эксплуатационные характеристики повторно используемых полимерных материалов (в зависимости от совместимости клея с пластмассой).

6.2. Сборка с помощью прессового соединения

6.2.1. Общие положения

Простейшим видом соединения пластмассовых деталей является прессовое соединение, которое основано на использовании упругих или «пружинящих» свойств материала. Прессовые соединения часто применяют при сборке цилиндрических деталей. Примером может служить сборочный узел, состоящий из втулки и вала, который показан на рис. 6.2. Но возможно и соединение деталей другой геометрической формы. В прессовых соединениях используется посадка с натягом двух деталей относительно друг друга. Напряжения и деформации, вызванные посадкой с натягом цилиндрических деталей, равномерно распределяются в зоне контакта соединяемых поверхностей [6,15].

На металлических или пластмассовых валах с помощью прессового соединения легко закрепляются шестерни, шкивы, подшипники и другие круглые детали. Основным

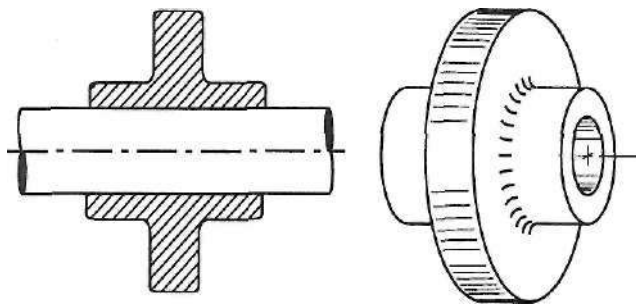
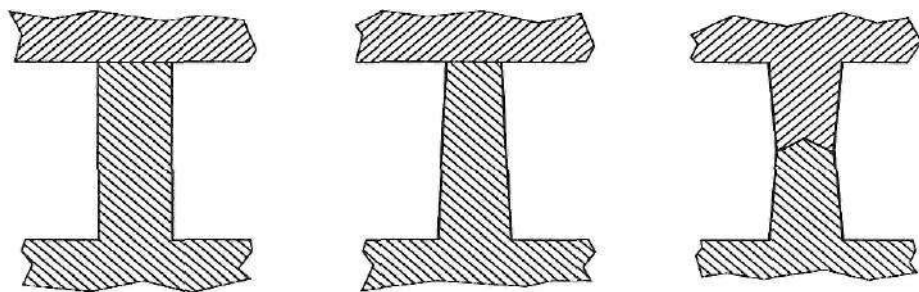


Рис. 6.2. Литые под давлением детали типа зубчатых колес, втулок или маховиков легко крепятся на валах с помощью прессового соединения

преимуществом этого метода считается его простота. Он применяется для деталей, отлитых без поднутрений, и не требует дополнительного использования винтов или шпонок. Однако втулки, закрепленные с помощью прессового соединения, в течение длительного периода времени находятся в состоянии растяжения. Поэтому при расчете соединения необходимо учитывать релаксационные свойства материала, считаться с возможностью возникновения в этих условиях трещин или волосяного растрескивания. Указанное может иметь место у втулок, отлитых с применением ряда точечных литников или литников в виде спиц, в результате чего появляются линии спая, перпендикулярные направлению растягивающего напряжения. Во избежание этого следует использовать дисковые впускные литники.



Отверстие, изготовленное знаком с нулевым уклоном стенок, обеспечивает равномерное распределение напряжений, но такой знак трудно извлечь из литейной формы

Единственный оформляющий знак, имеющий уклон, приводит к получению отверстия, которое не обеспечивает равномерное распределение напряжений в прессовом соединении втулки

Два раздвижных оформляющих знака с минимальным наклоном, формируют отверстие втулки

Рис. 6.3. Применение для формования отверстий во втулках знаков с большим наклоном неравномерно распределяют напряжения в прессовом соединении. Втулки с нулевыми углами наклона сложнее отлить. Раздвижные встречные оформляющие знаки обеспечивают баланс между распределением напряжений во втулке и возможностью ее изготовления

Кроме этого, при изготовлении втулок, подвергаемых прессовой посадке, внимание следует уделять углу наклона стенок внутреннего отверстия самой втулки. Углы наклона упрощают съем и извлечение отливки из литевой формы, но они же приводят к неравномерному распределению напряжений внутри втулки после прессового соединения. Можно изготавливать втулки с нулевыми или минимальными наклонами стенок. Если для извлечения отливки изготавливают отверстия с уклонами, то необходимо применить два оформляющих знака, один из которых расположен в формирующей полости, а другой входит в первый (рис. 6.3). Это лучше, чем использование одного знака, поскольку уменьшаются углы наклона, и напряжения в детали после сборки становятся более сбалансированными. Отверстия, которые отлиты со слишком большими углами наклона, требуют перед сборкой развертывания до нужного размера.

6.2.2. Параметры, связанные с выбором материала

Сборку с использованием прессового соединения можно применять для деталей из любого реактопласта или термопласта, но на практике этот способ целесообразнее использовать для деталей из более эластичных пластмасс. Рассмотрим типичный пример применения литой под давлением пластмассовой детали, например, шестерни, выполняющей функцию втулки, установленной с помощью прессовой посадки на сплошной стальной вал. Сопротивление при кручении данного сборочного узла определяется свойствами материала и величиной натяга по диаметру. Жесткие стеклообразные полимерные материалы, такие как ПС, имеют разрушающую деформацию меньше 1,0 %. Расчет допустимых значений деформаций производится прежде всего при оценке долговечности изделий, когда может произойти релаксация напряжений. Деформация не должна превышать 10-40 % разрушающей деформации.

Допустимые значения натяга напрямую зависят от расчетных значений деформации. Разница между внутренним диаметром втулки и наружным диаметром вала может быть меньше, чем сумма допусков на изготовление втулки и вала. Если используются пластичные полимерные материалы, такие как неармированные полиэтилен, полиамид или полиформальдегид, расчетные значения деформации могут быть достаточно большими. В этом случае прессовое соединение является пригодным для применения на практике (рис. 6.4).

При прессовом соединении втулка растягивается, а вал сжимается. Проектирование таких соединений требует учитывать свойства материалов, из которых изготовлены вал и втулка, особенно если вал изготовлен из пластмассы. При расчете втулки следует учитывать напряжения растяжения. Уровень напряжений растяжения во втулке должен быть минимизирован, чтобы обеспечить более надежное долгосрочное соединение. Если значения напряжения низки, ослабление соединения, возникающее в результате релаксации напряжений, будет незначительным. Низкие напряжения уменьшают вероятность разрушения из-за появления волосных трещин, растрескивания, из-за влияния линий спая или воздействия химически активных веществ. Прочность прессового соединения в осевом направлении или при

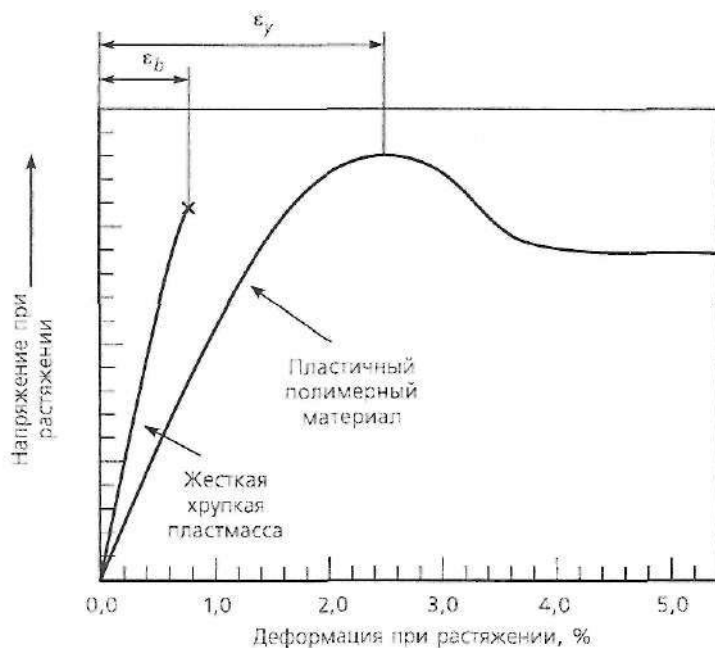


Рис. 6.4. Типичные зависимости напряжение-деформация для жестких и пластичных полимерных материалов. Многие жесткие пластмассы слишком хрупки, что не допускает их использование в прессовых соединениях. В этом случае более предпочтительны пластичные полимерные материалы

кручении зависит от контактного давления, а следовательно, и от уровня напряжений при растяжении.

Сила F , необходимая для того чтобы сдвинуть втулку вдоль вала, может быть определена с помощью уравнения:

$$F = \mu \cdot P \cdot A, \quad (6.1)$$

где μ — коэффициент трения между валом и втулкой; P — контактное давление (зависит от расчетного напряжения); A — площадь поверхности контакта.

Коэффициент трения для пары втулка-вал постоянный (в действительности зависит от уровня напряжений и качества поверхности). Оптимальную конструкцию прессового соединения получают, если при выбранной величине натяга имеет место низкий уровень напряжений, но поверхность контакта деталей максимальна (рис. 6.2). По-возможности при этом следует использовать валы максимального диаметра. Добавки, снижающие коэффициент трения пластмассы, уменьшают прочность соединения при кручении, поэтому они должны быть исключены. Соединяемые поверхности должны быть чистыми и свободными от химических веществ, которые со временем могут привести к разрушению соединения [16]. Если изделия, собранные с помощью прессового соединения, эксплуатируются при различных температурах, материалы деталей, которые в нем участвуют, должны иметь одинаковые КЛТР.

6.2.3. Проектирование прессовых соединений

Собранный узел должен быть стойким при нагружении на кручение в осевом направлении, при этом уровень напряжений должен оставаться в диапазоне приемлемых значений. Уровень допустимых напряжений растяжения для комбинации материалов втулки и вала определяется геометрией этих деталей и величиной натяга. В большинстве случаев наружные размеры втулки и диаметр вала выбираются в соответствии с эксплуатационными требованиями. Диапазон приемлемых значений натяга можно получить, обратившись за консультацией к производителям материала, которые могут представить графическую зависимость предельного значения натяга от отношения диаметров вала и внешнего диаметра втулки, подобно той, которая приведена на рис. 6.5.

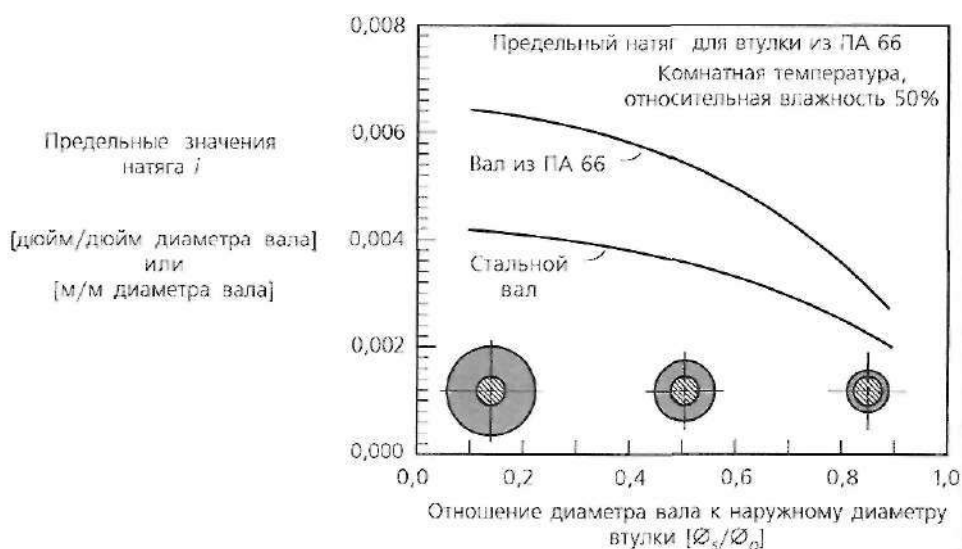


Рис. 6.5- Величина натяга в прессовом соединении может быть определена с помощью уравнений или графика, аналогичного графику, показывающему рекомендуемое максимальное значение натяга для данного материала

Информация, приведенная на графиках такого типа, отражает специфические свойства материала и применима только в ограниченном диапазоне параметров окружающей среды. С помощью этих сведений (см. рис. 6.5), могут быть определены предельные значения натяга i для полиамидной втулки и стального вала.

Рассмотрим следующий пример.

Стальной вал диаметром $\phi_s = 0,400$ дюйма и полиамидная втулка с наружным диаметром $\phi_o = 1,000$ дюйм;

тогда соотношение $\phi_s/\phi_o = 0,400 \text{ дюйма} / 1,000 \text{ дюйма} = 0,40$.

Из графика предельное значение i будет равно 0,0036 дюйм/дюйм. Величина натяга для вала диаметром 0,400 дюйма составит:

$i = 0,400 \text{ дюйм} \times 0,0036 \text{ дюйм/дюйм диаметра вала} = 0,0014 \text{ дюйм}$.

Внутренний диаметр втулки 0_i - тогда будет:

$$0_i = 0_s - i = 0,400 \text{ дюйма} - 0,0015 \text{ дюйма} = 0,3985 \text{ дюйма.}$$

Отлитая шестерня после усадки в литевой форме должна иметь внутренний диаметр не менее 0,3985 дюйма, чтобы соответствовать допустимым предельным деформациям от натяга, рекомендуемым производителем.

Из данных на рис. 6.5 видно, что допустимое значение натяга увеличивается при возрастании отношения толщины стенки втулки к диаметру вала. Зависимости на рисунке также показывают, что значение натяга возрастает, когда в качестве материала для вала используется полиамид, а не сталь. Это объясняется тем, что более пластичный полиамидный вал будет деформироваться в процессе выполнения прессового соединения. Для комбинации полиамидная втулка / полиамидный вал по сравнению с комбинацией полиамидная втулка / стальной вал значения натяга и напряжения растяжения у пластмассовой втулки будут приблизительно одинаковыми.

Информация, приведенная на рис. 6.5, носит ограниченный характер, поскольку свойства материала обусловлены параметрами окружающей среды. Более точные значения натяга могут быть рассчитаны по уравнению (6.2), которое справедливо для любой комбинации материалов в системе втулка / вал:

$$I = [(\sigma_D \cdot \varnothing_s) / W] \cdot [\{ (W + \nu_h) / E_h \} + \{ (1 - \nu_s) / E_s \}], \quad (6.2)$$

где I — диаметральный натяг (дюймы); a_0 — проектные значения напряжения сжатия (фунты/дюйм²); 0 — наружный диаметр втулки (дюймы), 0_s — диаметра вала (дюймы); E_h — модуль упругости материала втулки (фунт/дюйм²); E_s — модуль упругости материала вала (фунт/дюйм²); $\nu^$ — коэффициент Пуассона для материала втулки; ν_s — коэффициент Пуассона для материала вала; $W = [1 + (0_s / 0_o)^2] / [1 - (0_s / 0_o)^2]$.

Натяг может быть определен, если известны наружные диаметры вала и втулки и свойства материалов. Если вал и втулка изготовлены из одной и той же пластмассы, уравнение (6.2) может быть сведено к следующему:

$$I = [(\sigma_D \cdot \varnothing_s) / W] \cdot [(W + 1) / E], \quad (6.3)$$

где E — модуль упругости пластмассы (предполагается, что модуль упругости при растяжении пластмассы равен модулю пластмассы при сжатии).

Уравнение (6.2) может быть упрощено, если пластмассовая втулка устанавливается на металлический вал. Для варианта с металлическим валом $E_s \gg E'$ и значение g может быть определено по формуле:

$$I = [(\sigma_D \cdot \varnothing_s) / W] \cdot [(W + \nu_h) / E_h]. \quad (6.4)$$

В этом виде уравнение используется чаще всего, поскольку пластмассовые втулки обычно устанавливаются на стальные валы. Показатели свойств материалов, которые используются в данном уравнении, должны быть близки к показателям в условиях эксплуатации изделия.

Значение отменяется вместе с изменением температуры, относительной влажности, наличием химически агрессивных веществ и времени. Рассмотрим сборочный узел, состоящий из втулки и вала (рис. 6.6). Иногда, чтобы упростить размещение втулки на валу, прессовое соединение втулок осуществляется с валами уменьшенного диаметра.

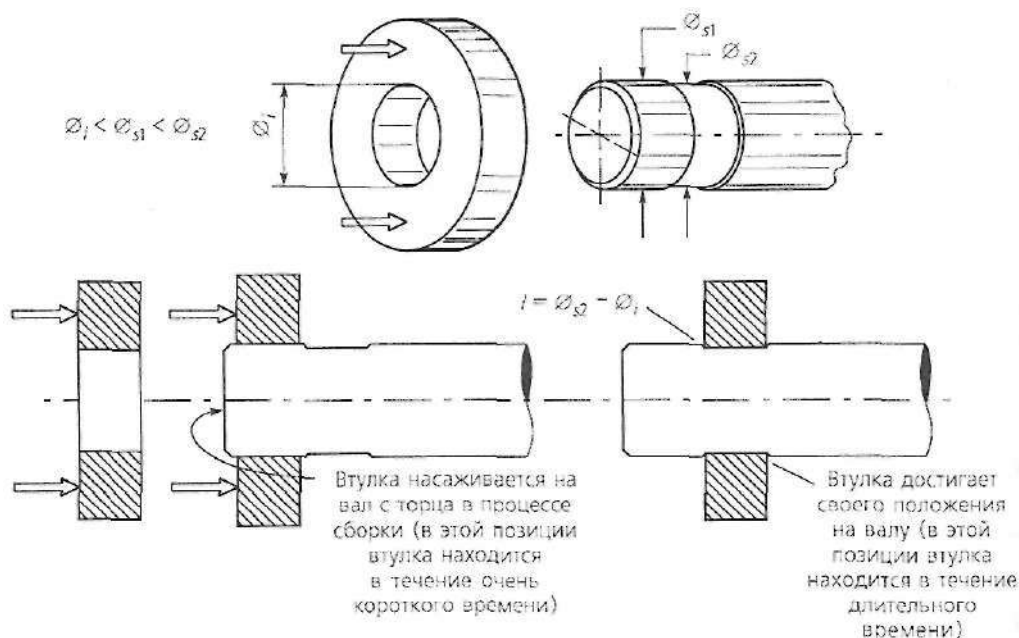


Рис. 6.6. Использование вала с поднутрением позволит точно установить вал в осевом направлении

Внутренний диаметр вала и диаметр вала в том месте, где сделано поднутрение, должны быть рассчитаны с учетом значений натяга. Величина натяга должна быть значительно выше, когда втулка в процессе сборки запрессовывается на вал через участок с большим диаметром за короткое время. В этом случае при расчете должны использоваться допустимые значения кратковременных напряжений (или деформации). Значения напряжений растяжения, которые необходимы для оценки долговечности прессового соединения, определяются с учетом релаксационных характеристик. Эти напряжения на 20-25 % меньше, чем кратковременный предел текучести при растяжении для данного материала. Расчетные напряжения для изделий с большим эксплуатационным сроком должны быть максимально низкими, чтобы минимизировать релаксацию напряжений, а также снизить возможность преждевременного разрушения из-за смещения или растрескивания. Когда втулка в процессе сборки запрессовывается на вал через участок с большим диаметром, значения напряжения могут превышать значение предела текучести при растяжении приблизительно на 40-60 %.

Знание величины усилия, которое требуется для прессовой посадки втулки на вал, очень важно в силу нескольких причин. Величина силы F определяет характеристики сборочного узла, прочность при кручении и прочность в осевом направлении. Усилие запрессовывания втулки может быть определено по уравнению:

$$F = \mu \cdot P \cdot A = \mu \cdot P \cdot \pi \cdot \varnothing_s \cdot L, \quad (6.5)$$

где L — длина втулки в осевом направлении или ее высота.

Контактное давление P может быть определено по формуле:

$$P = \sigma_D / W. \quad (6.6)$$

Сила P при запрессовке связана с крутящим моментом T , вызывающим смещение втулки относительно вала, уравнением:

$$T = F \cdot \varnothing_s / 2. \quad (6.7)$$

Сила F для сборки втулки с валом может быть уменьшена с помощью смазок, которые снижают трение в зоне контакта соприкасаемых поверхностей. Совместное действие смазки и напряжений растяжения в поверхностном слое могут привести к растрескиванию детали. Чтобы уменьшить напряжение в процессе сборки, можно охладить металлический вал и нагреть втулку либо подогреть и то, и другое. Чаше всего вал охлаждается в морозильной камере. Временное изменение $\Delta \varnothing$ диаметра вала определяется по уравнению:

$$\Delta \varnothing_s = \alpha_s \cdot \varnothing_s \cdot \Delta T, \quad (6.8)$$

где α — КЛТР материала вала; ΔT — изменение температуры.

Снижение крутящего момента создает проблемы в собранных с применением прессовых соединений узла, из-за релаксации напряжений. Если втулка напрессовывается на вал из мягкого металла, контактное давление и прочность при кручении с течением времени уменьшаются (рис. 6.7). Однако прочность может быть постоянной

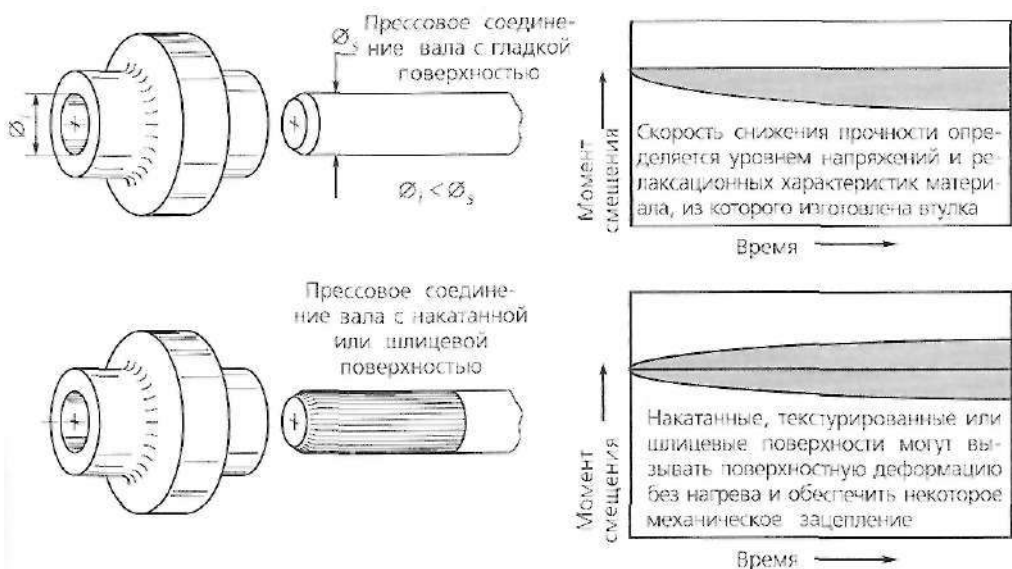


Рис. 6.7. Валы, используемые в изделиях, сборка которых осуществляется с помощью прессового соединения, могут быть гладкими, текстурированными или даже с пакаткой. У валов с гладкими поверхностями прочность при кручении может уменьшаться со временем из-за релаксации напряжения. Прочность при кручении для текстурированных или рельефных валов увеличивается за счет возникновения своего рода механического зацепления

или даже увеличиваться в результате ползучести или холодного течения пластмассы, если одна и та же втулка напрессовывается на поверхность с накатками или шлицами, текстурированную поверхность или поверхность, подвергнутую дробеструйной обработке. Валы с гладкими поверхностями рекомендуется использовать для жестких аморфных термопластов, а валы с более грубыми поверхностями рекомендуется использовать в узлах с более податливыми частично кристаллизующимися термопластами, поскольку они менее чувствительны к концентрации напряжений. Применение шпонок и изменения геометрической формы вала увеличивают прочность при кручении соединения типа втулка-вал, но их использование противоречит принципу упрощения сборки.

6.3. Сборочные узлы с замковыми соединениями

6.3.1. Общие положения

Сборка изделий из пластмасс с помощью замковых соединений является привлекательной альтернативой многим традиционным методам сборки. Использование замковых соединений увеличивает скорость сборки.

Замковые соединения экономически очень выгодны, поскольку необходимые знаки отливаются прямо вместе с деталью. Это устраняет необходимость использования дополнительных крепежных элементов. Сборка замковых соединений обычно не вызывает затруднений. При этом нет необходимости совершать вращательные движения или как-то фиксировать деталь. Замковые соединения могут быть сконструированы таким образом, что их можно использовать многократно. Сборка пластмассовых изделий с помощью замковых соединений характеризуется простотой и универсальностью [6-14].

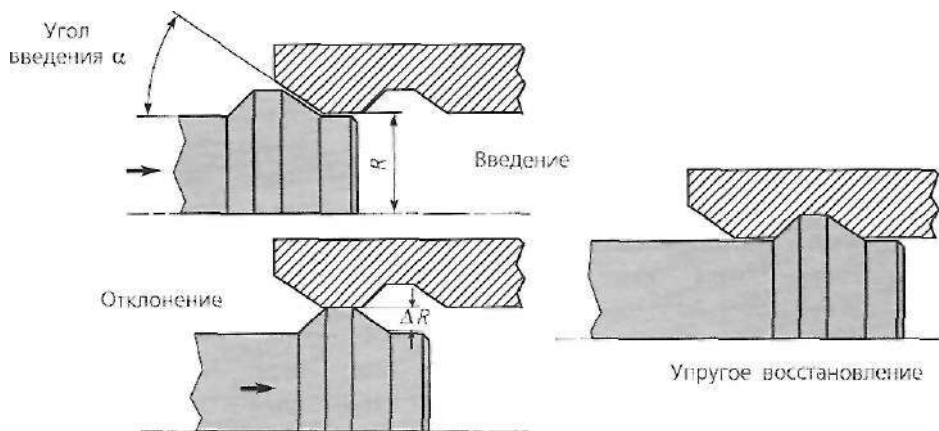


Рис. 6.8. Введение, изгиб и восстановление. Несмотря на большое разнообразие геометрических форм «замков», процесс крепления деталей с их помощью всегда включает в себя прогиб при сборке с последующим упругим восстановлением

Форма замковых соединений может быть совершенно различной, но принцип действия всегда остается одним и тем же. Выступающий элемент одной из деталей, например, крючок, на короткое время отклоняется в процессе сборки, после чего возвращается в исходное положение за счет упругой релаксации. Прогиб в процессе сборки может быть довольно большим, но когда сборка завершается, напряжение пропадает (в отличие от фиксации с использованием прессового соединения) [6].

Одним из самых серьезных недостатков использования замковых соединений является возможность разрушения деталей в процессе сборки или разборки изделия. Сборочные узлы с такими креплениями могут разрушиться из-за усталостных напряжений. Это особенно важно для сборочных узлов, изготовленных из хрупких или армированных волокнами пластмасс. Поскольку элементы замка отливаются вместе с деталью, их повреждение будет означать разрушение всей детали. Отремонтировать замки очень сложно или вообще невозможно. Чтобы предотвратить большую деформацию, используют ограничители отклонения упругих элементов. Другим недостатком замковых соединений является необходимость точного соблюдения допусков на детали. Контролируют геометрию замков и напряженное состояние после сборки. Избыточные натяг или напряжение могут привести к разрушению соединения, а недостаток натяга может привести к неточному расположению деталей или ослабленной их фиксации.

6.3.2. Типы замковых соединений

Замковые соединения обычно классифицируют следующим образом: 1) с помощью крючков; 2) с помощью кольцевых выступов и впадин; 3) с помощью шаровой пяты и сферического углубления; 4) поворотные замковые соединения. Кроме того, замковые соединения делятся на разъемные и неразъемные [6, 12, 14]. Кольцевые соединения используются для сборки изделий цилиндрической формы (рис. 6.9-6.11).

Крышка, показанная на рис. 6.9, имеет кольцевой буртик, который в процессе сборки на короткое время отклоняется, когда она с усилием садится на горлышко бутылки. Конструкцию соединения, позволяющую использовать повторную сборку

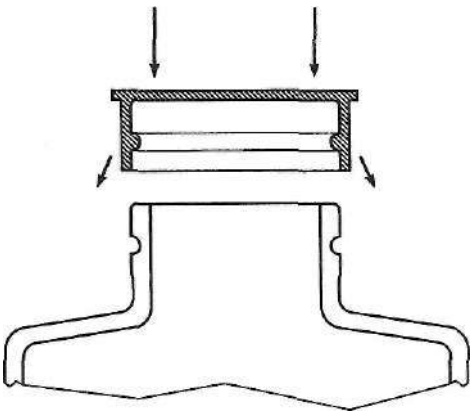


Рис. 6.9. Кольцевые соединения обычно используется в изделиях из упругих пластмасс. Чаще всего кольцевое соединение используется для посадки крышки на емкость

и разборку, называют разъемной. В отличие от прессового соединения крепление с помощью замка обычно проектируются таким образом, чтобы после сборки зона сопряжения находилась в ненапряженном состоянии.

Цилиндрические изделия, которые изображены на рис. 6.10, отличаются друг от друга: то, которое находится справа, является разъемным, а слева — неразъемным.



Рис. 6.10. Сборочные узлы с замковыми соединениями могут быть сконструированы как разъемными, так и неразъемными



Рис. 6.11. Установочные и обратные углы замкового соединения влияют на введение одной детали в другую и разделение деталей

В разъемных соединениях используются установочные и обратные углы, что обеспечивает возможность введения одной детали в другую и их соединения. Неразъемное соединение самофиксируется, поскольку в нем обратный угол равен 90 град. Эти углы используются в качестве единственного средства для управления усилиями при надевании и съеме крышки с данной геометрией.

Сферическое замковое соединение, как показано на рис. 6.12, представляет собой разновидность кольцевого соединения. Замковые соединения кольцевой формы чаще всего используются при сборке изделий из податливых или гибких материалов.

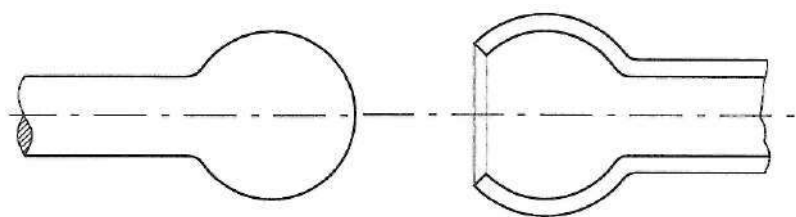


Рис. 6.12. Пример сферического замкового соединения

Усилия, необходимые для сборки и разборки изделий из более жестких материалов, могут оказаться слишком высокими. В одной из деталей из таких материалов обычно оформляют прорезы подобно тому, как это изображено на рис. 6.13.

Кольцевое замковое соединение с прорезами (см. рис. 6.13) представляет собой набор крючков, параллельных цилиндрическим стенкам. Усилия для сборки и прочность сборочного узла можно регулировать, изменяя число и конструкцию отдельных консольных балочек с выступами, которые составляют разрезанное кольцо.

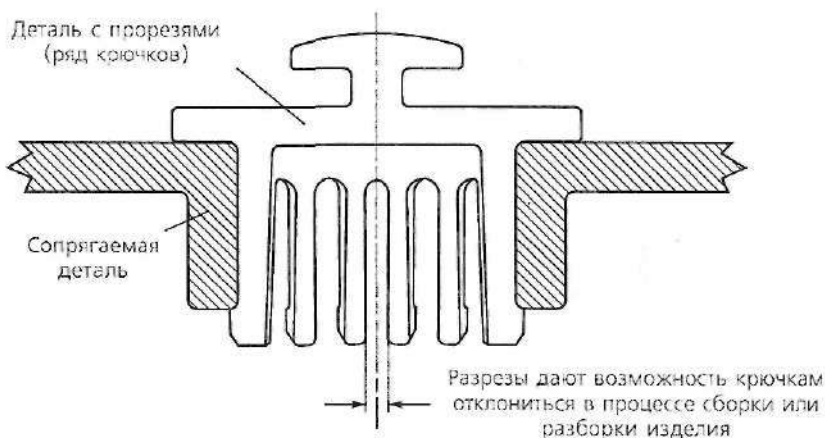


Рис. 6.13. Кольцевое замковое соединение с прорезями на одной из деталей фактически представляет собой набор крючков. Эта конструкция лучше подходит для жестких пластмасс

Наиболее часто используемый крючок представляет собой штырь с выступом, который изгибается и фиксируется в поднутрении сопрягаемой поверхности. Такие соединения могут быть сконструированы как разъемными, так и неразъемными. Крючки обычно представляют собой продолжения стенок детали или расширение (обычно в перпендикулярном направлении) номинальной стенки (то есть не в плоскости балок). Варианты конфигураций крючков приведены на рис. 6.14-6.24.

Подобно кольцевым замковым соединениям, замковые соединения с помощью крючков могут быть разъемными или неразъемными. Сборочный узел, который

показан на рис. 6.14, а, является неразъемным, а изображенный на рис. 6.14, б можно разобрать, просто вытаскивая крышку из места ее установки. Для соединений такого типа усилия для снятия крышки по величине совпадают с усилием при ее установке. Желательно использовать минимальные усилия при сборке изделия, но иногда необходимы именно высокие усилия, например, в игрушках или в корпусах бытовых приборов, где есть опасность поражения электрическим током. В этом случае могут быть использованы обратные углы величиной 90 град. Иногда при наличии обратного угла величиной 90 град в конструкцию деталей вводят дополнительные элементы для облегчения разборки изделия (например, когда надо произвести ремонт), как показано на рис. 6.14, с.

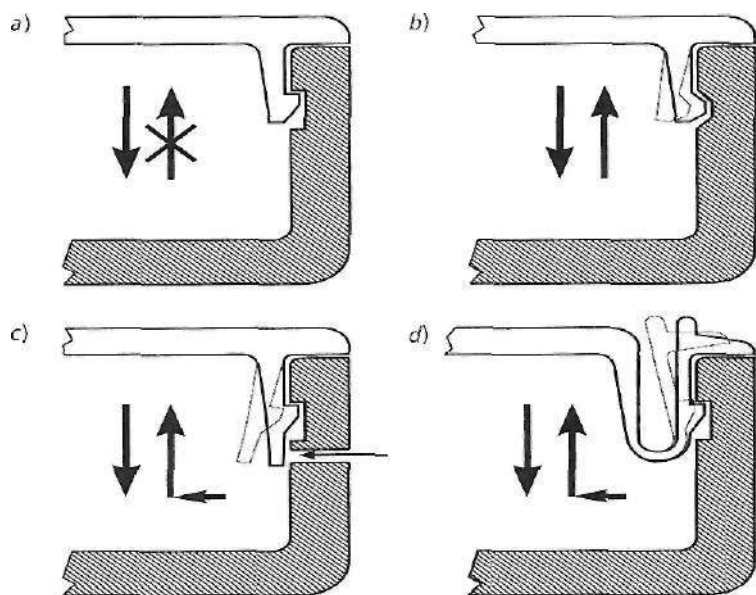


Рис. 6.14. Крючки, обычно используемые для сборки пластмассовых изделий. Возможен выбор как разъемных, так и неразъемных конструкций

Соединение, показанное на рис. 6.15, не может быть разделено с помощью простого тянущего усилия в осевом направлении, а соединение, изображенное на рис. 6.16, может быть легко разделено благодаря острому обратному углу. Колпак колеса, отлитый из термопласта (рис. 6.17), представляет собой пример изделия, которое можно разобрать, прикладывая усилие в осевом направлении.

Возможность повреждения крючка относительно мала, поскольку его максимальный прогиб в процессе сборки определяется размерами поднутрения. Возможность же чрезмерного прогиба, наоборот, достаточно велика, что обусловлено конструкцией изделия (см. рис. 6.14, с). В любом случае, для крючка, у которого обратный угол равен 90 град, необходимо предусматривать ограничители его отклонения.

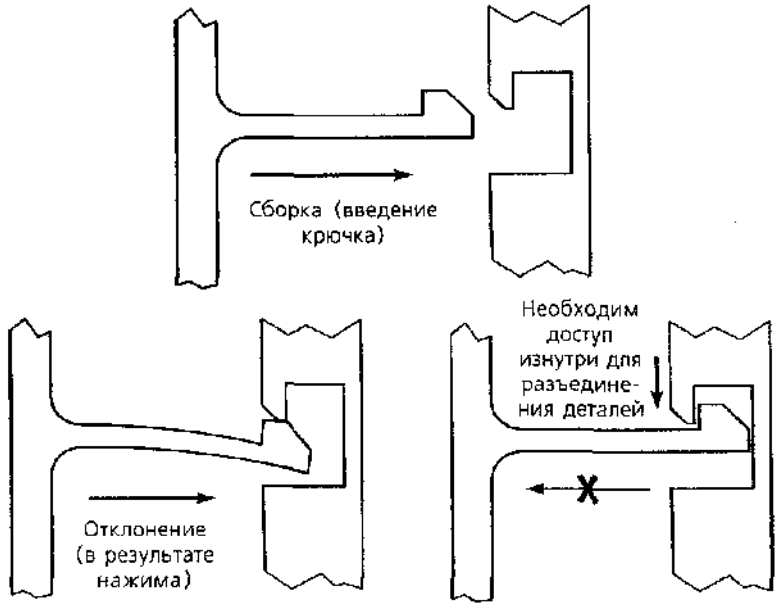


Рис. 6.15. Крючок с обратным углом 90 град приходится отгибать вручную для разборки соединения

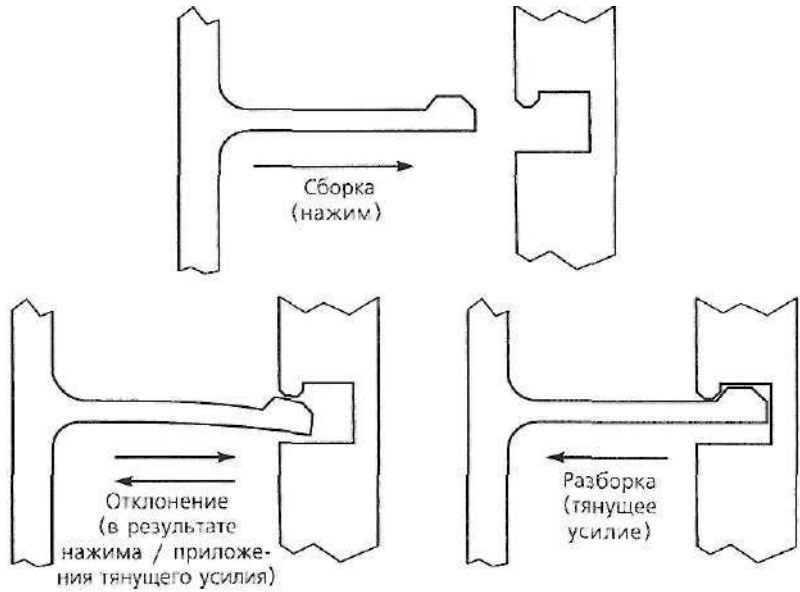


Рис. 6.16. Крючок с острым обратным углом может легко участвовать в образовании замкового соединения, а также демонтироваться. Углы наклона и геометрическая форма крючка позволяют регулировать усилия при сборке и разборке изделия



Рис. 6.17. Колпак автомобильного колеса, изготовленный литьем под давлением, включает в себя набор разъемных крючков

В сборочном узле с крючком, показанным на рис. 6.18, отклонение крючка ограничено, и вероятность его повреждения уменьшена. U-образные крючки (рис. 6.14, С, 6.19 и 6.20) заложены в конструкцию деталей, чтобы снизить максимальный прогиб

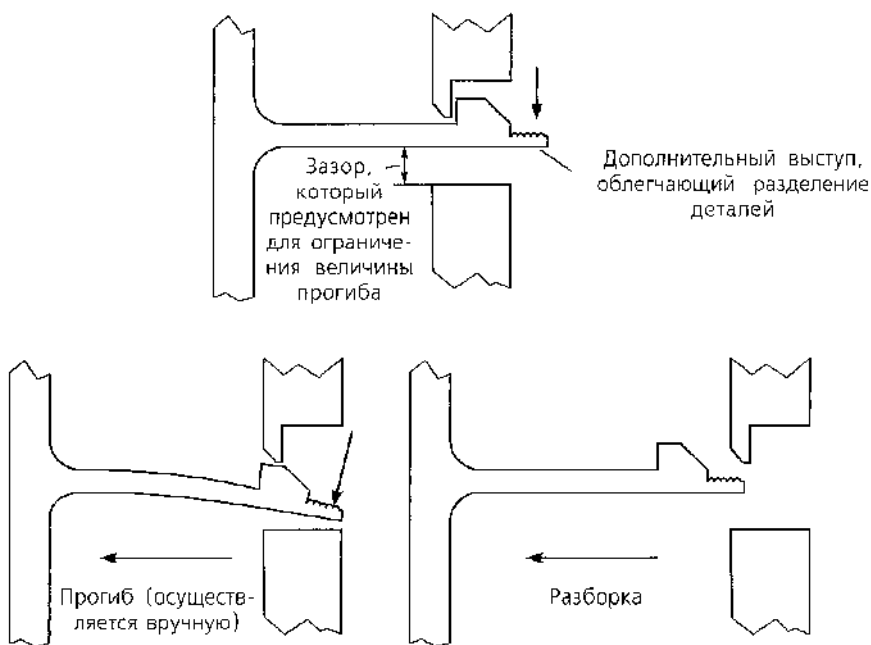


Рис. 6.18. Самозапирающееся (обратный угол 90 град) вручную разбираемое замковое соединение с помощью крючка. Когда требуются отклоняемые вручную крючки, следует в отливке предусматривать ограничители, которые бы минимизировали возможность разрушения крючка из-за избыточного напряжения

крючка. Последнее достигается за счет изменения глубины поднутрения, толщины стенок, длины крючка и радиуса кривизны. U-образный крючок позволяет получить относительно большой прогиб.

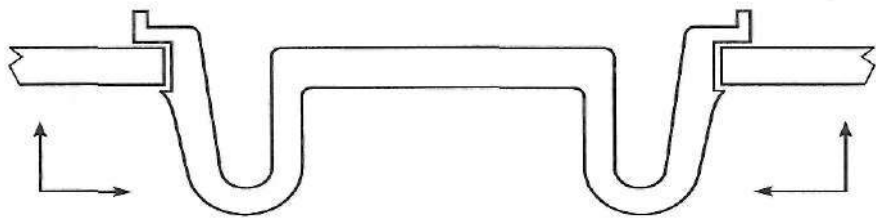


Рис. 6.19. Замковые соединения с помощью крючков U-образной формы, использующиеся в крышках отсека для батареек, когда предполагается многократное открывание крышки. Вероятность поломки замка уменьшена, поскольку в конструкции предусмотрены элементы ограничения отклонения крючков

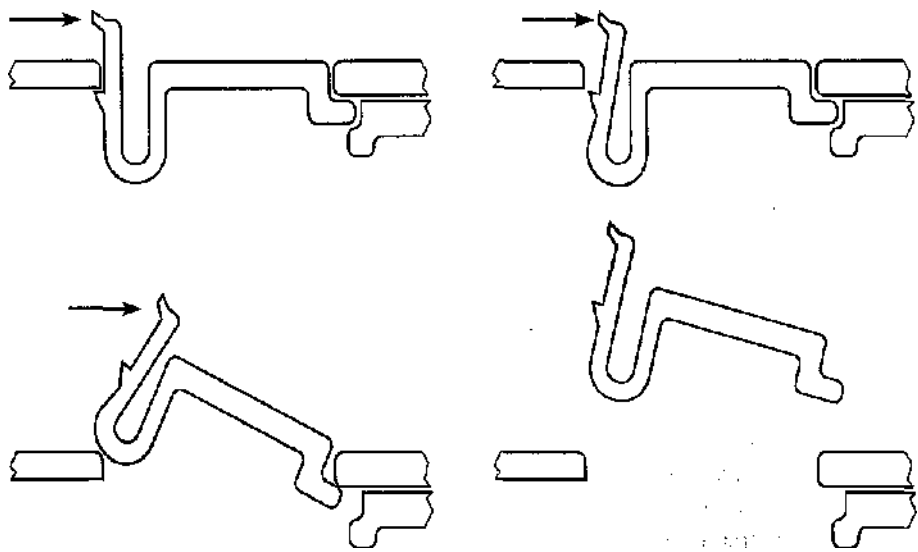


Рис. 6.20. Последовательность извлечения крышки с U-образным крючком

Крючки обычно отливаются вместе с корпусом для монтажа элементов электронной схемы сборочных компонентов (рис. 6.21). Крючок с обратным углом 90 град должен зафиксировать сборочные компоненты так, чтобы исключить их смещение при вибрациях. Однако проконтролировать величину натяга трудно. Уменьшенный обратный угол (< 90 град), который показан справа на рис. 6.21, обеспечивает небольшой натяг и постоянное давление. Когда используются малые обратные углы,

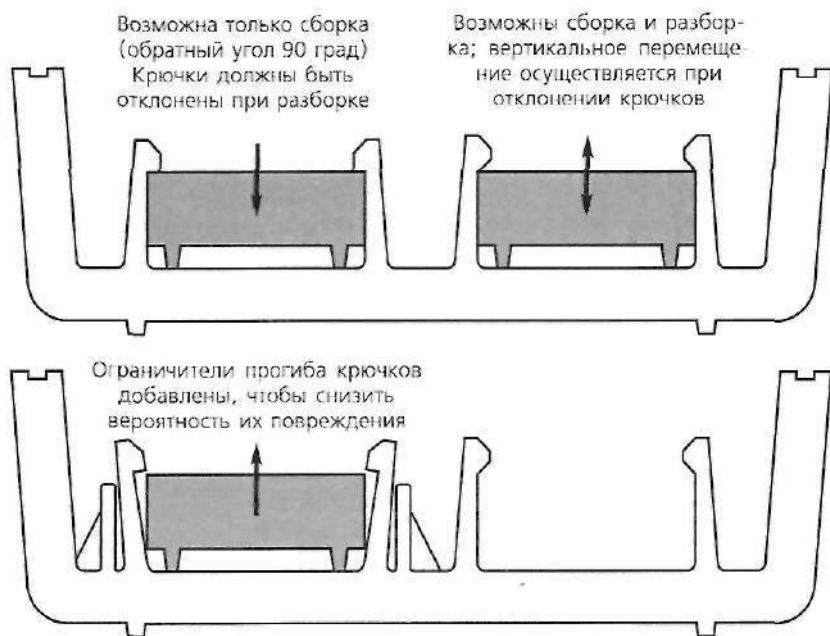


Рис. 6.21. Платы и источники питания монтируются на литом под давлением шасси с помощью крючков. Когда обратный угол у крючков составляет 90 град (то есть для разборки необходимо их ручное отклонение), в конструкцию могут быть дополнительно введены ограничители отклонения, которые уменьшают вероятность повреждения

смонтированный компонент очень легко извлечь при осевом перемещении. Усилия, которые необходимы для сборки и разборки замкового соединения, всегда имеют большое значение для правильного проектирования крючков.

Усилия при сборке и разборке узла, в состав которого входит стержень (рис. 6.22, *а*), очень велики из-за короткого крючка. Усилия при сборке и разборке могут быть уменьшены за счет увеличения длины крючка (рис. 6.22, *б*). В этой конструкции усилия при сборке и разборке должны быть одинаковыми [6].

Управление натягом играет важную роль для правильного проектирования сборочных узлов с крючками. При этом очень большое значение имеет точность соблюдения размеров. Требования к размерам могут быть снижены, когда в конструкции используются компоненты, работающие как пружины, или изготовленные из эластомера (рис. 6.23).

Крючки отливаются отдельно, и только после этого устанавливаются на другие пластмассовые или металлические детали с помощью механических крепежных элементов или фиксации. Рассмотрим детали, изображенные на рис. 6.21. В данном случае велика вероятность повреждения крючка из-за многократных отклонений. Разрушение одного совместно изготовленного крючка может привести к выходу из строя всего каркаса. Альтернативой встроенному крючку может быть использование

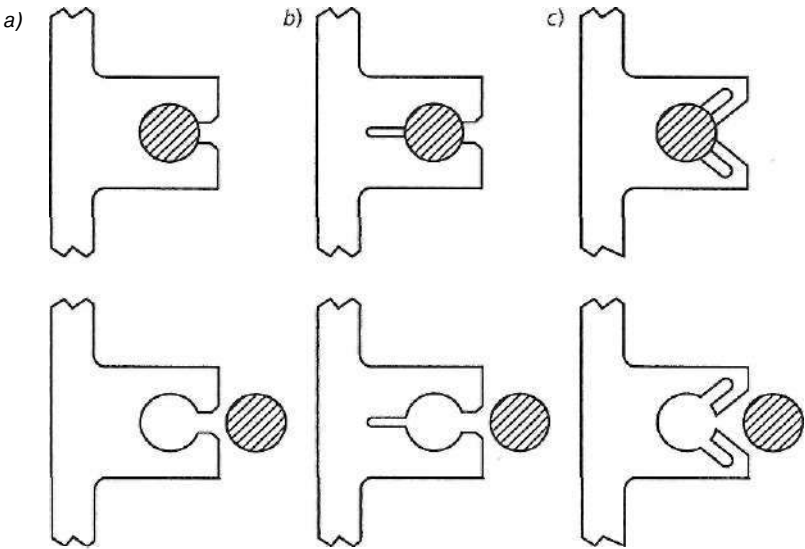


Рис. 6.22. Геометрия крючка может быть изменена, чтобы получить нужные усилия при сборке и разборке

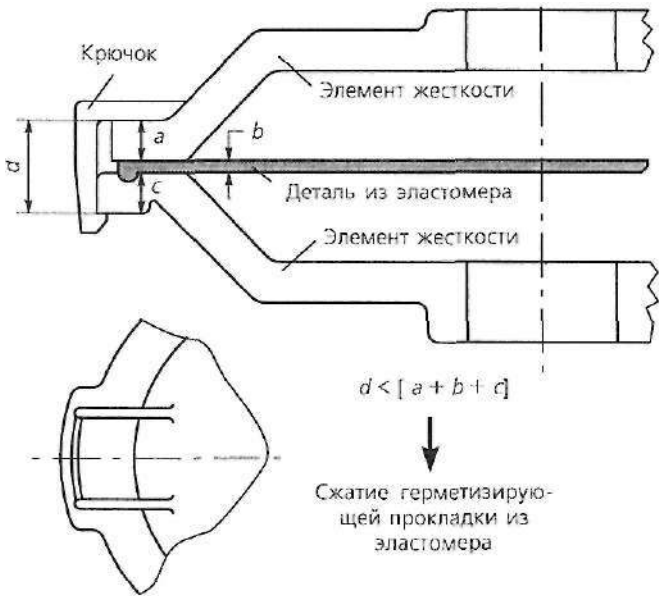


Рис. 6.23. Компоненты из эластомера или вспененного материала используются в соединениях с крючками, чтобы снизить требования к допускам на размеры деталей и обеспечить натяг, предотвращающий нежелательное воздействие вибрации

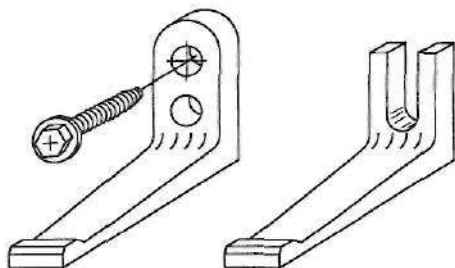


Рис. 6.24. Крючки иногда отливаются отдельно, а затем устанавливаются на другие пластмассовые или металлические детали

съемного. Крючок (рис. 6.24) крепится к каркасу с помощью самонарезающих винтов. Использование подобного крючка может упростить техническое обслуживание изделий. Крючки такого типа используются для деталей, изготовленных из очень хрупких полимерных материалов.

6.3.3. Крючки, отлитые под давлением

Использование замковых соединений с помощью крючков позволяет снизить затраты на сборку, но отливать элементы замка вместе с самой деталью довольно сложно. Детали имеют поднутрения, что ставит проблему их съема с литейной формы. Крючки бывают длинными и узкими, что затрудняет заполнение литейной формы в процессе литья под давлением.

Крючки располагаются вдоль боковых стенок детали (рис. 6.25). Они могут быть отлиты в простой литейной форме, состоящей из двух частей.

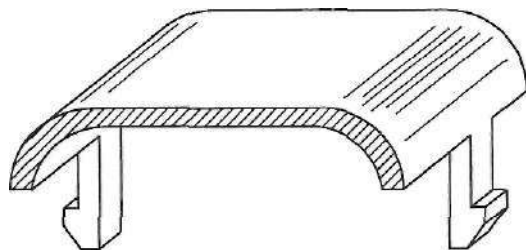


Рис. 6.25. Необходимость формования крючков может увеличить стоимость и сложность конструкции литейной формы. В этом случае крючки устанавливаются таким образом, чтобы не потребовалось специальных процедур для выталкивания отливки из литейной формы

Изменение конструкции может создать существенные проблемы при выталкивании деталей. Если самофиксирующийся (обратный угол 90 град) крючок направлен внутрь формующей полости (то есть повернут на 180 град), отливка не может быть извлечена или отделена от полости (рис. 6.26). Поднутрение с обратным углом 90 град фиксируется в формующей полости, и его извлечение невозможно. Иногда

выталкивание возможно для крючков с величиной обратного угла меньше 90 град (рис. 6.27). Крючки с уменьшенными обратными углами могут быть вытолкнуты из формующей полости, но при этом деталь будет подвергаться воздействию напряжений растяжения и изгиба. При этом деформация крючка сохраняется, поскольку в момент выталкивания отливка имеет высокую температуру и не обладает необходимой жесткостью. Следовательно, отливки, выталкивающиеся путем простого приложения тяговых усилий, будут не строго соответствовать допускам на размеры.

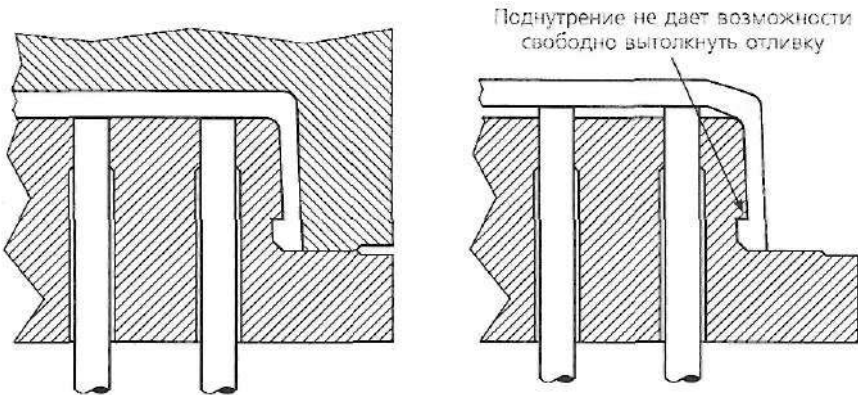


Рис. 6.26. Крючки с обратным углом 90°, обращенные внутрь полости литевой формы, не могут быть вытолкнуты из нее из-за поднутрений, в которые входят выступы крючков. В этом случае необходимы специальные процедуры для выталкивания детали из литевой формы

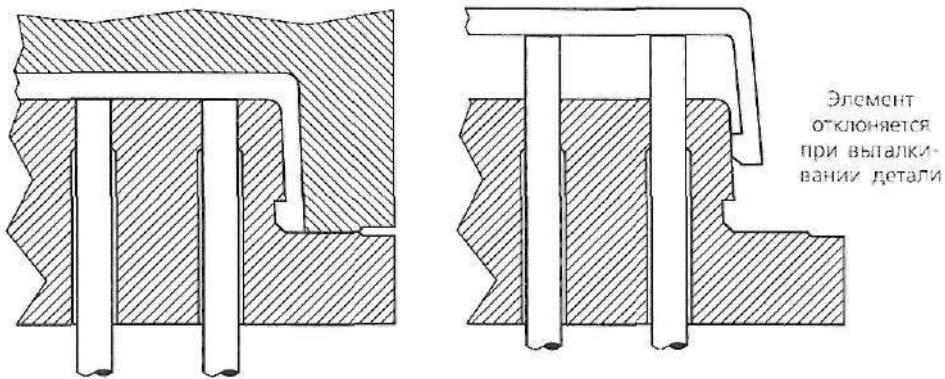


Рис. 6.27. Конструкция элементов замка позволяет вытолкнуть деталь из формующей полости простым нажимом. Этот метод больше подходит для деталей из гибких, эластичных пластмасс

Крючки, выходящие за пределы стенки отливки, не могут быть вытолкнуты из литейной формы без специальных механизмов. Крючок должен выталкиваться с помощью толкателя (рис. 6.28). Наклонный толкатель является подвижной частью пуансона, освобождающей поднутрения при выталкивании отливки. Потребность в наклонном толкателе существенно влияет на стоимость оснастки, но уменьшает стоимость самой сборки с помощью крючков. В любом случае нужно учитывать, что использование наклонного толкателя будет в какой-то степени ограничивать возможности конструкции литейной формы. Ребра, бобышки или уступы не могут быть расположены вблизи толкателя, поскольку он должен свободно горизонтально перемещаться по поверхности детали в процессе выталкивания (рис. 6.29).

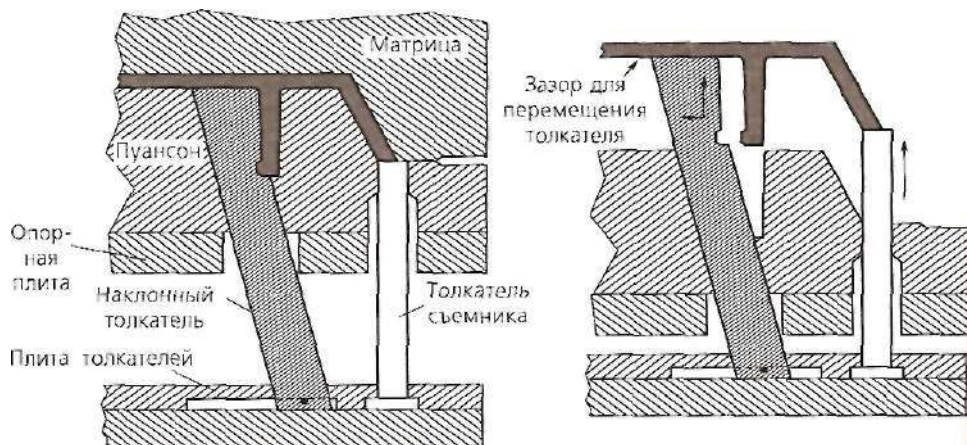


Рис. 6.28. Наклонный толкатель используется для выталкивания детали с крючком

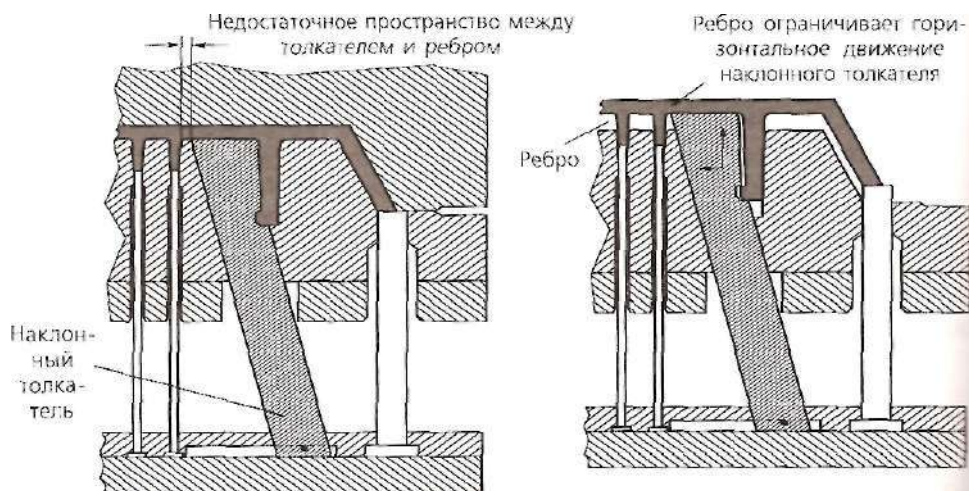


Рис. 6.29. Ребра, ступеньки и бобышки не должны располагаться вблизи крючка, так как «будут ограничивать горизонтальное перемещение толкателя»

Прямые толкатели также должны быть модифицированы, чтобы можно было изготавливать полукруглые крючки (рис. 6.30). Толкатель контактирует с нижней поверхностью детали. В этом случае может понадобиться извлечение отливки вручную или с помощью робота-манипулятора, а также потребуются использование механизма двойного выталкивания.

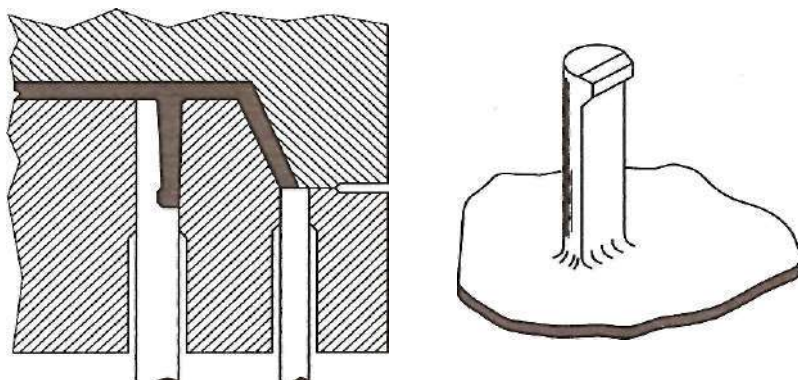


Рис. 6.30. Для извлечения деталей, снабженных скругленными крючками, могут понадобиться толкатели специальной формы

Другие способы упрощения конструкции крючков изображены на рис. 6.31-6.32. Деталь, показанная на рис. 6.31, имеет два крючка, расположенные на основной стенке. Крючок слева требует использования наклонной подвижной полуформы, а крючок справа может быть отлит в простой матрице с пуансоном (рис. 6.32). Это применяют для изготовления элементов корпусов бытовой техники.



Рис. 6.31. Геометрия детали может быть изменена с учетом необходимости извлечения отливки. Прорези в стенках позволяют отказаться от использования специальных перемещений элементов литейной формы

Этот метод неприменим при изготовлении «крышек» бытовых приборов, так как прорезы на поверхности крышек, как правило, недопустимы. Геометрия крючков, изготовленных таким способом, будет иметь некоторые ограничения (см. рис. 6.32). Боковые стороны крючка должны иметь клиновидную форму, чтобы уменьшить вероятность касания матрицы с пуансоном в процессе смыкания литевой формы

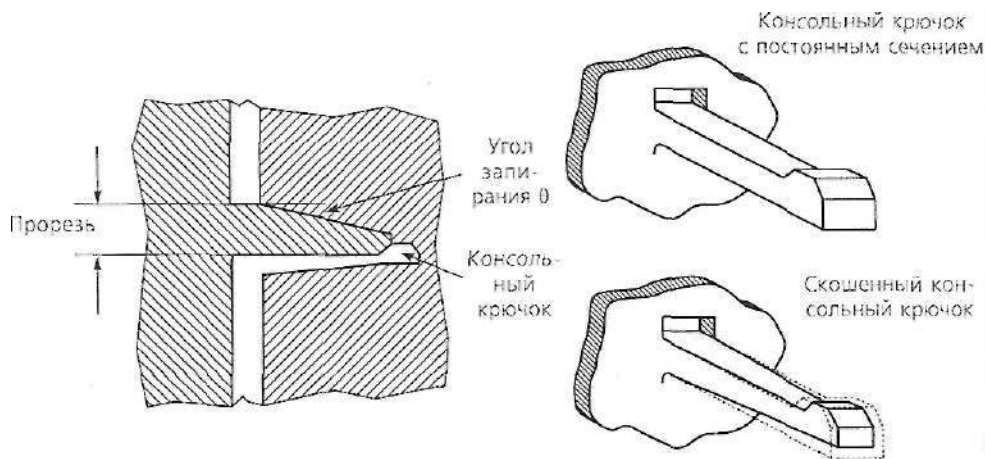


Рис. 6.32. Консольный крючок может быть отлит в простой литевой форме, состоящей из двух частей, без использования специального перемещения ее элементов. Этот метод можно использовать, если конструкция допускает наличие прорези у основания крючка

и улучшить течение расплава. Верхняя горизонтальная поверхность крючка (см. рис. 6.32) должна быть параллельна вертикальной стенке, а нижняя горизонтальная поверхность — на усмотрение конструктора — может быть с наклоном. Размеры прорези в детали определяются максимальной шириной крючка, суммой натяга, шириной уступай величиной уклона, связанной с углом запираания, в другом направлении.

6.3.4. Проектирование замковых соединений

Проектирование замковых соединений не отличается от проектирования любого другого пластмассового изделия. При этом нужно учитывать как эксплуатационные требования, так и возможности изготовления. Особое внимание следует уделять конструкционным требованиям, поскольку 1) элементы замка подвергаются значительному изгибу в процессе сборки и разборки, 2) элементы замка обеспечивают механическую целостность сборочного узла. Механические и конструктивные характеристики сборочных узлов с использованием замковых соединений должны рассматриваться как часть конструкторского анализа всего изделия (см. главу 4). Простейшим способом такого анализа является рассмотрение элементов замка отдельно от детали. Крючки рассматриваются как штыри с постоянным / переменным

поперечным сечением. Классические формулы расчета балок пригодны для расчета крючков, особенно тех, которые находятся на стенке корпуса детали и имеют соотношение длины к толщине более чем 5:1 [8]. Метод конечных элементов дает более точные значения напряжений и деформаций, вызванных прогибом крючков. Более полный анализ дает возможность оценить прогиб прилегающих участков стенок, влияние радиусов закруглений (галтелей) и геометрии [8-10].

Расчеты выполняются для определения кратковременных напряжений, возникающих в процессе сборки и для определения долговременных эксплуатационных характеристик. В последнем случае следует учитывать характеристики ползучести или релаксации напряжений материала, из которого будет отливаться деталь. Кратковременные характеристики материала обычно используют для анализа изгиба крючка в процессе сборки /разборки.

Изгибы и напряжения крючков, изображенных на рис. 6.33, можно рассчитать по формулам для балок с постоянным или линейно изменяющимся поперечным сечением. На практике крючки с постоянным поперечным сечением используются редко из-за неравномерного распределения напряжений по длине. Скошенные крючки

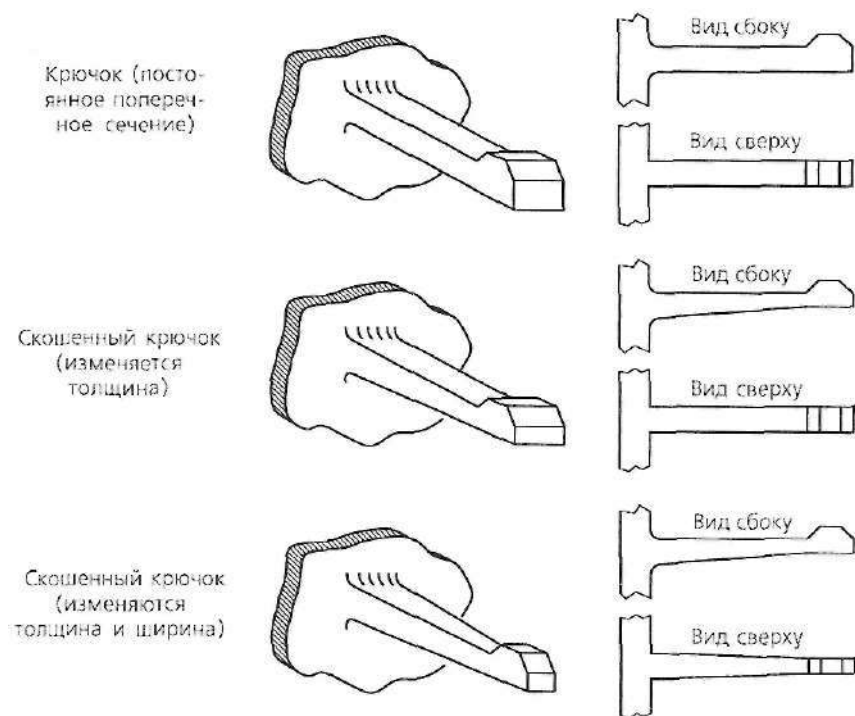


Рис. 6.33. Крючки могут быть скошены по ширине и по толщине. По сравнению с крючками, имеющими постоянное поперечное сечение, скошенные крючки обладают более равномерным распределением напряжений и допускают более высокий изгиб

характеризуются более равномерным распределением напряжений по длине и дают возможность значительно увеличить допустимые значения прогиба при максимальной нагрузке. Это уменьшает вероятность разрушения и дает возможность использовать поднутрения большей величины.

Чаще всего используют крючки с уменьшающимся на 50 % сечением от места опоры до конца (рис. 6.34).

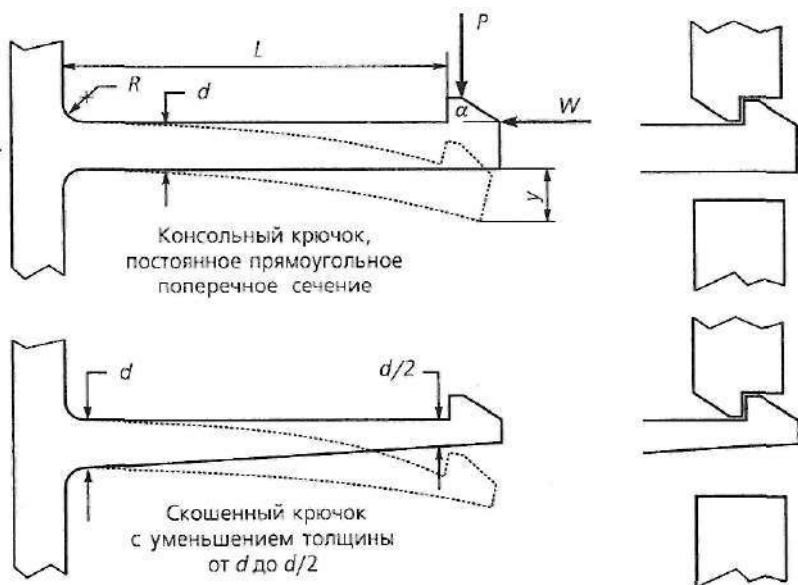


Рис. 6.34. Консольные крючки с постоянным прямоугольным поперечным сечением и скошенные



Рис. 6.35. Когда крючок подвергается нагружению на изгиб, в нем появляются напряжения растяжения/сжатия. Напряжения максимальны на наружных поверхностях в зоне стыка крючка с номинальной стенкой

Соотношение между отклонением конца крючка с постоянным прямоугольным поперечным сечением и максимальной деформацией при растяжении (при этом не учитывается влияние выступа или радиуса закругления в основании) записывается следующей формулой (рис. 6.34, сверху) [11]:

$$y = 0,67 \cdot \varepsilon \cdot L^2 / d, \quad (6.9)$$

где ε — максимальная деформация при растяжении; d — толщина крючка; y — величина отклонения; L — длина крючка.

Для крючка (см. на рис. 6.34, снизу):

$$y = 1,1 \cdot \varepsilon \cdot L^2 / d. \quad (6.10)$$

Сравнение двух уравнений показывает, что допустимое отклонение скошенного крючка будет на 60 % больше, чем для крючка с постоянным прямоугольным поперечным сечением. В этом случае снизится предельное напряжение растяжения и уменьшатся усилия при сборке / разборке.

Допустимые значения деформации зависят от свойств используемого материала. Допустимые значения деформации часто представляют в виде выраженной в процентах части деформации, соответствующей пределу текучести (рис. 6.36) при соответствующих температуре, относительной влажности и скорости деформирования. Приведенные выше расчеты сделаны исходя из предположения, что сопрягаемая деталь жесткая. Более высокий уровень допустимых деформаций характерен для податливых пластмасс. Если деталь подвергается нагружению в разных направлениях, допустимые значения деформации уменьшаются. Специальные рекомендации по использованию полимерного материала можно получить у его поставщика.



Рис. 6.36. Максимально допустимые значения деформации изменяются в зависимости от типа материала

Рассчитанные с помощью соответствующих уравнений значения напряжений и деформаций должны быть скорректированы с учетом реальной концентрации напряжений. Коэффициент концентрации напряжения зависит от радиуса и толщины стенок (рис. 6.37). Увеличение радиусов закругления приводит к уменьшению коэффициента учета концентраций напряжений и к проблемам при заполнении литьевой формы. Величина радиуса закругления должна обеспечивать необходимую прочность и приемлимый внешний вид. Значений радиуса меньше 0,38 мм следует избегать [11].

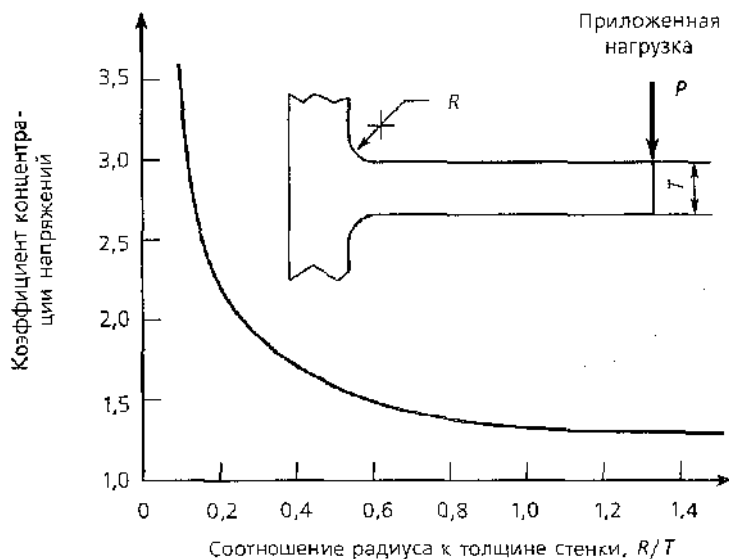


Рис. 6.37. Величина напряжений в месте пересечения консоли крючка со стенкой детали будет выше рассчитанных с помощью стандартных расчетных формул для концентрации напряжений

Сила P отклонения для крючка с постоянным прямоугольным поперечным сечением (см. рис. 6.34) может быть определена по формуле:

$$P = [b \cdot d^2 / b] \cdot [E_s \cdot \epsilon / L], \quad (6.11)$$

где b — толщина консоли крючка; E_s — секущий модуль упругости (зависящий от деформации).

Секущий модуль используется вместо начального модуля упругости для материалов, подвергающихся значительной деформации, так как максимальные значения нагрузки в данном случае будут за пределами области пропорционального изменения деформации от напряжения (рис. 6.38).

Сила W в зоне контакта элементов замка (усилие нажима и разъединения см. рис. 6.34) при сборке соединения может быть определена как сумма сил изгиба и трения:

$$W = P[(\mu + \tan \alpha) / (1 - \mu \cdot \tan \alpha)], \quad (6.12)$$

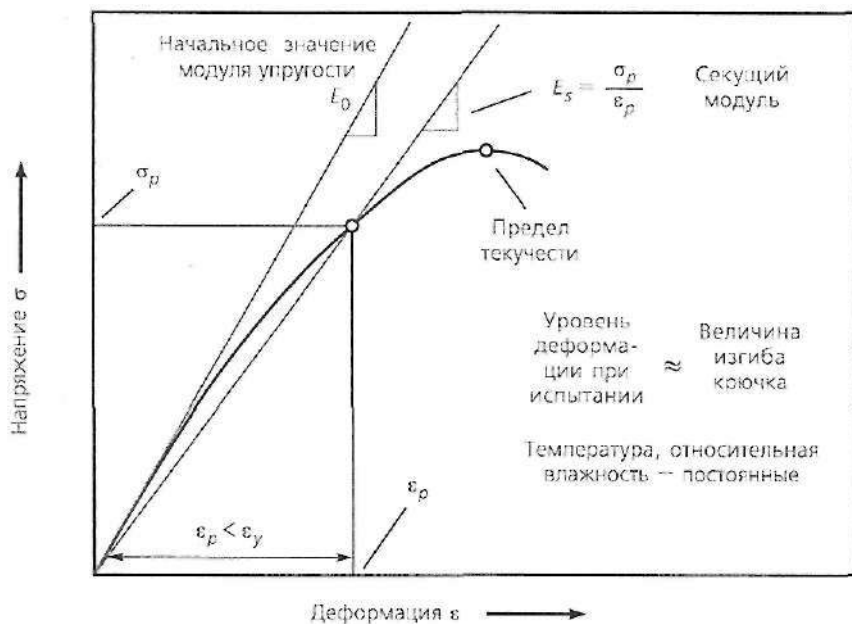


Рис. 6.38. Большой изгиб крючков в процессе сборки вынуждает пользоваться при расчетах значением секущего модуля, зависящего от величины деформации

где μ — коэффициент трения между сопрягаемыми поверхностями; α — угол отклонения в процессе сборки (установочный угол) или разборки (обратный угол).

Следует заметить, что угол отклонения меняется в процессе сборки (рис. 6.39).

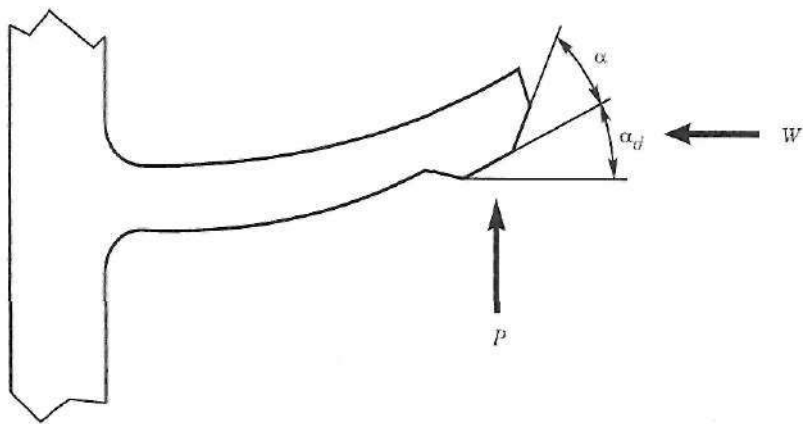


Рис. 6.39. Угол отклонения α , определяющий усилие нажима при сборке, изменяется вместе с прогибом крючка



Рис. 6.40. Классический отклоняющийся шарнир часто используется вместе с крючками для закрепления крышек на корпусе контейнера, имеющего форму ракушки

Соединения с использованием крючков универсальны. Замковые соединения, особенно кольцевые, часто используются совместно с петлями и стяжками. Сочетание этих методов обеспечивает оптимальный способ крепления.

6.4. Механические крепежные элементы

6.4.1. Общие положения

В настоящее время для сборки пластмассовых изделий применяются достаточно разнообразные механические крепежные элементы (детали). Многие из таких элементов изначально были разработаны для крепления металлических или деревянных деталей, а затем просто были адаптированы для крепления пластмассовых деталей. Другая группа крепежных элементов была специально разработана для соединения деталей из пластмасс. К механическим крепежным элементам относятся машинные винты, самонарезающие винты, металлические вставки, вставные фиксаторы, скоростные зажимы и гайки, заклепки, шпильки, штифты, скобки, шарниры и большой набор жестких специальных крепежных деталей. Некоторые типы крепежных элементов могут быть использованы для постоянных или разъемных соединений, которые дают возможность осуществлять ремонт деталей или их замену. Крепежные элементы пригодны для прочного и эффективного соединения деталей из термопластов и реактопластов с деталями из подобных или разнородных материалов. Они отличаются разнообразием размеров и материалов, и в большинстве случаев предназначены для традиционных методов соединения.

Почти все механические крепежные элементы изготавливаются из металла, а значит их размеры и свойства практически не зависят от температуры, времени и влажности. Крепежные элементы, изготовленные из коррозионностойкой стали или из

полимерных материалов, могут быть использованы при очень высокой влажности и даже в коррозионно-активной среде. Машинные (стандартные) винты и самонарезающие винты идеально подходят для изделий, в которых нужно контролировать затяжку, например, для сосудов с жидкостью, закрывающихся с помощью комбинации прокладок и винтов. Другое преимущество механического крепления заключается в том, что предельная прочность соединения достигается сразу же, чего нельзя сказать о клеевых соединениях. Механические крепежные элементы иногда используются вместе с клеями для соединения пластмассовых деталей больших размеров. Крепежные элементы удерживают соединение в нужном положении, а клей при затвердевании добавляет конструкции прочность.

Вместе с тем механическими крепежными элементами необходимо пользоваться осторожно, поскольку они, в большинстве случаев, являются точечными элементами и создают напряжение в ограниченной области изделия. Кроме того, для многих из них необходимо создавать отверстия, являющиеся концентраторами напряжений. При проектировании нужно учитывать, что стальные крепежные элементы и пластмассовая деталь имеют разные КЛТР. С помощью одних только крепежных элементов без дополнительных герметиков (или прокладок) невозможно получить газонепроницаемое соединение.

6.4.2. Винты

Винты относятся к широко распространенному виду крепежных элементов для сборки пластмассовых изделий. Они обычно используются для разъемных конструкций. Существует большое количество разновидностей конфигураций и винтов, которые могут быть пригодны для соединения деталей из пластмасс. Применительно к последним сборку изделий осуществляют с помощью:

- машинных (стандартных) винтов и гаек (то есть болтов);
- машинных винтов и металлических резьбовых вставок или резьб, изготовленных литьем под давлением;
- самонарезающих винтов.

Каждая из этих разновидностей будет рассмотрена отдельно.

Использование механического крепления винтами позволяет выполнять повторную переработку деталей из пластмасс. Для этого детали должны быть простыми, недорогими и сделанными из повторно перерабатываемых материалов [17,18].

Количество винтов, используемых для сборки и разборки конкретного изделия, должно быть минимальным и их размеры и типы должны быть, по возможности, стандартными. Винты могут быть быстро удалены с помощью специальных пневматических отверток [18]. Самонарезающие винты — наиболее предпочтительный для сборки вид соединения, так как они не требуют введения металлических резьбовых вставок или применения гаек. Металлические вставки трудно удалить при разборке. Они создают ряд проблем при гранулировании и отделении пластмассы во время повторной переработки. Большинство металлических вставок производится из таких немагнитных металлов, как латунь и удалить их из пластмассового «лома» с помощью магнита невозможно.

6.4.2.1. Машинные винты и гайки

Машинные винты, гайки и шайбы широко используются для крепления деталей из пластмассы. Их применение ограничено соединениями, требования к внешнему виду которых не являются решающими, так как гайка и головка болта выступают над поверхностью и легко заметны [15,19-21]. Головку болта и гайку обычно заглубляют ниже уровня поверхностей деталей (или раззенковывают отверстие), чтобы улучшить его внешний вид. В некоторых случаях в процессе литья под давлением в одной из поверхностей делают выемки гексагональной формы для установки гайки таким образом, чтобы не дать ей вращаться и тем самым упростить операцию сборки. Для улучшения внешнего вида сборочного узла иногда используют декоративные крепежные элементы, например, колпачки для гаек. Машинные винты и гайки относятся к наиболее распространенным и доступным видам крепежных деталей соединений. Основным недостаток, связанный с их использованием, заключается в необходимости доступа к верхней и нижней поверхностям (левой и правой сторон) изделия в процессе сборки. Это, в сочетании с необходимостью вращения, делает процесс сборки и его автоматизацию при использовании машинных винтов достаточно трудным.

Соединения плоских (листовых) пластмассовых деталей или фланцев с помощью болтов можно осуществлять, используя отлитые или просверленные отверстия. Если соединяемые детали изготовлены из различных материалов с разными КЛТР, то необходимо использовать температурные компенсаторы, пазы или эластичные втулки, чтобы согласовать различные расширения (рис. 6.41).

Если машинные винты и гайки применяют для крепления деталей с тонкими стенками (например, крышек корпусов бытовых приборов), в этих деталях должны быть оформлены полые цилиндрические бобышки для повышения прочности материала в области вокруг винта, чтобы исключить чрезмерное искривление поверхностей, возникающее в процессе затягивания болтового соединения (рис. 6.42). Зазор между бобышками и винтами должен быть приблизительно равен 0,25 мм, чтобы упростить соединение и компенсировать температурные изменения и разницу в размерах [15]. Толщина стенок бобышек должна обеспечивать сопротивление сжатию и конструкционную стабильность изделия.

В процессе сборки болты затягиваются предварительно (то есть после достижения начального контакта, они дополнительно затягиваются). Это необходимо для компенсации разности между КЛТР деталей, отклонения размеров и минимизации появления зазоров в результате релаксации напряжений и вибраций. Стальные болты могут повредить пластмассовое изделие, если крутящий момент будет избыточным. Вероятность этого особенно высока при повторной сборке, когда невозможно контролировать усилия затяжки. Чтобы ограничить деформирование полимерного материала, используют цилиндрические металлические втулки вокруг болтов. Эти втулки могут быть просто вставлены, запрессованы или заформованы в пластмассовую деталь [21].

В таких соединениях нужно дополнительно использовать шайбы, способствующие более равномерному распределению нагрузки как под головкой болта, так и под гайкой, что приводит к уменьшению концентрации напряжений [16,19,21].

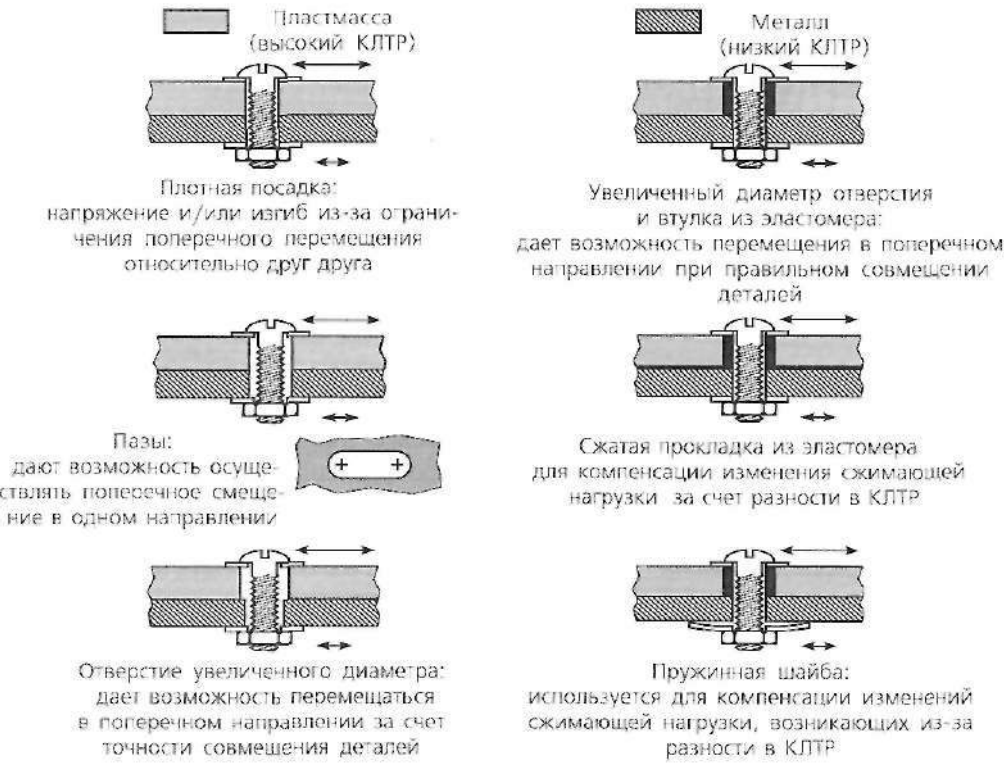


Рис. 6.41. Методы компенсации различия в КТР соединяемых деталей, если они изготовлены из разнородных материалов

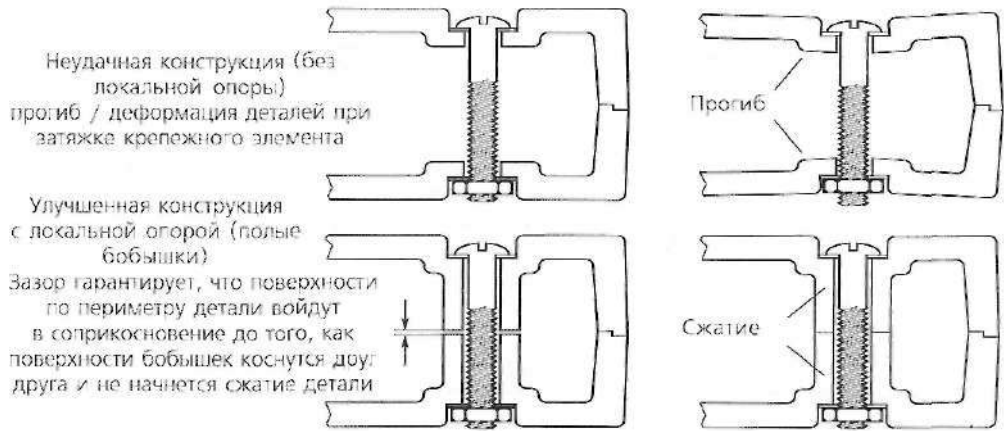


Рис. 6.42. Полые бобышки используются в соединениях с помощью машинных винтов и гаек для ограничения деформации деталей

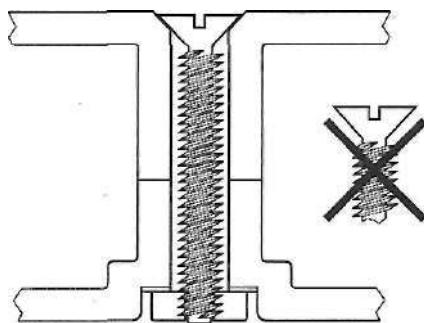


Рис. 6.43- Следует избегать использования болтов с коническими головками, чтобы не допускать возникновения высоких напряжений растяжения/сжатия

Нижняя поверхность головок винтов, используемых при креплении пластмассовых деталей, должна быть плоской. Винты с коническими головками не следует использовать, поскольку они в несколько раз увеличивают уровень напряжений растяжения по сравнению с напряжениями сжатия [15]. Напряжения сжатия, возникающие во время сборки изделия с помощью болтов, могут быть очень высокими, поэтому надо проводить предварительный теоретический расчет таких соединений и экспериментально проверять его результаты. Обычно болты используются для соединения деталей в изделиях с большим сроком эксплуатации, поэтому в этом случае необходимо учитывать эффекты релаксации напряжений. Обычные плоские шайбы в комбинации с коническими, волнистыми или стопорными шайбами компенсируют релаксацию напряжений и изменения размеров, вызванного перепадом температур.

КЛТР большинства пластмасс на порядок больше, чем у стали. Если после сборки изделия происходит изменение температуры окружающей среды, это приводит к увеличению или уменьшению уровня сил сжатия. Низкая температура приводит к потере создаваемого крепежным элементом давления. С другой стороны, повышенные температуры приводят к увеличению сжатия в результате теплового расширения



Рис. 6.44. КЛТР у стальных крепежных деталей меньше, чем у большинства полимерных материалов. Несовпадение КЛТР будет приводить к изменению затяжки за счет сжатия, вызванного изменением температуры окружающей среды

В качестве примера рассмотрим изделие из ПК (рис. 6.44). Оно собрано при комнатной температуре с помощью машинных винтов и гаск 1/4-28 *TP1* (1/4 дюйма диаметр, 28 витков на дюйм). Каждая бобышка имеет длину 1,0 дюйм в осевом направлении и суммарная их длина 2,0 дюйма. Как только завершается предварительное завинчивание гайки и сопрягаемые поверхности соприкасаются, болты затягиваются на 1/4 оборота, что приводит к созданию предварительного натяга за счет сжатия пластмассовых деталей и натяжения болта. Деформация при сжатии определяется с помощью уравнения:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 = [(1 / 4 \text{ оборота}) \cdot (1 / 28 \text{ дюйма} / \text{оборот})] / 2,0 \text{ дюйм};$$

$$\varepsilon = 0,0045 \text{ (дюйм} / \text{дюйм)}.$$

Если у ПК модуль сжатия E при комнатной температуре равен $0,35 \cdot 10^6$ фунтов/дюйм², то напряжение сжатия составит:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 350\,000 \text{ (фунт} / \text{дюйм}^2) \cdot 0,0045 \text{ (дюйм} / \text{дюйм)};$$

$$\sigma = 1560 \text{ (фунт} / \text{дюйм}^2).$$

Со временем эти значения уменьшаются из-за эффекта релаксации напряжений в деталях.

При заданных средних значениях КЛТР для стали и ПК (здесь предполагается, что значения КЛТР не зависят от температуры), воздействие температуры на сборочный узел могут быть выражены следующим образом [22]:

$$\alpha_L (\text{сталь}) = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ дюйм} / \text{дюйм} / ^\circ\text{F};$$

$$\alpha_L (\text{ПК}) = 38 \cdot 10^{-6} \text{ дюйм} / \text{дюйм} / ^\circ\text{F}.$$

Несовпадение значений КЛТР у этих двух материалов составляет $31,3 \cdot 10^{-6}$ дюйм / дюйм / °F. Другими словами, деталь из ПК толщиной 1,0 дюйм будет увеличиваться или усаживаться (в зависимости от того, увеличивается или уменьшается температура) дополнительно на $31,3 \cdot 10^{-6}$ дюйм на каждый 1,0 °F изменения температуры по сравнению со стальным болтом. Уровень напряжений сжатия в бобышке будет изменяться непрерывно вместе с изменением температуры. Температура изделия должна достигнуть 74 °F, чтобы устранить несовпадение КЛТР между болтом и бобышкой. С другой стороны повышение температуры детали приводит к увеличению деформации сжатия.

Значение напряжений сжатия при высоких температурах может быть выше или ниже в зависимости от модуля упругости пластмассы. Релаксация напряжения пластмасс проявляется сильнее при повышенных температурах.

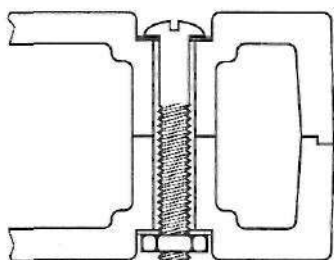
Винты и болты, изготовленные из полиамида, полипропилена, полиформальдегида, полиэфиримида, политетрафторэтилена и полиимида имеют стандартные размеры. Пластмассовые винты могут изготавливаться со стальными сердечниками [24]. Пластмассовые крепежные детали незаменимы в изделиях, которые должны обладать повышенной коррозионной стойкостью (особенно в присутствии кислот и щелочей) или хорошими электроизоляционными свойствами [19, 23]. Использование

пластмассовых винтов для сборки пластмассовых же изделий исключает проблемы несовпадения КЛТР и избыточных усилий затяжки. К сожалению, винты из пластмассы недостаточно прочны, что ограничивает их широкое применение. Использование алюминиевых винтов, у которых КЛТР почти в два раз больше, чем у стали, уменьшает влияние различия коэффициентов. [22].

6.4.2.2. Создающие резьбу винты

Общие положения

Если необходимо чтобы поверхность изделия была гладкой, соединение осуществляется с помощью «глухих» металлических резьбовых вставок или с использованием резьбы в материале самой детали (рис. 6.45).



Машинный винт и болт

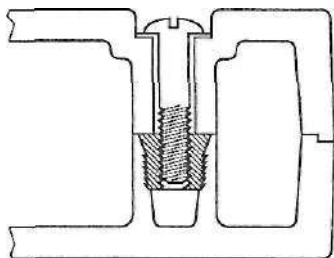
Нарушение внешнего вида на верхней и нижней поверхностях

Необходимость использования большого количества деталей для сборки

Необходим доступ к обеим деталям в процессе сборки

Необходимы стопорящие элементы для устранения ослабления соединения под действием вибрации

Большое время сборки



Машинный винт и вставка

Одна поверхность изделия гладкая

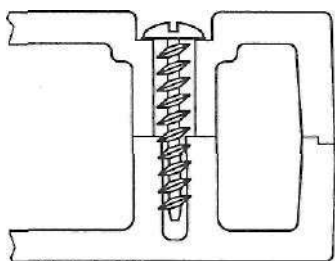
Для сборки необходимо несколько деталей

В бобышки должны быть введены вставки с внутренней резьбой

Необходимо специальное оборудование / инструмент для введения вставок

Большая долговечность

Допускается повторная сборка



Создающий резьбу винт и пластмассовая бобышка

- Одна поверхность изделия гладкая
- Для сборки необходимо минимальное количество деталей
- Резьба в детали формируется в процессе сборки
- Минимальная стоимость крепежной детали и оснащения
- Ограниченная долговечность (резьба, соприкасающаяся с винтом, оформлена в пластмассовой детали)
- Повторная сборка возможна, но количество повторений ограничено

Рис. 6.45. Пластмассовые контейнеры в форме ракушки часто собирают с помощью механических крепежных деталей. Последние выбирают среди машинных винтов/болтов, машинных винтов/вставок и создающих резьбу винтов

Основное преимущество резьбы, нарезанной непосредственно в пластмассовой детали, заключается в том, что она устраняет необходимость применения гаек (и соответствующих шайб под гайки), следовательно, уменьшается количество крепежных элементов, необходимых для изготовления сборочного узла. Резьба для больших винтов (диаметром более 6,35 мм) может быть создана непосредственно в процессе литья под давлением, хотя это существенно усложняет оснастку. В качестве альтернативы, как для больших, так и для малых винтов, резьбы могут изготавливаться на станках в отлитых или просверленных направляющих отверстиях. Вторичные операции нарезания резьбы занимают достаточно большое время и экономически выгодны только для деталей с большим сроком службы. Существуют винты, которые сами создают резьбу по мере продвижения вглубь просверленного отверстия или внутри отлитого направляющего отверстия. Применение таких винтов уменьшают стоимость литья и сборки, так как устраняют необходимость изготовления резьбы в процессе литья под давлением и выполнения дополнительных операций.

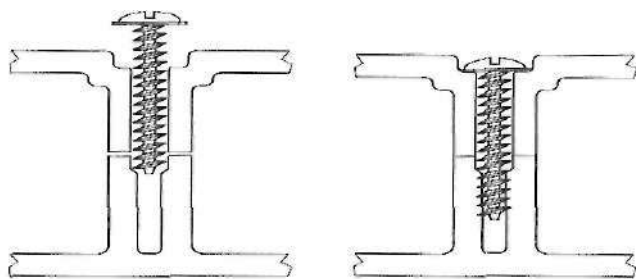


Рис. 6.46. Сборочный узел состоит из бобышки со сквозным отверстием, сквозь которое проходит винт, установленной с зазором, и глухой базовой бобышки



Рис. 6.47. Существует большое количество создающих резьбу винтов. Показаны винты #6 с шестигранными головками с шайбами: слева — создающий резьбу винт типа *BT*; в центре — пинг, формирующий винт типа *HiLo*®; справа — самонарезающий винт типа *T*

На рынке предлагается широкий набор этих винтов. Они имеют разные конфигурации резьбы, размеры и типы головок. Диаметр стандартных самонарезающих винтов составляет от 2 до 8,0 мм. Наиболее часто используются винты 4, 6, 8 и 10 размеров. Создающие резьбу винты уменьшают количество элементов, необходимых для изготовления сборочного узла, устраняя необходимость использования гаек и шайб или вставок с внутренней резьбой. Эти винты часто изготавливают за одно целое с шайбами под готовками.

Узлы, собранные с помощью самонарезающих винтов, не имеют такого продолжительного срока службы, как узлы, собранные с использованием резьбовых металлических вставок. Однако самонарезающие и формующие винты представляют собой быстрое, дешевое и эффективное средство для соединения пластмассовых деталей. Детали, соединенные такими винтами, очень легко разбирать для повторной переработки материала с помощью высокоскоростных пневматических инструментов, поскольку в этих соединениях не используются вставки и гайки.

Многие из создающих резьбу винтов для пластмасс имеют стандартную конструкцию. Они в течение многих лет применялись для крепления деталей из других материалов. Некоторые из этих винтов хорошо сочетаются с пластмассой, но есть винты, которые не годятся для этой цели. Кроме того, существуют специальные крепежные детали, разработанные именно для соединения пластмасс [25-28].

Создающие резьбу винты можно классифицировать на нарезающие и формирующие. Самонарезающие винты создают резьбу по мере своего продвижения в пластмассовую бобышку, а винты формирующие просто смещают материал по мере своего движения. Тип винта, его размер и конструкция зависят от требований к изделию и параметров его эксплуатационных характеристик, к которым относятся:

- сопротивление усилию извлечения винта;
- усилие затяжки и ожидаемый период ослабления затяжки;
- возможность повторной сборки;
- сохранение усилия затяжки и устойчивости по отношению к вибрации;
- окружные напряжения в бобышке;
- отношение крутящего момента при срыве резьбы к крутящему моменту при завинчивании.

К области сборки с помощью создающих резьбу винтов относят ряд понятий [16, 25, 29, 30]:

Направляющее отверстие

Отлитое или высверленное отверстие в бобышке, которое соответствует размерам винта. Диаметр направляющего отверстия больше минимального (корневого) диаметра винта, но меньше, чем основной (наружный) диаметр винта.

Крутящий момент при завинчивании

Крутящий момент при формировании резьбы.

Момент, необходимый для продвижения винта внутрь направляющего гладкого отверстия

Максимальный формирующий резьбу крутящий момент получают при завинчивании винта на полную длину, когда соприкасаются сопрягаемые поверхности.

Крутящий момент при срыве резьбы

Крутящий момент, необходимый для того, чтобы в ответной части (то есть в пластмассовой бобышке) была сорвана резьба. В этом режиме разрушения профиль резьбы в пластмассе срезается при продолжении вращения винта.

Крутящий момент при разрушении (повреждающий крутящий момент)

Крутящий момент, вызывающий разрушение сборочного узла винт/бобышка. Этот термин характеризует более серьезное разрушение, чем термин «крутящий момент при срыве резьбы», поскольку в данном случае происходит разрушение бобышки и самого винта.

Установочный крутящий момент (крутящий момент затяжки)

Крутящий момент затяжки позволяет сборочному узлу выдерживать эксплуатационные нагрузки. Его величина должна находиться в интервале от максимального крутящего момента при завинчивании до разрушающего крутящего момента. Значение установочного крутящего момента является суммой крутящего момента при завинчивании и крутящего момента для создания предварительного натяга.

Крутящий момент для создания предварительного натяга

Это разность между крутящим моментом затяжки и максимальной величиной крутящего момента при завинчивании. Уровень крутящего момента для создания предварительного натяга напрямую характеризует величину стягивающего усилия в сборочном узле.

Отношение между крутящими моментами, разрушающим и при завинчивании

При высоком значении этого отношения снижается вероятность повреждения соединения.

Превалирующий крутящий момент (сопротивление ослаблению соединения)

Крутящий момент, необходимый для извлечения винта из бобышки после того, как снята стягивающая нагрузка.

Длина зацепления винта

Та часть общей длины винта (длина винта вдоль оси или число витков винта), которая находится в направляющем отверстии. Начальная коническая часть резьбы обеспечивает минимум удерживающего усилия. Контактная длина винта приблизительно равна трем диаметрам полных витков, не считая длины конической части. [19].

Коэффициент использования глубины резьбы винта

Степень проникновения витка нарезающей резьбы в стенке бобышки. Направляющее отверстие, диаметр которого равен диаметру тела винта, будет приводить к 100 %-ному использованию глубины резьбы, а направляющее отверстие, диаметр которого равен максимальному диаметру винта, будет приводить к коэффициенту использования глубины резьбы, равному 0%. Величина использования глубины резьбы U выражается в процентах и может быть определена по уравнению:

$$U = [(D_s - d_b) / (D_s - d_x)] \cdot 100, \quad (6.13)$$

где D — максимальный диаметр винта; d — диаметр тела винта; d_b — внутренний диаметр бобышки (то есть диаметр направляющего отверстия).

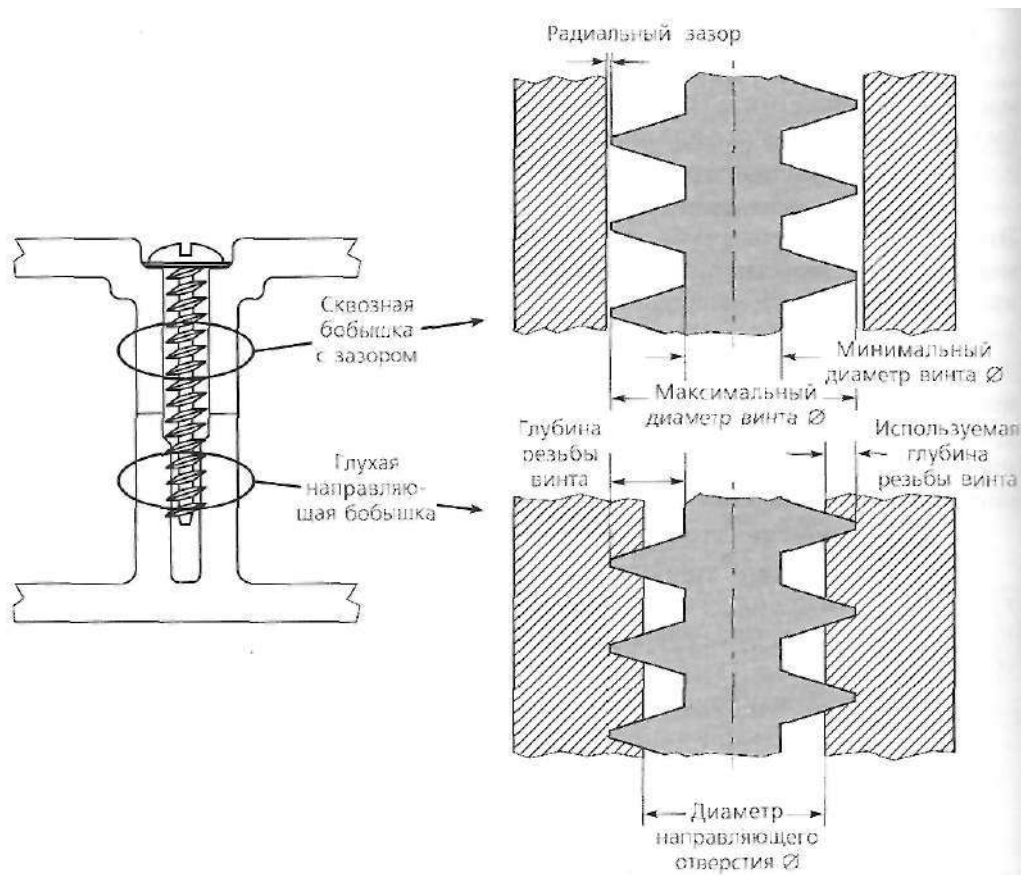


Рис. 6.48. Радиальный зазор получается при введении винта в сквозную бобышку. Глухая (или нижняя) приемная бобышка имеет диаметр направляющего отверстия, который определяет коэффициент использования глубины резьбы

Усилие извлечения винта

Осевая сила, которая необходима для «вытаскивания» винта из бобышки.

Характеристики винтов во время сборки

Зависимость крутящего момента от числа оборотов создающего резьбу винта приведена на рис. 6.49. Винт вставлен с зазором в открытую бобышку, отлитую в одном из сопрягаемых компонентов (диаметральный зазор обычно составляет 0,25 мм). Начальная установочная зона, аналогичная показанной на рис. 6.48, может быть использована, чтобы способствовать начальному движению винта и снизить вероятность скалывания верхнего края направляющего отверстия. Установочная зона для винтов с коническим концом или концом в форме буравчика не нужна.

При нормальном ходе процесса сборки завинчивание не приводит к разрушению, а только достигает уровня момента затяжки, находящегося посередине между

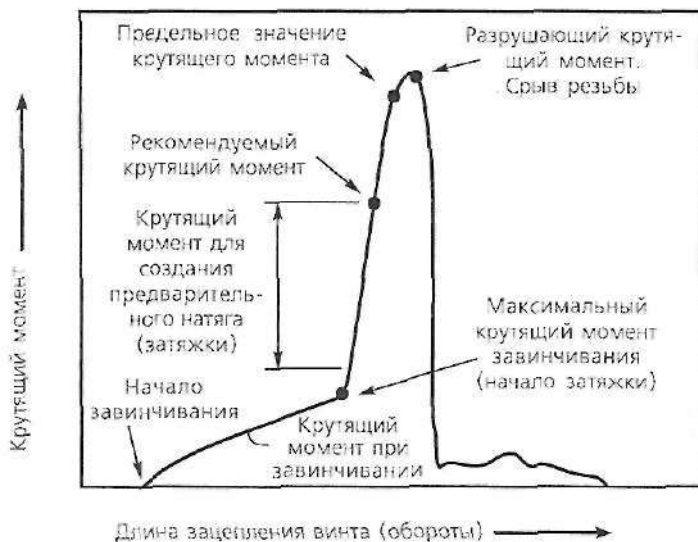


Рис. 6.49. Типичная зависимость крутящего момента от длины зацепления (числа оборотов) для создающих резьбу винтов, которые ввинчиваются в пластмассовую бобышку

максимальным моментом завинчивания и моментом срыва резьбы [16, 30]. Желательно, чтобы соотношение между крутящими моментами срыва резьбы и завинчивания было, по крайней мере, 3 или 4:1. Это гарантирует правильное и безопасное соединение даже при использовании мощного инструмента для завинчивания винтов. Значение 2:1 данного соотношения подходит только для ручной квалифицированной сборки. Использование масел, смазки или жидкости для выталкивания отливки из литейной формы исключено, потому что это уменьшает крутящий момент при срыве резьбы на 50 %. Разрушение изделия при использовании создающих резьбу винтов не ограничивается только срывом резьбы. Может произойти сдвиговое разрушение бобышек под винтом, растрескивание бобышки или срез копчика винта. Но лучше, если произойдет просто срыв резьбы, поскольку в этом случае можно отремонтировать соединение с помощью винтов большей длины или большего диаметра, а также есть возможность отремонтировать направляющее отверстие с помощью специального герметика [26,27,31,32].

Стандартные самонарезающие винты

Некоторые из обычно используемых стандартных самонарезающих винтов представлены на рис. 6.50. Эти винты имеют либо одну режущую кромку и канавку (рис. 6.50, а, с), либо разделенные кромки и канавки. Они нарезают резьбу в пластмассовой бобышке по мере продвижения по направляющему отверстию, в результате чего образуется стружка. Если используются глухие направляющие отверстия, стружка будет смещаться в нижнюю часть глухого отверстия, которая используется как место накопления стружки. При использовании глухих отверстий должно быть предусмотрено пространство для стружки.

Стружка и производственный мусор могут создавать помехи при использовании сквозных направляющих отверстий [32].

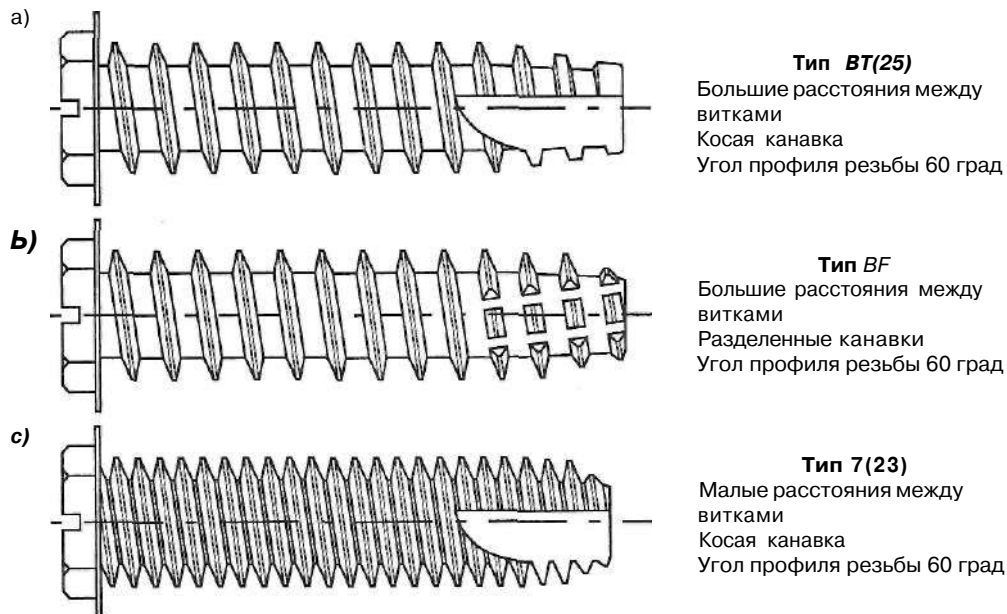


Рис. 6.50. Многие типы самонарезающих винтов, соответствующие стандарту *ANSI*¹, обычно используются для соединения деталей из жестких пластмасс

Самонарезающие винты используются с пластмассой, имеющей высокий модуль упругости. Винт типа 2^Г (или 25) популярен из-за больших расстояний между витками и большим косым срезом на конце. Винт ЯР также имеет большие расстояния между витками, но канавки на его режущих частях могут быть полностью заполнены при завинчивании в детали из мягких материалов [19]. Винты серии В используются для соединения деталей из материалов, которые имеют модуль упругости при изгибе ниже 1380 МПа [27,32].

Винт типа Т (или 23) используется для сборки деталей из материалов с очень высоким модулем упругости более 6900 МПа [27]. Однако резьба в этих твердых и жестких пластмассах крошится в процессе сборки и разборки. Самонарезающие винты характеризуются меньшими значениями крутящих моментов при завинчивании и срыве резьбы, чем формующие винты, и создают меньший уровень напряжений. Они пригодны для соединения стеклообразных аморфных материалов, легко подвергающихся растрескиванию [30]. Самонарезающие винты должны иметь большую общую длину, так как их режущая часть обладает низкой удерживающей силой. Самонарезающие винты используются в изделиях, где возможность повторных операций разборки и сборки ограничена [16].

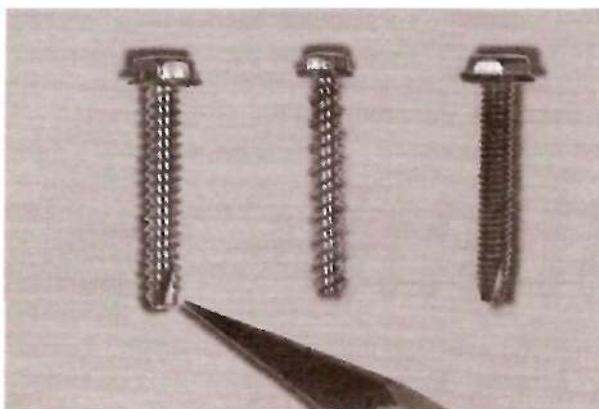


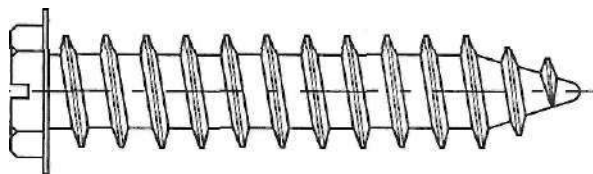
Рис. 6.51. Внешний вид некоторых создающих резьбу винтов #6. Слева: винт типа *BT* с большим расстоянием между витками и косым срезом на конце. В центре — винт, формующий резьбу типа *HiLo*®. Справа: винт типа *T* с косым срезом на конце и более плотным расположением витков резьбы

Стандартные формующие резьбу винты

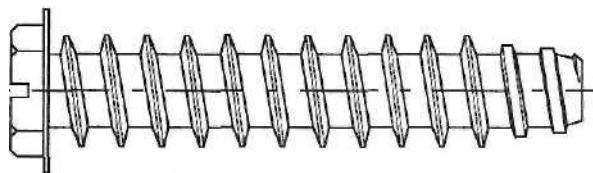
Эти винты не имеют режущих кромок и не создают стружку. Формующие резьбу винты обычно используются для соединения деталей из пластмасс с низким модулем упругости, менее 2760 МПа [27, 32]. Исследования показывают, что винты типа *B* с большими расстояниями между витками резьбы могут использоваться с жесткими материалами, армированными стекловолокном [33, 34]. В пластмассах с высоким модулем упругости нужны направляющие отверстия большого диаметра. Винты, формующие резьбу с углом профиля 60 град, создают относительно высокие радиальные и окружные деформации. Наличие большого пространства между витками у винтов типов *AB* или *B* делает их более универсальными, чем винты типа *C* [19, 25, 32]. Наличие законцовки в форме буравчика у винтов типа *AB* требует большей длины их зацепления по сравнению с винтами типа *B* [19].

На уровень напряжений в пластмассовых бобышках влияют несколько факторов (установочный крутящий момент при сборке, напряжения, создаваемые крепежным элементом во время завинчивания, и напряжения в процессе эксплуатации). В высокопрочных стеклообразных материалах трудно поддерживать локальные напряжения на безопасном уровне [25]. Остаточные технологические и эксплуатационные напряжения уменьшают стойкость изделий к химически активным веществам и способствуют их преждевременному разрушению. Создающие резьбу винты обычно используются для соединения деталей из частично кристаллических или вязких при разрушении аморфных термопластов, где остаточные напряжения со временем снижаются до приемлемого уровня. Винты обеспечивают высокое сопротивление при их извлечении и с трудом поддаются вращению в обратном направлении. Снижение усилия затяжки и момент вывинчивания со временем зависит от редакционных характеристик полимерного материала бобышки. Формующие винты пригодны

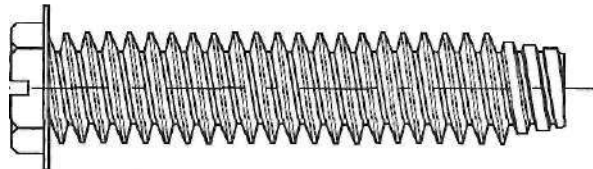
для изделий, срок службы которых ограничен. Такие винты более пригодны для соединения деталей из вспененных термопластов, чем самонарезающие винты. Однако из-за ограниченной долговечности таких термопластов чаще такие детали соединяют с помощью резьбовых вставок и машинных винтов.

**Тип АВ**

Большие расстояния между витками
Конец винта в форме буравчика
Угол профиля резьбы 60 град

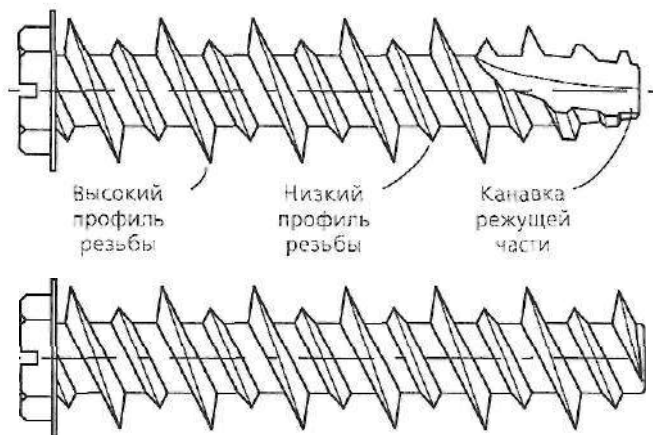
**Тип В**

Большие расстояния между витками
Притуплённый конец винта
Угол профиля резьбы 60 град

**Тип С**

Малые расстояния между витками
Притуплённый конец винта
Угол профиля резьбы 60 град

Рис. 6.52. Некоторые типы формирующих резьбу винтов, соответствующие стандарту *ANSI*, используются для соединения отлитых деталей, изготовленных из более податливых полимерных материалов

**Самонарезающие**

Большие расстояния между витками
Косая канавка
Угол высокого профиля резьбы 30 град
Угол низкого профиля резьбы 60 град

Формирующие резьбу

Большие расстояния между витками
Отсутствие косой канавки
Угол высокого профиля резьбы 30 град
Угол низкого профиля резьбы 60 град

Рис. 6.53. Разновидности самонарезающих и формирующих резьбу винтов типа *HiLo®*

Создающие резьбу винты

Небольшой угол профиля резьбы способствует уменьшению радиальных напряжений и снижению деформации сжатия между витками [16, 25, 26, 30, 32]. Самонарезающие и формующие винты типа *HiLo*® [35] имеют дублированные витки. Высокие витки у винтов с большим расстоянием между витками имеют угол профиля резьбы 30 град, а низкие витки имеют угол профиля резьбы 60 град. Крутящий момент завинчивания этих винтов невысок, но при срыве резьбы он значительно возрастает [26, 29, 32]. Витки с углом профиля резьбы 30 град способствуют снижению радиальных напряжений и вероятности растрескивания бобышки.

Винты типа *Plastite*®

Винт типа *Plastite*® [36] имеет уникальную конструкцию: его поперечное сечение не круглое, а по форме несколько напоминающее треугольник. Угол профиля резьбы при этом обычно 45 град. Треугольная форма сечения винта уменьшает крутящий момент при завинчивании [25]. Уникальная особенность этого винта заключается в том, что он обеспечивает высокую прочность соединений, работающих в условиях вибрации. Хлад отек за счет пластмассы способствует фиксации винта с некруглым сечением в месте его установки, увеличивая сопротивление ослаблению.

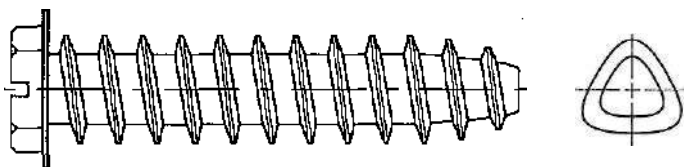


Рис. 6.54. Формующий резьбу винт типа *Plastite*®. Винт имеет некруглую форму с треугольным поперечным сечением (вид сечения приведен справа)

Винт типа *PT*®

Формующий винт типа *PT*® [37] имеет резьбу с одним видом витков (рис. 6.55), большим расстоянием между витками и с углом профиля резьбы 30 град. Такой угол резьбы уменьшает радиальные и окружные напряжения, что дает возможность использовать бобышки стойкими стенками [30, 37].

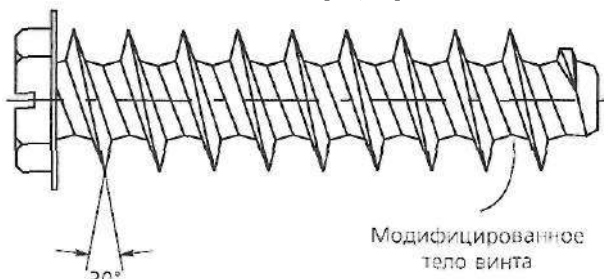


Рис. 6.55. Конфигурация формующего резьбу винта типа *PT*®

Винт типа *Polyfast*®

Формующий резьбу винт *Polyfast*® уникален благодаря асимметричному профилю сечений витков. Этот винт имеет большое расстояние между витками и угол наклона передней кромки 35 град, а угол наклона задней кромки 10 град [38].

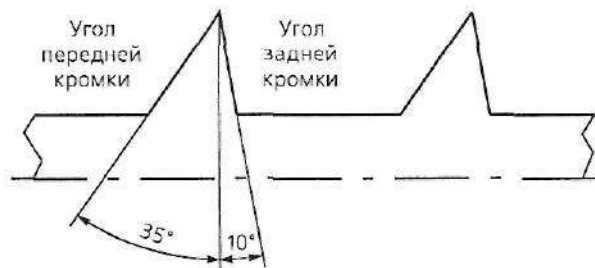


Рис. 6.56. Конфигурация профиля резьбы формующего резьбу винта типа *Poll/fast*®

Головки и шайбы винтов

Создающие резьбу винты часто имеют встроенные шайбы. Шайбы позволяют распределить усилие затяжки и напряжения в соединении на большую поверхность. Эти шайбы обычно имеют коническую или волнистую форму. Слегка подпружиненные шайбы используются для снижения скорости ослабления соединения, которое возможно из-за ползучести пластмассы.

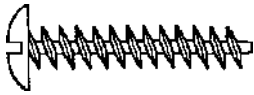
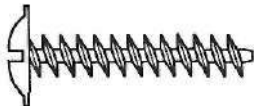
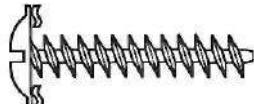
Головка винта обычного типа		Могут возникнуть высокие локальные напряжения из-за относительно небольшой поверхности контакта пластмассовой детали с головкой
Головка винта с фланцем (встроенная шайба)		Уменьшение локального напряжения в результате увеличения поверхности контакта пластмассовой детали с шайбой
Головка винта обычного типа и шайба		Уменьшение локального напряжения в результате увеличения поверхности контакта пластмассовой детали с шайбой
Зубчики внизу головки винта (альтернатива шайбе)		Увеличение крутящего момента при срыве резьбы и уменьшение вероятности ослабления соединения под влиянием вибрации
Пружинная или волнистая шайба под головкой		Поддержание постоянного усилия затяжки и уменьшение эффектов хладотекучести или ползучести

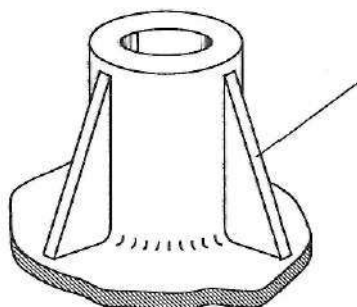
Рис. 6.57. Разные типы головок/шайб, используемых с создающими резьбу винтами

Конструкция бобышек для создающих резьбу винтов

Эксплуатационные характеристики и качество сборочного узла определяются как характеристиками винта, так и конструкцией приемного отверстия. Толщина стенок большинства литых под давлением пластмассовых деталей не позволяет сохранять постоянными размеры и выдерживать на приемлемом уровне напряжения, которые возникают при эксплуатации большинства систем крепления деталей винтами [16]. Следовательно, иногда требуется локальное увеличение толщины стенки детали в месте ее крепления. Но нужно учитывать, что локальное утолщение стенки чревато образованием усадочных напряжений, утяжин и усадочных пустот (рис. 6.58).



Рис. 6.58. Бобышки должны устанавливаться отдельно, быть укреплены косынками и присоединены к боковым стенкам с помощью ребер. Это уменьшит возможность образования утяжин и усадочных пустот



Косынки

- Увеличение жесткости при кручении и изгибе
- Улучшение течения потока расплава и вентиляции в процессе заполнения литевой формы

Рис. 6.59. Косынки часто используются для повышения жесткости при кручении и изгибе отдельно размещенных бобышек

Направляющие отверстия должны быть расположены в бобышках, которые удалены от боковых стенок. Бобышки размещаются отдельно или соединяются с боковыми стенками с помощью ребер, что увеличивает прочность при кручении и изгибе бобышки [16]. Косынки нужны для тонкостенных бобышек, заполнение которых затруднено из-за колебаний в процессе течения потока расплава. Обычно используют три или четыре косынки [26,33,34].

Глубина направляющего отверстия в приемной бобышке должна быть больше длины зацепления винта (рис. 6.60). Увеличение глубины отверстия создает полость для приема стружки, которая возникает при использовании самонарезающих винтов.

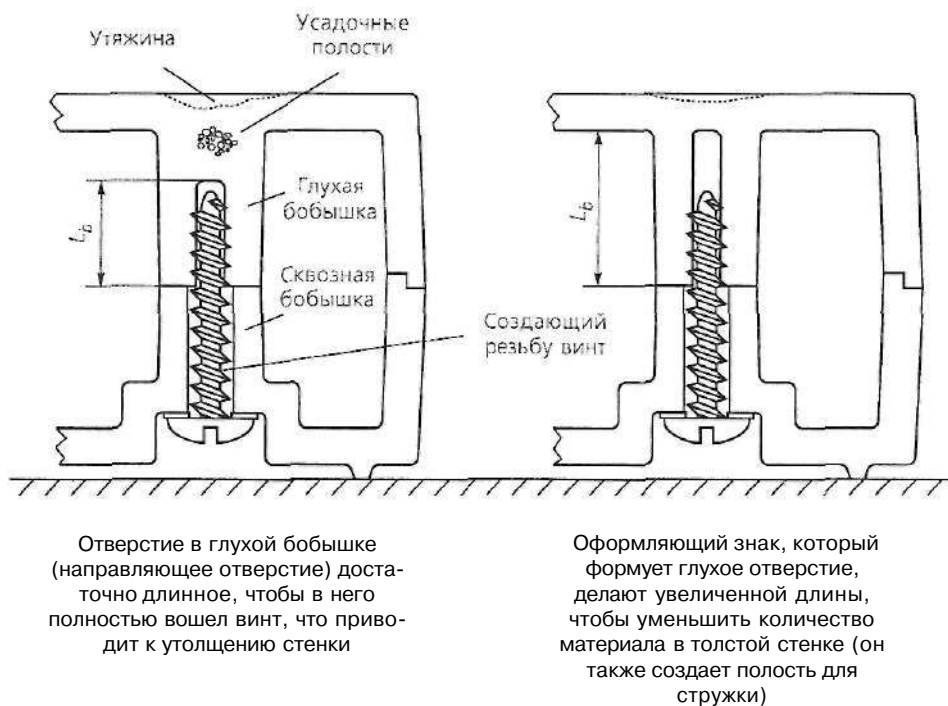


Рис. 6.60. Оформляющие знаки, используемые для формирования отверстия в глухих бобышках, должны выдвигаться при размыкании литевой формы ровно настолько, чтобы можно было удалить избыток материала

Короткие оформляющие знаки, большие закругления в основании (галтели) и толстые бобышки — все это увеличивает тенденцию образования утяжин (рис. 6.61). Прочность бобышки возрастает вместе с увеличением толщины стенки.

Размер утяжин зависит от конструкции литевой формы и параметров процесса литья под давлением. Например, туннельные впускные литники способствуют большему уплотнению в полости и компенсируют усадку. Локальное охлаждение поверхности полости в области напротив бобышки (например, с помощью перегородок

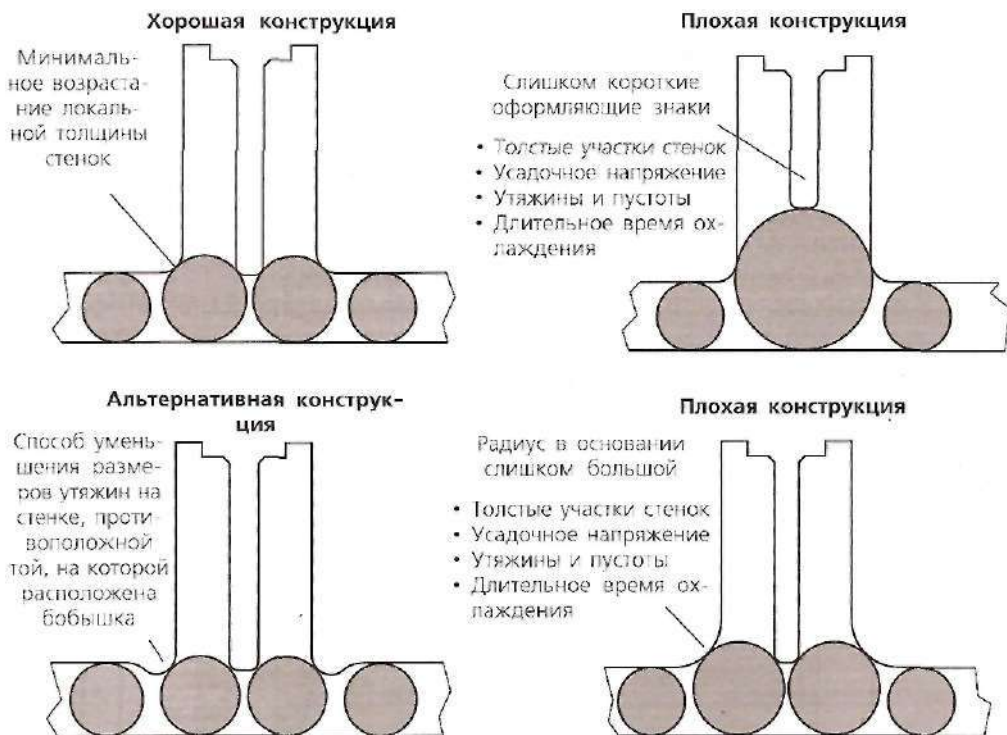


Рис. 6.61. Следует избегать слишком толстых или тонких стенок в основании глухих бобышек. Радиусы галтелей должны обеспечивать снижение концентрации напряжений, но при этом они должны быть достаточно малыми, чтобы ограничить проблемы, связанные с усадкой

и фонтанирующих трубок) иногда помогает решить проблему утяжин, поскольку при этом компенсируется образование пустот. Пустоты уменьшают прочность сборочного узла, в котором используется бобышка. Использование усиливающих ребер или косынок также приводит к уменьшению толщины стенок, обеспечивая дополнительную жесткость (подробнее см. главу 2). Производители винтов и поставщики пластмасс могут сами рекомендовать значения размеров бобышек. В любом случае нужно следить, чтобы наружные диаметры бобышек по величине были в 2,5-3 раза больше номинального диаметра винта [27,32, 33].

Существует несколько проблем при литье под давлением, которые связаны с изготовлением глухих полых бобышек для создающих резьбу винтов. К этим проблемам относятся:

1. Невозможность обеспечить нужное охлаждение из-за маленького диаметра оформляющего знака. «Горячий» знак увеличивает время цикла и диаметр в основании отверстия (то есть возникает «эффект бутылочного горла»). Большой диаметр в нижнем сечении бобышки возникает из-за уменьшения скорости охлаждения,

особенно в частично кристаллических термопластах. Изменение диаметра трудно определить с помощью датчика, вставленного через верхнюю часть отверстия, поскольку в этой зоне бобышка охлаждается быстрее. При проверке направляющего отверстия рекомендуется исследовать поперечное сечение бобышки.

2. Проблемы при выталкивании, вызванные усадкой материала, прилегающего к оформляющему знаку. Для улучшения выталкивания детали обычно знаку придается небольшая конусность, иногда на знак наносят сухую смазку или полируют в направлении выталкивания. Антиадгезионные смазки для форм использовать не рекомендуется, так как возникает вероятность «срыва» процесса сборки.

3. Изгиб оформляющего знака и усталость материала знака. Длинный оформляющий знак малого диаметра для формования глухого отверстия, изгибается в процессе литья под давлением и растягивается при выталкивании. Оформляющие знаки малого диаметра имеют небольшой срок службы.

Острота описанных выше проблем может быть снята за счет уменьшения длины оформляющего знака, который используется для формования направляющего отверстия. Короткие знаки могут быть использованы без всякого риска увеличения утяжин напротив глухого отверстия в глухой бобышке с помощью метода, показанного на рис. 6.62.

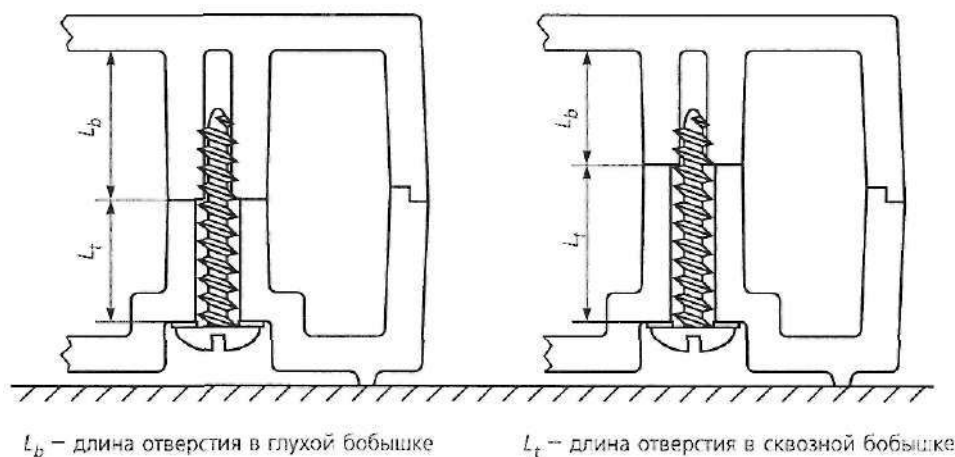


Рис. 6.62. Уменьшение длины оформляющего знака позволяет оптимизировать процесс литья под давлением

Сквозная бобышка на сопрягаемой детали

Общая длина оформляющего знака для сквозного отверстия бобышки увеличивается, но это не создает проблем поскольку:

- оформляющий знак для сквозного отверстия имеет существенно больший диаметр;
- в процессе литья под давлением оформляющий знак может иметь опору как со стороны матрицы, так и со стороны пуансона, т. е. с любого торца.

Альтернативным вариантом может служить формование сквозного отверстия с помощью двух коротких оформляющих знаков, которые фактически являются соответственно расположенными выступами противоположных сторон литевой формы.

Точный теоретический расчет конструкции бобышки для создающих резьбу винтов затруднителен из-за большого количества взаимозависящих параметров. Например, крутящие моменты при завинчивании и срыве резьбы в значительной степени зависят от коэффициента трения между металлическим винтом и пластмассой. А значение коэффициента трения зависит от температуры поверхности, нормального напряжения, качества поверхности и смазки. Теоретический анализ [39] дает только приблизительные характеристики конструкции, затем проводятся экспериментальные оценки, чтобы точнее определить диаметр направляющего отверстия и длину зацепления [19, 29, 30, 33]. Контрольные отливки (прототипы) (рис. 6.63), используются для определения характеристик комбинации заданный винт/конструкция бобышки (из конкретного материала).

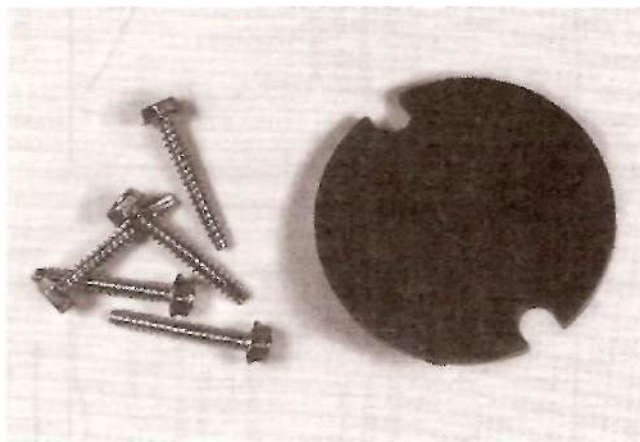


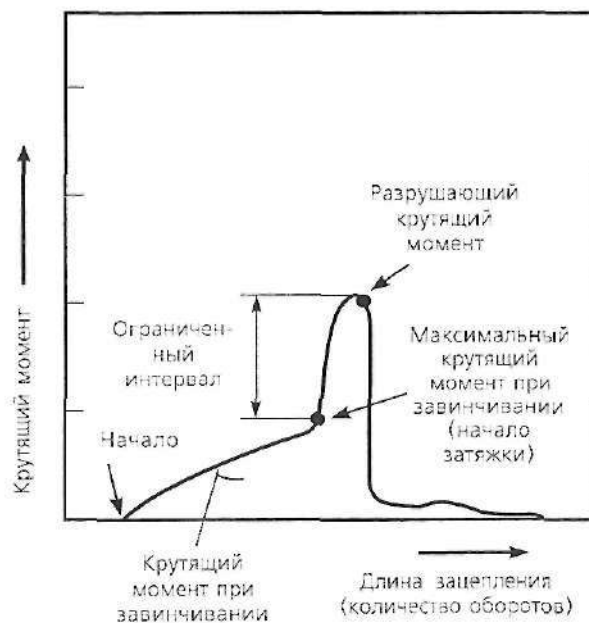
Рис. 6.63. Литой под давлением прототип бобышки, используемой для оценки параметров процесса сборки и эксплуатационных характеристик комбинации: заданный винт/конструкция бобышки (из конкретного материала)

! Скорость завинчивания винта при тестировании этого прототипа должна быть эквивалентна используемой в условиях серийного производства. Цель данных оценок состоит в определении параметров, которые обеспечивают высокое значение момента срыва резьбы и отношения этого момента к моменту завинчивания (рис. 6.64, 6.65). Крутящие моменты завинчивания и срыва резьбы зависят от типа винта, его размера, качества поверхности, скорости завинчивания, длины направляющего отверстия и длины зацепления.

Другие оценки проводятся, чтобы определить усилие вывинчивания винта. Результаты такого теста приведены на рис. 6.66. Такие данные могут быть использованы для определения прочности при растяжении и характера разрушения сборочного узла с бобышкой под действием растягивающих нагрузок.

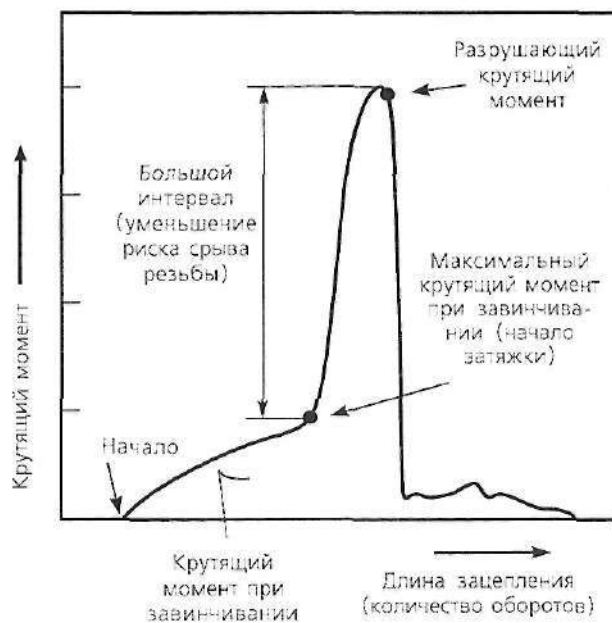
Низкое соотношение крутящих
моментов срыва резьбы/завинчивания

$$\frac{\text{Крутящий момент срыва резьбы}}{\text{Максимальный крутящий момент при завинчивании}} = 2 : 1$$



Высокое соотношение
крутящих моментов срыва резь-
бы/завинчивания

$$\frac{\text{Крутящий момент срыва резьбы}}{\text{Максимальный крутящий момент при завинчивании}} = 4 : 1$$



Типичные кривые зависимости крутящего момента от числа оборотов для создающего резьбу винта при низком соотношении крутящего момента срыва резьбы к моменту завинчивания (слева), и при высоком соотношении указанных моментов (справа)

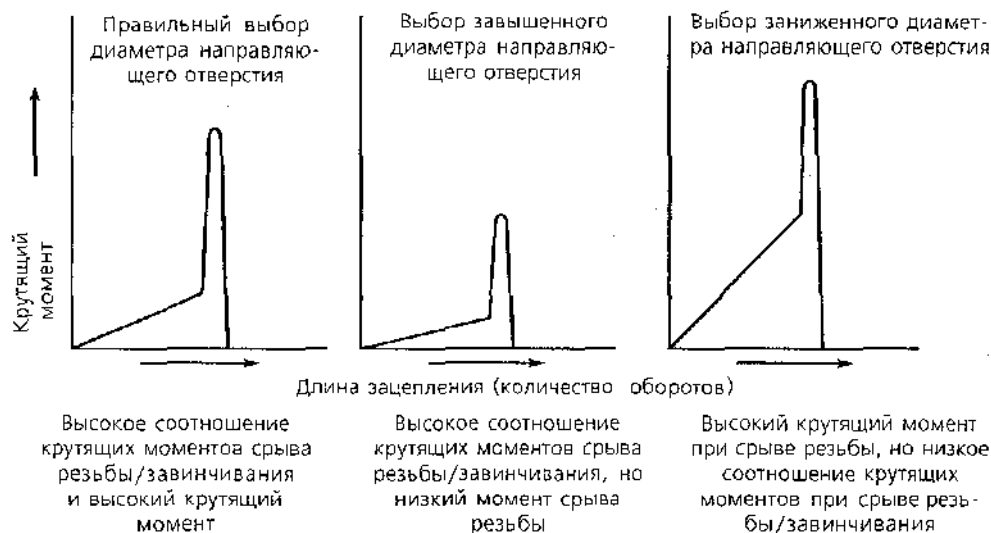


Рис. 6.65. Диаметр направляющего отверстия в бобышке существенно влияет на соотношение крутящего момента при срыве резьбы к крутящему моменту при завинчивании. Низкий крутящий момент при завинчивании и высокое указанное соотношение уменьшает вероятность разрушения изделия в процессе сборки

- Гомополимер пропилен
- 6 BT (25) самонарезающий винт
- Диаметр направляющего отверстия 0,114 дюйма (глубина проникновения резьбы 60 %)

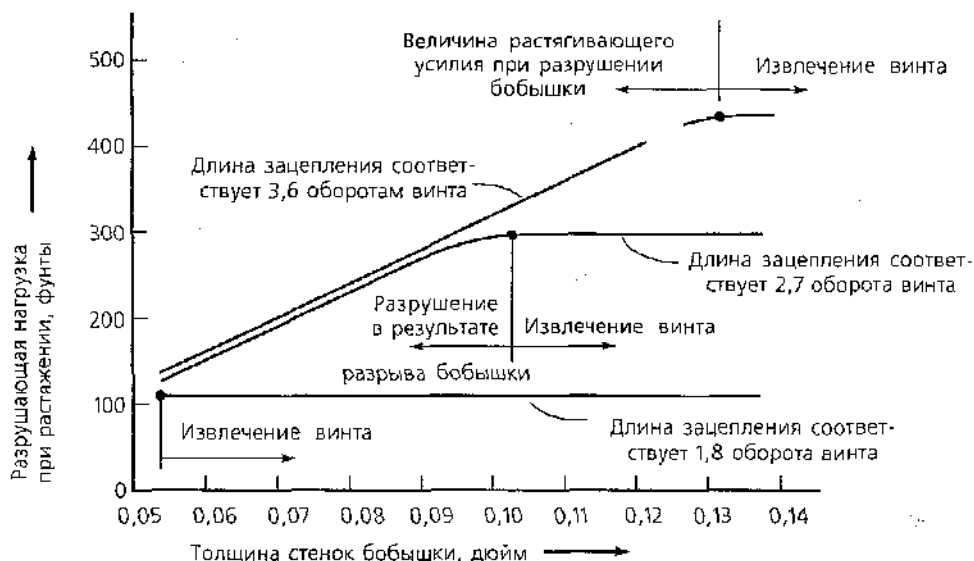


Рис. 6.66. Результаты измерения осевого усилия при вывинчивании винта типа BT из полипропиленовых бобышек

Эта информация нужна при определении типа винта, длины зацепления, толщины стенок бобышки и радиуса основания (галтели), которые влияют на прочность при растяжении сборочного узла, в который входит бобышка.

К другим экспериментальным оценкам относятся:

- оценка окружной деформации с помощью тензодатчиков;
- оценка в целях снижения усилия затяжки с помощью тензодатчиков;
- сохранение момента затяжки.

Все эти параметры меняются со временем из-за ползучести материала или релаксации напряжения.

Усилие затяжки и крутящий момент со временем уменьшаются (они сохраняются только в треугольных винтах типа *Plastite®*). Характеристики ползучести материала помогают оценить потери усилия затяжки.

Двухсторонняя резьбовая шпилька

Двухсторонняя резьбовая шпилька представляет собой комбинацию формирующего винта и машинного винта с головкой дискового типа. Конструкция шпильки изображена на рис. 6.67. Эти винты вворачиваются в пластмассовую бобышку с помощью шпильковерта, оставляя конец с обычной винтовой резьбой снаружи. После этого вторая деталь, которая имеет сквозное отверстие, устанавливается на часть шпильки с машинным винтом. Она крепится гайкой, при этом усилие затяжки создается машинным винтом [32].

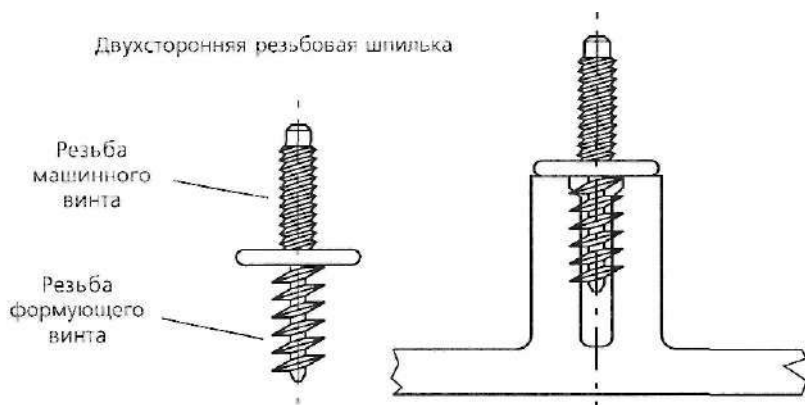


Рис. 6.67. Двухсторонняя резьбовая шпилька представляет собой комбинацию формирующего резьбу винта и машинного винта с дисковой шайбой между ними

Колпачки бобышек

Колпачки бобышек — это штампованные металлические крепежные элементы, которые напрессовываются на верхние части полых бобышек. Они уменьшают вероятность образования трещин, увеличивая прочность бобышек в окружном и осевом направлениях. Колпачки используются вместе с формирующими резьбу винтами, кроме того, в них нарезается односторонняя резьба, обеспечивающая дополнительную прочность [19,28,40].

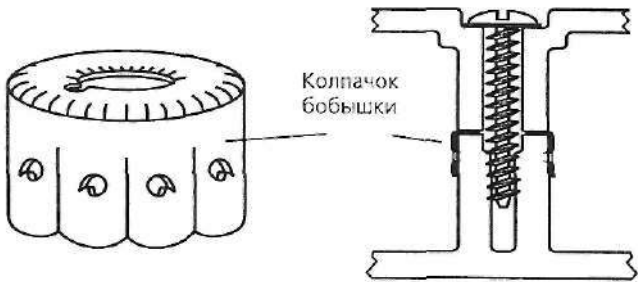


Рис. 6.6#. Колпачки, изготовленные из листового металла, напрессовываются на бобышки для их усиления и обеспечения дополнительной прочности сборочного узла

Вдавливаемые шпильки/Нажимные крепежные детали

Вдавливаемые шпильки представляют собой механические крепежные детали с зубцами, расположенными на контактирующей поверхности, с усилием вставляемые в отверстия деталей для обеспечения высокоскоростной сборки. Они имеют скошенные кольцевые выступы или зазубрины, которые делают сборочный узел неразъемным (например, ручки сковородки) [32]. Сопротивление «вытаскиванию» у этих крепежных элементов существенно больше, чем усилие, необходимое для их установки. Они обычно используются для соединения деталей из термопластов с повышенной пластичностью. Крепежные детали могут быть установлены сразу же после завершения процесса литья под давлением, пока деталь из материала с высоким модулем упругости находится в разогретом состоянии. Также они могут быть установлены после их предварительного нагрева или под действием ультразвуковых колебаний. Некоторые нажимные крепежные детали имеют спиральные витки с полутрапециевидным профилем кромок, которые формируют резьбу в пластмассах. Они могут вывинчиваться, если возникает необходимость, например, для проведения операций по техническому обслуживанию, и затем снова введены [19, 28,36,41].

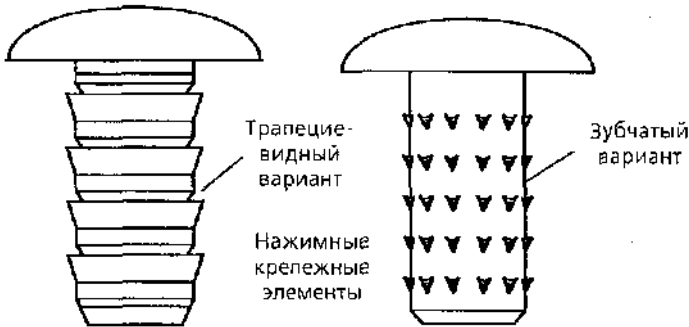


Рис. 6.69. В отличие от создающих резьбу винтов, которые ввинчиваются в процессе сборки, нажимные крепежные элементы в процессе сборки просто запрессовываются в направляющие отверстия

Примером уникальной нажимной крепежной детали может служить петля, показанная на рис. 6.70. Петля на каждом крыле имеет зубчатые края и устанавливается нажимом в оформленную во время литья под давлением в детали прорезь, в результате чего создается прочный неразъемный узел. Петли с зубцами хорошо подходят для работы с пластмассами, и лучше всего их запрессовывать в деталь сразу после литья под давлением, пока она находится в разогретом и размягченном состоянии.

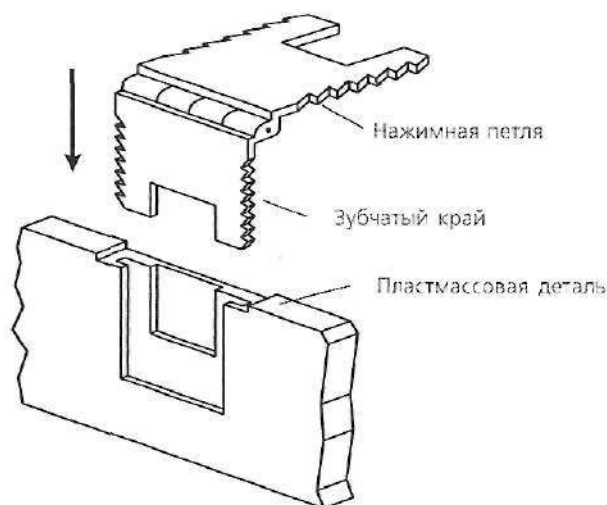


Рис. 6.70. Металлическая петля с зубцами на каждом крыле. Крыло петли запрессовывается в прорезь надетали после завершения процесса литья под давлением, таким образом создается прочное неразъемное соединение

Нажимные/наворачиваемые крепежные детали

Нажимные/наворачиваемые крепежные детали относятся к самоконтрящимся (создающим резьбу), которые заменяют стандартные гайки и стопорящие шайбы. Они закрепляются на металлических штифтах или стойках и могут быть использованы для соединения деталей, у одной из которых отформован выступ (рис. 6.71-6.73). Такие крепежные детали, как клипсы *Tinnerman®* [42], представляют собой самоконтрящиеся пружинные шайбы, которые используются, когда не требуется большое стягивающее усилие зажима. Изменяя контрукцию стержня, можно добиться разъемного соединения (см. рис. 6.72).

Клипсы и нажимные гайки пригодны для многих вариантов сборки, но они не исключают применения создающих резьбу наворачиваемых гаек. Последние создают на сопрягаемой поверхности пластмассовых штифтов резьбу при вращении, подобно создающим резьбу винтам. Такие гайки используются в разъемных сборочных узлах и когда требуется контроль предварительного натяга. Отлитые «заодно» с деталью стержни должны иметь радиус в основании минимум 0,38 мм, чтобы уменьшить концентрацию напряжений и вероятность разрушения при боковом ударе или действии растягивающей

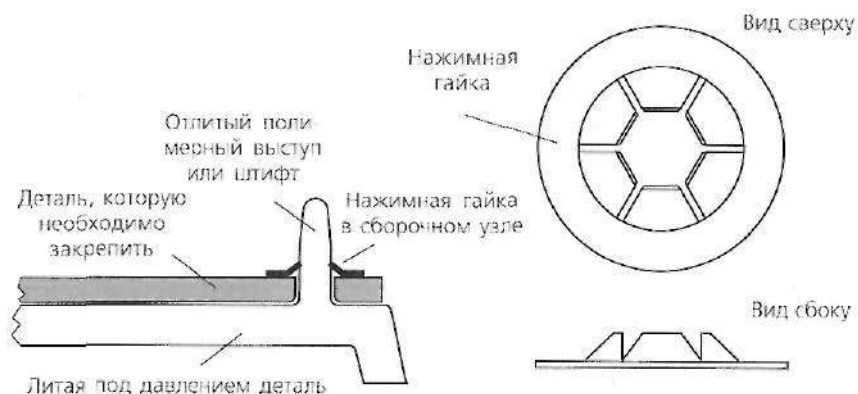


Рис. 6.71. Нажимная гайка надевается на выступ или штифт для получения неразъемного сборочного узла

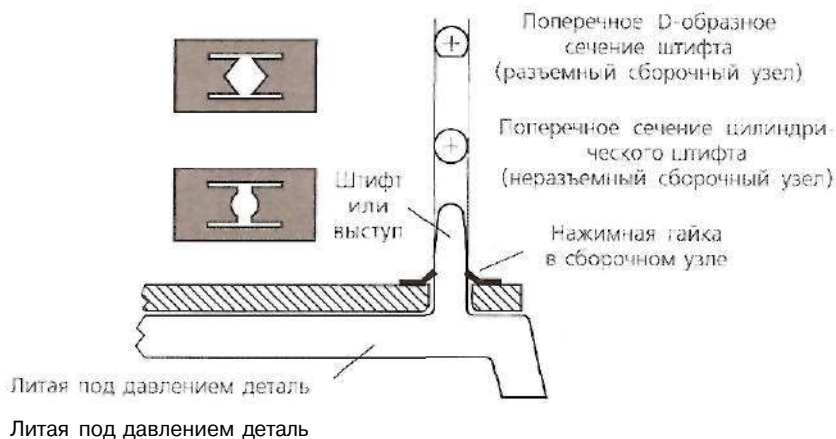


Рис. 6.72. Надеваемые клипсы Tinnerman® запрессовываются на отлитые штифты или стержень для получения неразъемных или разъемных сборочных узлов



Рис. 6.73. Нажимная гайка напрессовывается на отлитый стержень, а создающие резьбу наворачиваемые крепежные части применяют, когда требуется контролировать давление затяжки

нагрузки. Величина радиуса выбирается на компромиссной основе — с одной-стороны он должен обеспечить приемлемые механические характеристики, а с другой — стержень должен быть безупречен с эстетической точки зрения [15,28].

Заклепки и кнопки

Для сборки деталей, изготовленных литьем под давлением, иногда используют заклепки и кнопки. Зазор между заклепкой и отформованным отверстием величиной 0,25 мм компенсирует изменения, возникающие из-за разности в КЛТР [16]. Пустотелые заклепки с внутренней резьбой используются для дополнительного крепления винтами, в то время как заклепки, содержащие электрические контакты или луженые клеммы — в различных электронных приборах. Устройства для контроля усилия при установке заклепок позволяют обеспечить нужное давление расклепывания и равномерную толщину соединения. Рекомендуется использовать армированные шайбы и заклепки с большими диаметрами головок (рис. 6.74), чтобы распределить напряжения по большей площади. Заклепки с заплечиками ограничивают напряжения сжатия пластмассы. Обычно рекомендуются заклепки, изготовленные из мягких металлов (например, алюминия), или даже из таких материалов, как жидкокристаллические полимеры [16,28,43].

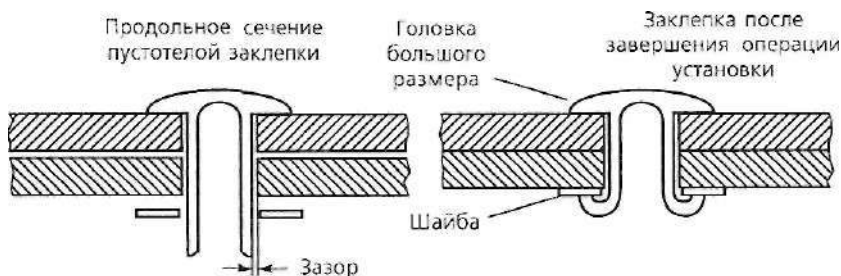


Рис. 6.74. Заклепки, используемые для сборки пластмассовых изделий, должны распределять нагрузку по максимально возможной площади. Рекомендуется использовать заклепки с головками и шайбами большого размера

6.4.2.3. Сборка с использованием вставок

Металлические вставки с внутренней резьбой используются в высококачественных пластмассовых изделиях, рассчитанных на длительную эксплуатацию. Они должны обеспечивать возможность многократной сборки и разборки при периодическом техническом обслуживании изделий.

Вставки конструируются для сборки с помощью машинных винтов как открытых, так и закрытых узлов. Вставки заформовываются или вставляются в отверстие после завершения цикла литья под давлением. Оба способа рассматриваются ниже.

Заформованные вставки

Такие вставки устанавливаются в литьевую форму перед началом операции литья под давлением. Поток расплава обтекает вставку и фиксирует ее после охлаждения пластмассы, когда она даст усадку и затвердеет. Вставки используют не только

для получения резьбы. Они обеспечивают электрическую проводимость в отдельных точках детали, армируют ее и защищают поверхность от износа [44,45].

Заформовывание вставок для сборки

Для получения резьбы с повышенным эксплуатационным потенциалом вставки иногда заформовываются в деталь в процессе литья. Эти резьбовые крепежные элементы могут быть изготовлены из алюминия, латуни, стали или пласмассы. Вставки часто изготавливают из латуни, которая обладает хорошими антикоррозийными свойствами и легко обрабатывается механически [46]. Для заформованных вставок лучше всего использовать мягкие металлы, не повреждающие формующий инструмент. Вставки обычно изготавливают холодной штамповкой или механической обработкой. Для деталей со сложной формой применяют вставки из порошковых металлов [47]. В отличие от крепежных деталей, которые вводят в отверстия и полые бобышки после завершения процесса литья под давлением, заформованные вставки придают конструкции дополнительную универсальность. Они обеспечивают длительный срок эксплуатации, улучшают качество и облегчают сборку изделий со сложной геометрией. Но при их использовании могут возникнуть определенные сложности [16,19,44,48].

Продолжительность цикла

Время, необходимое для установки вставок в литевную форму, увеличивает общую продолжительность цикла литья под давлением. Стоимость литевых машин для литья со вставками существенно выше, чем стоимость оборудования для введения вставок после завершения процесса литья. Если вставки установлены неправильно, то все изделие либо бракуется, либо должна быть отремонтирована после завершения процесса литья. Частично решить эти проблемы может использование роботов.

Бракованные детали

Детали, отлитые с нарушениями производственного цикла, трудно восстановить. Чаще их повторно перерабатывают, чем ремонтируют. Если всю деталь отправляют в отходы, вставки из инородного материала должны быть извлечены до помещения детали в гранулятор. Эта операция значительно усложняет процесс переработки.

Повреждения литевых форм

Неправильно установленные вставки, изготовленные даже из мягких металлов (латунь или алюминий), могут серьезно повредить литевную форму. Вставки не должны соприкасаться с противоположной стороной литевой формы во время ее смыкания. Системы смыкания литевой формы имеют систему безопасности, реагирующую на давление, чтобы снизить вероятность повреждения из-за неправильного совмещения полуформ. Машины с вертикальной системой смыкания литевой формы в этом случае более предпочтительны, чем горизонтальные, так как сила тяжести способствует дополнительной фиксации вставки.

Линии спая

Необходимо следить, чтобы вокруг вставки не образовывались линии спая. Толщина стенок вокруг вставок не должна создавать ограничения течению расплава. Управляемый нагрев вставки может улучшить качество потока. Линии спая могут стать серьезной проблемой в наполненных или армированных материалах [44].

Напряжения вокруг вставок, возникающие в процессе литья под давлением

В пластмассе, окружающей вставку, возникают напряжения, поскольку ее усадка ограничена жестким металлом. Эти напряжения вокруг вставки приводят к образованию волосных трещин или к растрескиванию материала [19,44,48]. Предварительный нагрев вставки может уменьшить напряжения, но из-за разности между КЛТР (у пластмасс коэффициент существенно больше, чем у металлов) остаточные напряжения компенсируются лишь частично. Если применяют предварительный нагрев металлических вставок, размеры литевой формы должны соответствовать размерам нагретых вставок.

При оценке проблем, возникающих из-за усадки пластмассы, нужно учесть два параметра: усадку отливки и допустимую деформацию детали. Податливый полимерный материал с высоким значением усадки больше подходит для литья со вставками, чем хрупкие материалы с высокой степенью усадки. Вставки легко заформовываются в податливые пластмассы с низкой величиной усадки, такие как, например, ЛБС-пластик, но они не пригодны для ПС общего назначения, имеющего низкую усадку и тенденцию к образованию волосных трещин. Необходимо принимать во внимание релаксационные характеристики полимерного материала, поскольку во время эксплуатации изделия возможно изменение температуры окружающей среды и различие КЛТР материалов вставки и детали.

При работе с заформованными вставками обычно рекомендуется проводить испытания на прототипах [44].

Вставки представляют собой цилиндрические тела с глухими отверстиями и внутренней резьбой, изготовленной механически. Вставки со сквозными отверстиями и внутренней резьбой используются гораздо реже. Вставки должны иметь выступы, которые ограничивают их перемещение в осевом направлении и препятствуют прокручиванию. Вставки должны иметь большие радиусы, чтобы избежать концентрации напряжений и улучшить течение расплава материала при литье детали [44]. Канавки обеспечивают прочность при «вытаскивании», а шлицы и накатка на поверхности увеличивают прочность при кручении. Вставки должны быть чистыми и свободными от загрязнений на поверхности. Накатка должна быть нанесена по всей поверхности вставки и иметь глубину, по крайней мере, 0,25 мм [48]. Заплечики (вертикальные или горизонтальные) предотвращают попадание расплава на внутреннюю резьбу (рис. 6.75). Вставка должна выступать из полости литевой формы, по крайней мере, на 1,6 мм в, чтобы избежать возникновения облоя. Под дном глухой вставки должно быть достаточно пространства, чтобы не нарушать течение расплава, избежать образования линий спая и обеспечить дополнительное упрочнение детали. Сквозные вставки должны иметь заплечики с каждой стороны на 0,025-0,051 мм больше, чем глубина полости литевой формы. Вставки, ориентированные в направлении перемещения литевой формы при открывании, заформовывать легче. Они удерживаются с помощью знаков или с помощью выемок в формующей полости.

Другие типы заформованных вставок

В то время как заформовывание вставок в реактопласты в процессе изготовления деталей применяется достаточно широко, в термопласты этим методом вставки вводятся реже. Это объясняется тем, что в детали из термопластов вставки МОГУТ

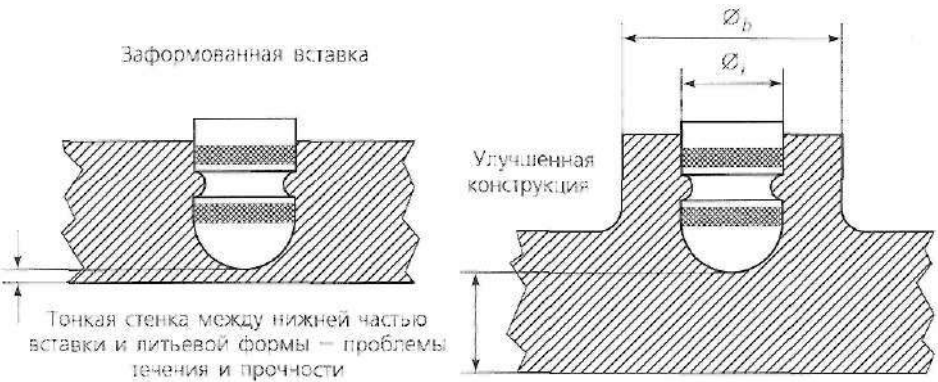


Рис. 6.75. В большинстве случаев металлические вставки вводятся в направляющие отверстия отлитых бобышек с после литья под давлением, но вставки могут быть заформованы непосредственно в ходе литья

быть легко введены после их формования способами, лишенными недостатков, которые характерны для процесса заформовывания. Но необходимо заметить, что при заформовывании максимальный контакт вставки с пластмассой.

Крыльчатки, шестерни, вентиляторы и подшипники обычно отливаются вместе с металлическими втулками. Конструкция вставок в этих деталях не позволяет устанавливать их после формования. Деталь, показанная на рис. 6.76, состоит из толстой металлической пластины, заформованной в рамку из ПК. Небольшие закругления в углах металлической восьмиугольной вставки способствуют концентрации напряжений и образованию волосяных трещин в пластмассовой детали. Пластина в форме диска или восьмиугольника со скругленными углами улучшает качество отливки, по увеличивает стоимость изготовления вставок.

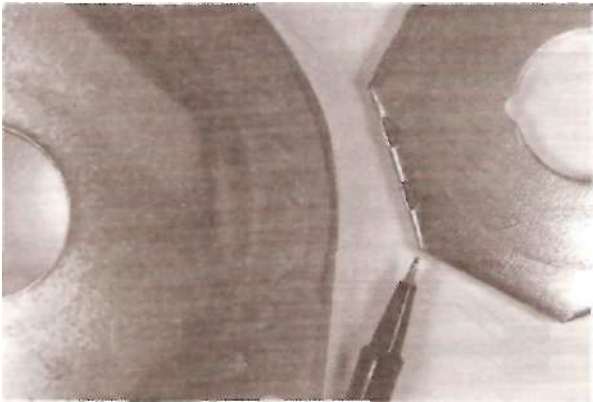


Рис. 6.76. Острые кромки металлических вставок приводят к концентрации напряжений и образованию волосяных трещин из-за усадки пластмассы в литевой форме. Закругления краев вставки способствуют более равномерному распределению напряжений

Если несколько штампованных вставок из металлического листа вводятся в одну и ту же деталь, рекомендуется оставлять объединяющую вставки рамку, чтобы упростить процесс (рис. 6.77).

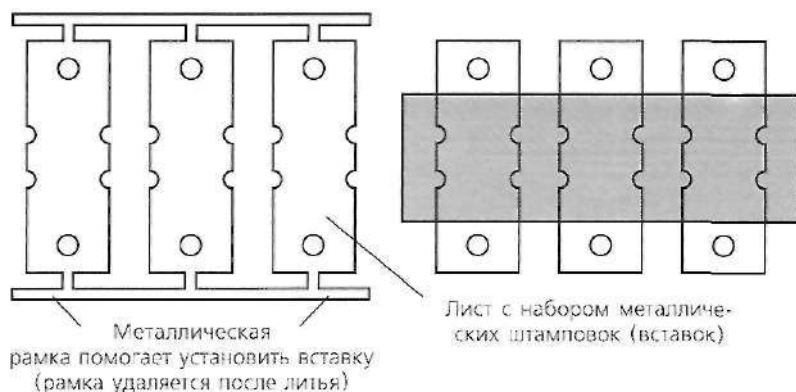


Рис. 6.77. Металлическая рамка облегчает установку вставок в литевную форму

Предварительно перфорированные металлические детали (листовая арматура обычно из листа толщиной 1,0-2,0 мм) удерживаются в литевой форме с помощью фиксирующих штифтов. Если деталь сконструирована неправильно, то, возможно ее искривление, вызванное усадкой пластмассы [46].

Чтобы изготовить металлическую штамповку с мелкими интегрированными деталями, иногда пластмасса наплавляется на вставку из металлического листа (рис. 6.78).

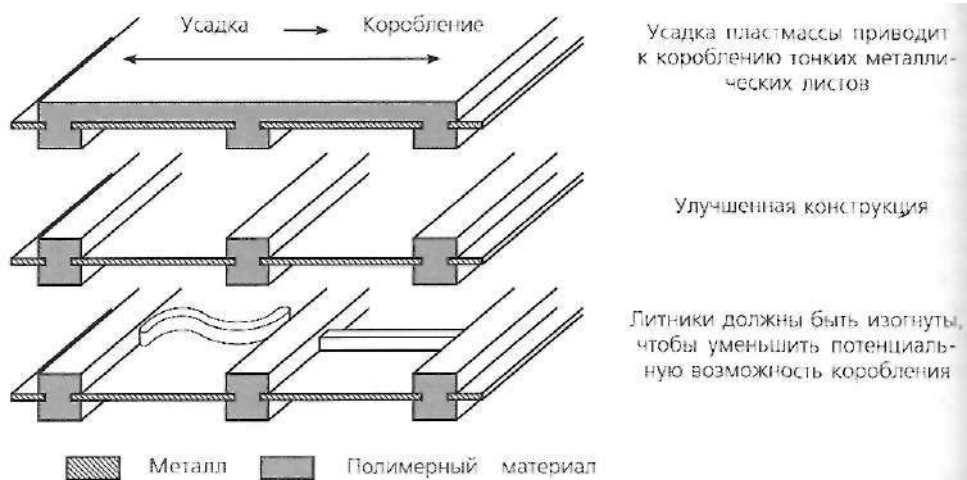


Рис. 6.78. В пластмассовых деталях со вставками из тонких или облегченных металлических листов наблюдается коробление или продольный изгиб

Вставки круглого сечения (круглая арматура и металлические штифты) могут быть зафиксированы в литой детали различными способами, включая те, которые приведены на рис. 6.79-6.80. Накатку на поверхности в случае малых диаметров вставок обычно делают глубиной до 0,25 мм. Накатка глубиной до 0,76 мм используется

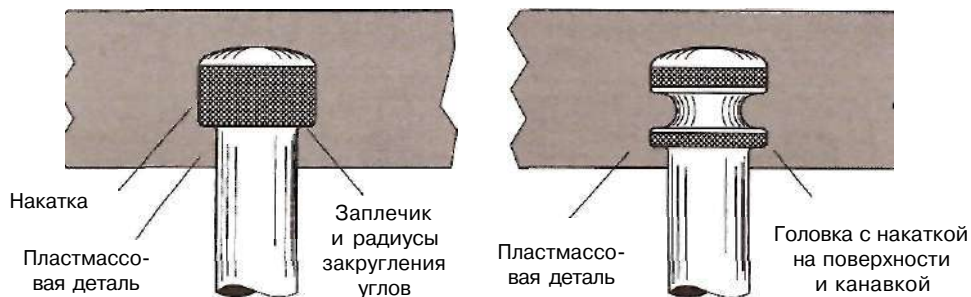


Рис. 6.79. Накатка по окружности вставки обеспечивает повышенную прочность ее фиксации в осевом направлении и при кручении. Канавки обеспечивают повышенную стойкость к «вытаскиванию»

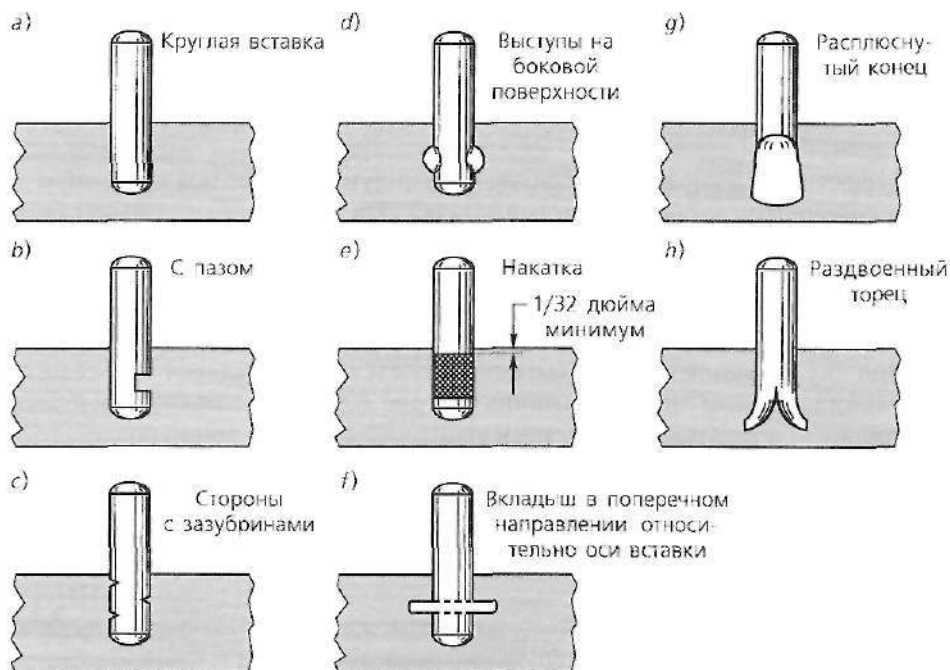


Рис. 6.80. Различные методы обеспечения повышенной прочности закрепления круглой арматуры при действии осевой нагрузки и при кручении

для арматуры большого диаметра. Вставки должны быть расположены таким образом, чтобы усадка пластмассы способствовала более прочной их фиксации в деталях. Расплав, поступающий в обод, показанный на рис. 6.81, усаживается при охлаждении таким образом, что будет образовываться зазор между пластмассой и ободом. Конструкция металлической арматуры должна быть модифицирована таким образом, чтобы способствовать более прочной фиксации в пластмассе (рис. 6.81) [48].

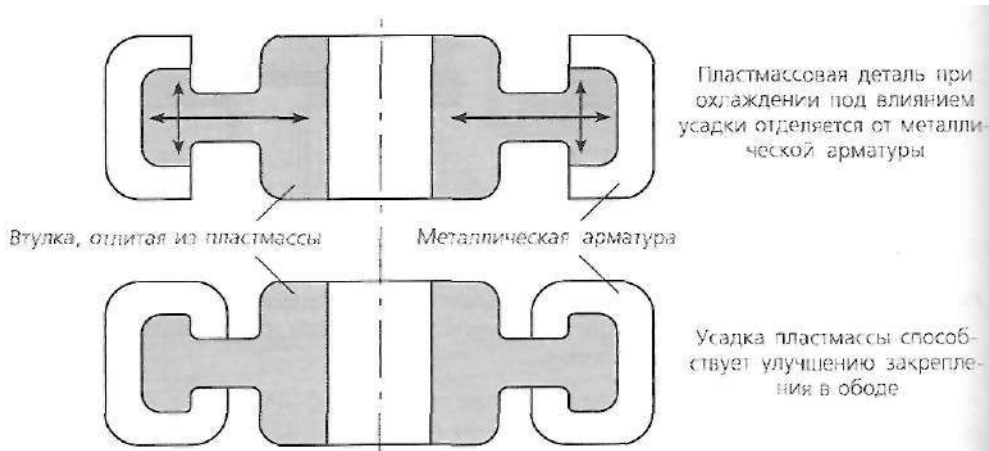


Рис. 6.81. Конструкция арматуры должна способствовать ее более прочной фиксации при усадке пластмассы

Существуют технологии, позволяющие получать литые под давлением детали с пластмассовыми вставками (вторая деталь). Эти технологии применяются для изготовления многоцветных или многофункциональных деталей, например, многоцветные линзы для автомобильных фар [49,50]. Пластмассовые вставки могут быть установлены в форму вручную или с помощью робота. Детали из разнородных пластмасс могут быть изготовлены методом двухкомпонентного литья (рис. 6.82 или 6.83).

При двухкомпонентном литье используются вращающиеся литьевые формы и двухкомпонентная литьевая машина (см. рис. 6.82). Как только первый материал затвердевает, деталь поворачивается и устанавливается в матрицу, после чего осуществляется впрыск другого материала, который целиком заполняет формующую полость для двухцветной отливки. В процессе, который показан на рис. 6.83, используются подвижные вкладыши или литьевые формы с ползунами, которые располагаются в матрице литьевой формы в том месте, где затвердевает первая порция отлитого материала.

Как только первый материал охлаждается, пуансон отодвигается и образуется полость, которая заполняется вторым материалом.

В некоторых случаях соединение между двумя пластмассовыми деталями осуществляется за счет простой механической связи, а в других случаях процесс аналогичен сварке и даже соединению в результате химической реакции.

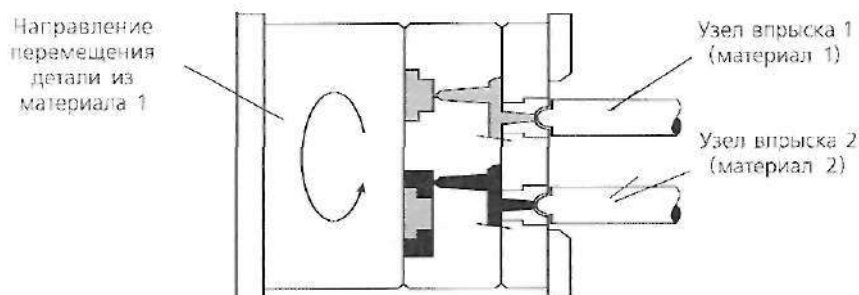


Рис. 6.82. Двухкомпонентное (два впрыска) литье под давлением с использованием вращения литейной формы

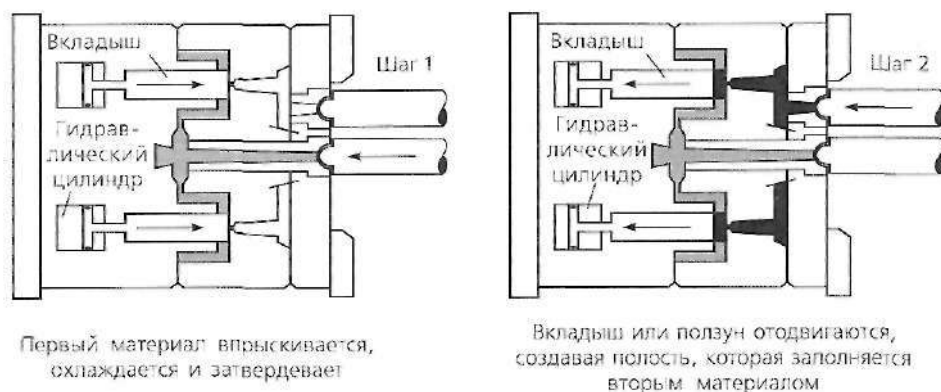


Рис. 6.83. Двухкомпонентное литье под давлением с помощью «отодвигаемых» вкладышей. После того как формирующая полость заполняется первой пластмассой (и охлаждается), полуформы литейной формы раздвигаются, создавая дополнительный объем, который заполняется второй пластмассой

Осадка материала

Это альтернативный заформовыванию процесс фиксации вставки. Вставка, которая должна быть зафиксирована, вставляется в «карман» внутри отлитой детали из термопласта таким же способом, как устанавливается металлическая вставка с резьбой внутри полый бобышки. Пластмассовая деталь отливается с «карманом», а края затем переформовываются с помощью осаживающей оснастки (электронагрев или ультразвук (рис. 6.84)) [51].

Материал детали охлаждается и затвердевает и под давлением оснастки захватывает вставку. Мягкие и податливые пластичные термопласты, такие, например, как АБС-пластики, достаточно легко подвергнуть осадке. В некоторых случаях используется осадка без помощи тепловой энергии (то есть холодная осадка). Этот процесс применим только для материалов, которые в состоянии выдерживать большие

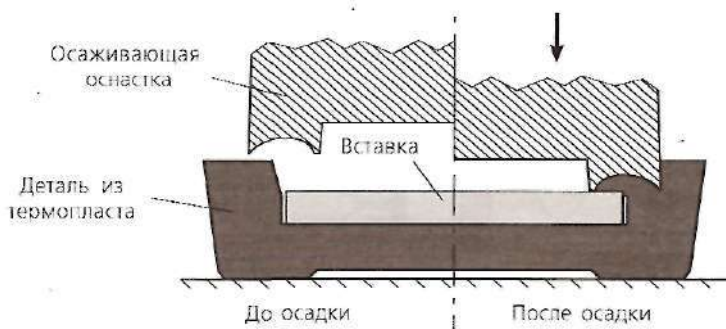


Рис. 6.84. Осаживающая оснастка используется для фиксации вставки, размещенной внутри отлитой под давлением детали

деформации. Формованные детали имеют тонкие стенки. Процесс холодной осадки больше всего подходит для частично кристаллических и вязких при разрушении аморфных термопластов. Соединения, полученные с помощью холодной осадки, в большей степени склонны к восстановлению формы, растрескиванию и чувствительны к воздействию химически активных сред, чем те, которые были получены с помощью нагрева или ультразвука.

Введение вставок в готовые пластмассовые детали

Этим методом обычно вводят специальной формы гайки или цилиндрические металлические вставки со сквозными или глухими резьбовыми отверстиями, в которые затем вводятся машинные винты. Соединения, выполненные с помощью таких вставок и машинных винтов, характеризуются высокой точностью сборки и долговечностью и могут подвергаться повторной сборке. Пластмассовая деталь отливается с направляющими отверстиями в местах, где предполагается разместить вставки. Для введения и фиксации вставок внутри отверстия используются различные методы [19, 24, 51, 52]:

- вставки, запрессованные «на холоду»;
- горячая запрессовка;
- введение и запрессовка вставок с использованием ультразвука;
- установка расширяющихся вставок;
- вставки, создающие резьбу.

Вставки, запрессованные «на холоду»

Самым простым средством установки металлических крепежных деталей с внутренней резьбой в отлитой пластмассовой детали является простой нажим или запрессовка во внутрь детали. Вставка запрессовывается в отверстие или полую бобышку так, как это показано на рис. 6.85.

Вставка может быть закреплена с помощью фланца, запрессованного в ступенчатое отверстие или в бобышку.

Основные рекомендации и инженерные уравнения, приведенные выше в этой главе для соединения прессовой посадкой, могут быть использованы для определения значения натяга в рассматриваемом методе. Отверстия в прототипах деталей должны



Рис. 6.85. Для фиксации вставки используются различные методы. В простейшем случае вставка просто запрессовывается в отверстие меньшего, чем ее диаметр, размера

изготавливаться оформляющими знаками большего диаметра, а затем, если необходимо, знаками меньшего диаметра.

Операция холодной запрессовки применима только для деталей из эластичных пластмас. Вставки могут быть гладкими или текстурированными (ромбовидная накатка) иногда даже с зубцами. Это обеспечивает прочность фиксации вставки в результате затекания расплава пластмассы в ее полости. Прямолинейная накатка на поверхности вставок используется в тех случаях, если требуется обеспечить только сопротивление вращению. Улучшению фиксации вставки способствуют клеи, но ими надо пользоваться осторожно, поскольку на межфазной границе может возникнуть значительные растягивающие напряжения [46]. Вставки обычно запрессовываются в деталь немедленно после ее извлечения из литейной формы, потому что в тот момент деталь относительно мягкая и происходит усадка. Стенка вокруг вставки и отверстие для нее не должны иметь уклон, чтобы обеспечить равномерное распределение напряжений и максимальную степень фиксации. Когда вставки устанавливаются в выступающие бобышки, часть отверстия, расположенная ниже вставки, может быть конической формы, чтобы облегчить выталкивание детали из литейной формы (рис. 6.86). Использование вставок, запрессовываемых «на холоду», ограничено из-за низкой прочности их закрепления и значительных напряжений вокруг вставки по сравнению с другими способами установки [16].

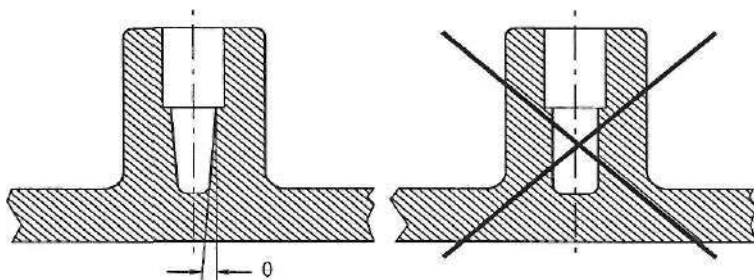


Рис. 6.86. Запрессовываемые вставки требуют, чтобы отверстия для их введения были оформлены без уклона. При этом часть отверстия, находящаяся ниже вставки, может иметь некоторый уклон, чтобы облегчить выталкивание отливки из литейной формы

Горячая запрессовка

Метод предполагает использование отверстия в детали, меньшего, чем у вставки, диаметра, и вставок с канавками или рифлением на наружной поверхности. Вставка запрессовывается электрообогреваемым инструментом. Пластмасса детали, находящаяся в контакте со вставкой, размягчается и заполняет поднутрения по мере ее вдавливания в отверстие. При горячей запрессовке вставка и отверстие должны иметь коническую форму. Это необходимо, чтобы обеспечить более равномерное давление и предотвратить осевое смещение расплава при перемещении вставки. В бобышках, используемых для горячей запрессовки, должна быть предусмотрена емкость под вставкой (обычно высотой 0,8 мм) для размещения выдавленного материала. Для ускорения процесса можно применять предварительно нагретые вставки, но при этом усложняется их монтаж в детали и приложение к ним нагрузки. Оборудование для выполнения данного процесса простое, а уровень остаточных напряжений ниже, чем при холодной запрессовке. Однако процесс отмечается низкой производительностью, так как необходимо нагревать всю вставку до температуры, достаточной для размягчения окружающего вставку полимерного материала [16].

Вставки, создающие резьбу

Вставка имеет наружную резьбу, которую можно получить, ввинчивая вставку, то есть врезая ее в деталь, или формовать литьем под давлением. Как только достигается нужное положение, трение между материалом детали и вставкой будет удерживать последнюю от проворачивания, а ее наружная резьба будет обеспечивать сопротивление ее вывинчиванию. Наружный размер резьбы вставки составляет 9,5 мм, что обусловлено ограничением на верхний предел крутящего момента. При этом наружный диаметр внутренней резьбы вставки составляет 6,35 мм. Создающие резьбу вставки могут быть введены в детали как из реактопластов, так и из термопластов. Тип материала определяет конфигурацию наружной резьбы. Формующие резьбу вставки обычно используются в деталях из эластичных термопластов, а нарезающие резьбу вставки — в деталях из жестких стеклообразных или армированных термопластов и реактопластов [24,52].

Вставки из свернутой в виде спирали проволоки иногда используются для создания точного и долговечного резьбового соединения с винтами. Не создающие резьбу вставки помещаются в отверстие детали, в котором резьба предварительно отформована или нарезана [24].

Введение и запрессовывание вставок с использованием ультразвука

Установка для ультразвуковой сварки может быть использована для введения вставок в детали из пластмасс. При ультразвуковой запрессовке обычно используются вставки из латуни с внутренней резьбой и набором трапециевидных в сечении выступов. Эти выступы (рис. 6.87 и 6.88) предназначены для повышения сопротивления извлечению вставок из детали. Вставки и приемные отверстия в деталях обычно имеют коническую форму, чтобы снизить усилие запрессовки, гарантировать равномерное выделение тепла и уменьшить продолжительность запрессовки (обычно менее 1 с) [16, 24, 51].



Рис. 6.87. Оборудование для ультразвуковой сварки может быть использовано для введения вставок в бобышки

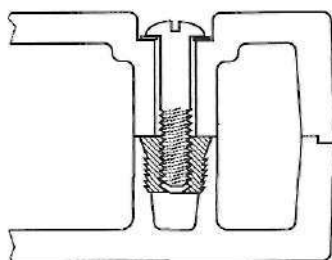


Рис. 6.88. Латунные вставки с нарезанной внутренней резьбой, предназначенные для ультразвуковой запрессовки могут быть различного размера и иметь разную геометрическую форму

Вставка запрессовывается в бобышку холодным излучателем или волноводом, который вибрирует с низкой амплитудой на ультразвуковой частоте. Деталь в это время находится в фиксированном состоянии. Вибрация на границе вставка/стенка бобышки приводит к выделению теплоты трения, размягчающей пластмассу. По мере того как вставка запрессовывается, под влиянием вибрирующего излучателя (в зоне запрессовки) происходит расплавление пластмассы, которая заполняет поднутрения в детали. После прекращения вибраций расплавленная пластмасса затвердевает. Ультразвуковые инструменты должны быть изготовлены из закаленной стали или с наконечником из карбида титана. Для долгосрочной эксплуатации рекомендуется применять инструмент со сменными наконечниками [51]. Процесс ультразвуковой запрессовки протекает быстрее, чем обычная горячая посадка, поскольку тепло выделяется только там, где это нужно: на поверхности соприкосновения металла с пластмассой. В результате этого сборочный узел характеризуется высокой прочностью и имеет низкие остаточные напряжения.

Важнейший параметр процесса — глубина запрессовки. Слишком глубокого размещения вставки следует избегать, так как это уменьшает прочность сборочного узла (рис. 6.89). Ультразвуковая запрессовка вставок пригодна для введения в детали из всех разновидностей термопластов. Такой метод установки может быть использован для введения различных крепежных деталей, например, шпильки (рис. 6.91).

Предпочтительное положение вставки
Верхняя часть вставки прижимается к поллой бобышке по мере закручивания винта



Вставка запрессована слишком глубоко
Вставка извлекается из детали по мере закручивания болта

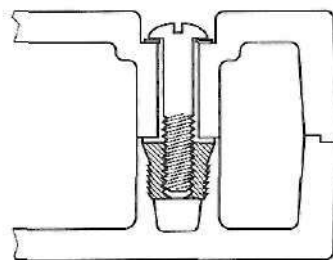


Рис. 6.89. Вставка должна быть расположена таким образом, чтобы она контактировала с сопрягаемой деталью после затяжки винта

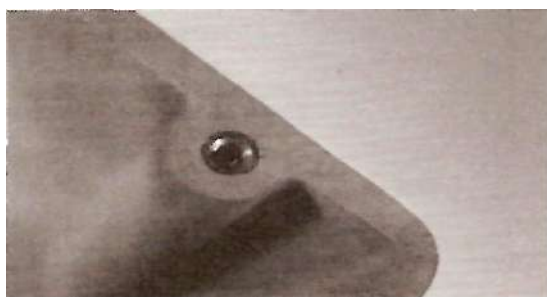


Рис. 6.90. Создающие резьбу вставки обеспечивают конструкциям, содержащим наполнитель из вспененного термопласта, более продолжительный срок службы, чем создающие резьбу винты

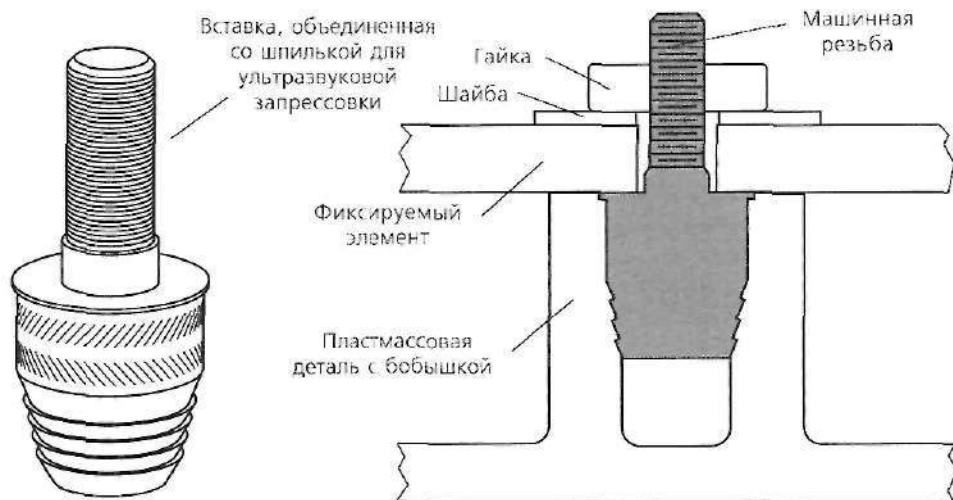


Рис. 6.91. Различные металлические крепежные детали могут быть введены с помощью ультразвука, например, шпильки с резьбой

Установка расширяющихся вставок

Иногда в детали из пластмассы устанавливается латунная вставка с внутренней резьбой, которая сама фиксируется в формованном или просверленном отверстии за счет эффекта расширения. Продольные разрезы придают вставкам вид крепежного элемента, состоящего из нескольких консолей (рис. 6.92).



Рис. 6.92. Возможны различные конфигурации расширяющихся вставок. Во вставках используется специальная шайба, которая опускается и расширяет снабженную накаткой часть вставки (с разрешения *Heli-coil Division, Emhart Fastening Group*)

Вставки имеют на наружной поверхности накатку или зубцы. Они вводятся в отверстия с гладкими поверхностями. Если расширяющаяся вставка вводится в деталь из отвержденного реактопласта, приемное отверстие делают несколько большего размера, что позволяет вставке свободно опуститься до дна отверстия. Глубина отверстия при этом должна быть равна длине вставки (радиус в основании отверстия не должен мешать расширению), если же отверстие будет больше, следует использовать вставку с фланцем (рис. 6.93).

Для введения расширяющейся вставки используется специальный инструмент, который нажимает шайбу, вызывающую отклонение крючков вставки. В деталях из термопластов приемное отверстие может быть несколько меньшего размера, благодаря чему вставка после расширения оказывается запрессованной в отверстие. Если расширяющиеся вставки используются в деталях из армированных реактопластов, нужно быть особенно внимательным к уровню окружающих напряжений [19, 24, 52].

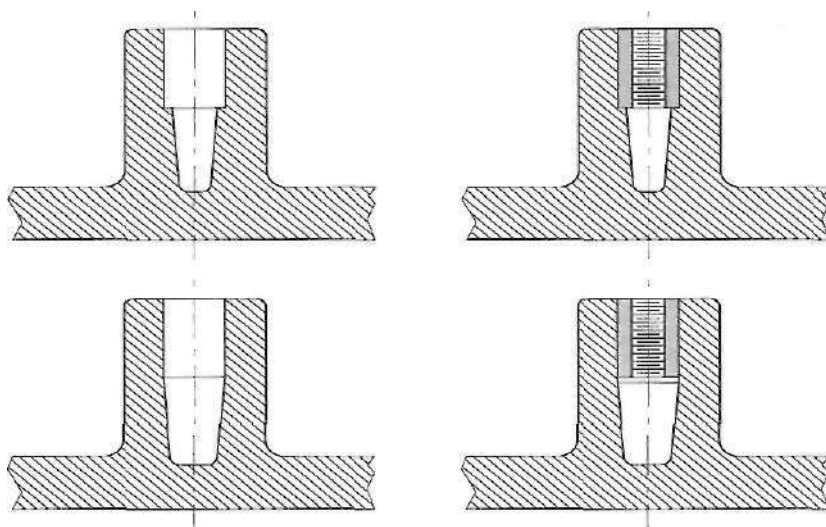


Рис. 6.93. Расширяющиеся вставки стандартного и фланцевого типов. Если необходимо установить стандартную вставку в бобышке с глубоким отверстием, последнее должно быть ступенчатым. Внутренние радиусы в районе углов отверстий могут мешать расширению вставки. Конструкция вставки, снабженной фланцем, ограничивает перемещение вставки вглубь отверстия

6.5. Сварка деталей из термопластов

6.5.1. Общие положения

Существует много методов сварки, пригодных для образования соединений деталей из термопластов. Если деталь из термопласта присоединяется к детали из других материалов, например, из металла или отвержденного реактопласта, обычная сварка не пригодна. В этом случае на деталь предварительно наносится слой промежуточного материала или клея.

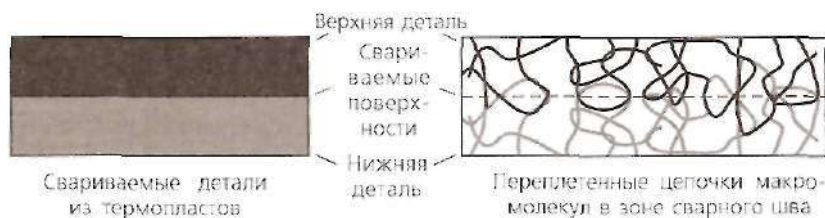


Рис. 6.94. Во время сварки происходит диффузия макромолекул и их переплетение. Подвижность молекул возникает в результате набухания материала под влиянием растворителя или в результате нагревания

Процесс сварки включает в себя подготовку поверхности, ее смачивание и межмолекулярную диффузию [53]. Подвижность молекул в процессе сварки достигается использованием растворителей или нагрева. Различные методы сварки отличаются способом генерирования тепловой энергии. При сварке нагретым инструментом передача теплоты осуществляется главным образом за счет теплопроводности, а при вибрационной сварке происходит счет вибрации происходит преобразование механической энергии колебаний в тепловую в результате трения поверхностей. На выбор метода сварки влияют тип материала, требования к конструкции, к герметичности шва и внешнему виду изделия, форма и размеры деталей, наличие оборудования, требования к экономичности процесса. Выбор метода сварки должен быть сделан на самых ранних стадиях процесса проектирования изделия. Сварка термопластов считается необратимым процессом. Хотя индукционная сварка позволяет создавать разборные сборочные узлы, для этих целей чаще используются замковые соединения и механическое крепление.

Ниже перечислены тепловые методы сварки термопластов:

- ультразвуковая сварка;
- вибрационная сварка трением;
- ротационная сварка;
- сварка нагретым инструментом;
- электромагнитная (индукционная) сварка;
- резисторная сварка;
- сварка нагретым газом;
- экструзионная сварка

Более подробное описание приводится в последующих разделах этой главы.

Также рассматриваются клеевые соединения и соединения с помощью растворителя.

Нагретый газ обычно используется для сварки пластмассовых труб, листов или профилей, но не деталей, полученных литьем под давлением. Тем не менее один из разделов посвящен именно этой технологии, поскольку многие литые под давлением изделия, особенно панели автомобилей, ремонтируются с помощью сварки нагретым газом. Кроме того, сварку нагретым газом иногда используют при изготовлении прототипов пластмассовых деталей.

6.5.2. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка широко применяется для сварки деталей из термопластов, используемых в автомобильной промышленности, производстве изделий медицинского назначения, а также при изготовлении игрушек и бытовой техники. Для осуществления сварки используется энергия высокочастотных (ультразвуковых) колебаний малой амплитуды, которые вызывают поверхностное и межмолекулярное трение, сопровождающееся выделением теплоты. В этом процессе одна из двух соединяемых деталей прочно фиксируется с помощью стационарного зажима на столе, а другая подвергается воздействию синусоидальных ультразвуковых колебаний, нормальных к границе поверхности контакта (рис. 6.95).

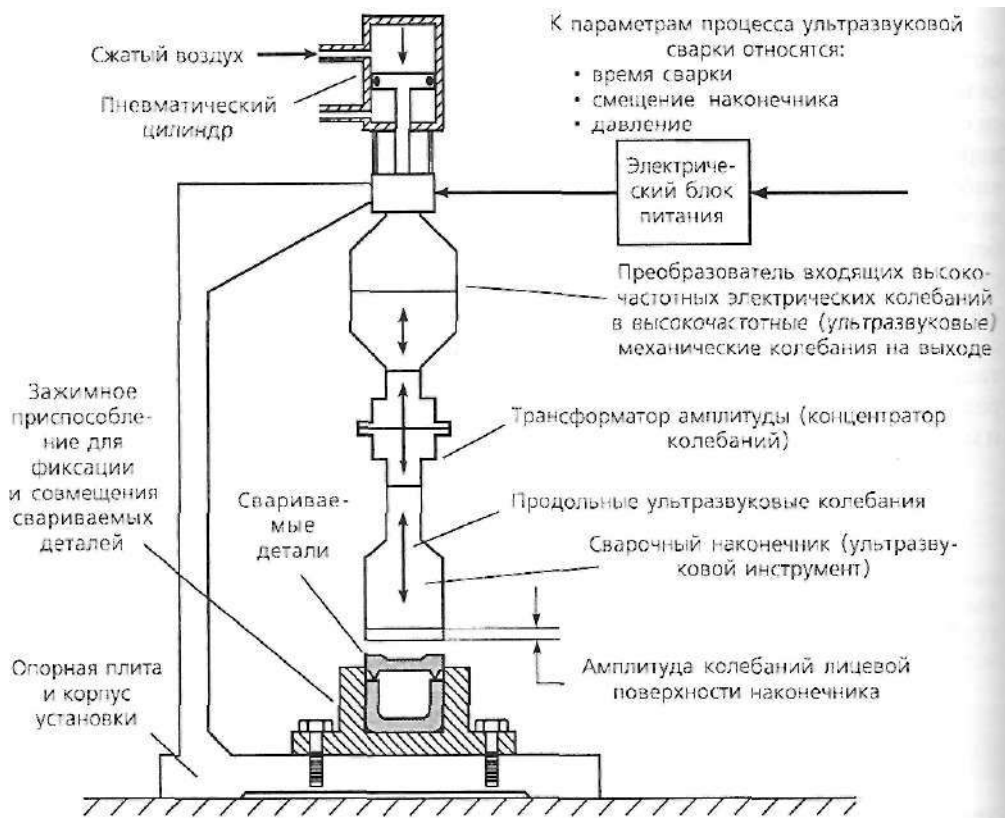


Рис. 6.95. * Схема типичной установки для ультразвуковой сварки. Ультразвуковая сварка используется для соединения деталей малого и среднего размера

Ультразвуковая сварка осуществляется при частотах от 20 до 50 кГц и при амплитуде колебаний в диапазоне 15-60 мкм [54]. Звуковые частоты в диапазоне ниже 15 кГц используются для сварки больших деталей или мягких материалов [43]. Продольные колебания передаются сквозь верхнюю деталь к соединяемым поверхностям деталей, которые прижаты друг к другу. Как внешнее, так и внутреннее трение генерирует тепло избирательно, размягчая материал локально в зоне сварки. Как только достигается нужная осадка в зоне сварного шва, ультразвук отключается, и сварному шву дают остыть и затвердеть. Процесс сварки занимает от 0,5 до 1,5 с [55,56]. Крупногабаритные детали соединяют с помощью нескольких сварочных аппаратов [54].

Установка для ультразвуковой сварки

Установка для ультразвуковой сварки (рис. 6.95) состоит из набора различных модулей [51, 54, 55].

Блок питания/генератор

Блок питания преобразует переменный ток частотой 50/60 Гц в ток частотой от 20 до 40 кГц.

Преобразователь

Высокочастотная электрическая энергия преобразуется в механические колебания той же частоты. Для этого используются пьезоэлектрические преобразователи, зажатые между металлическими блоками.

Стойка и пресс

В жесткой стойке крепятся преобразователь, блок вибратора, пневмоцилиндр и держатель детали.

Концентратор

Концентратор представляет собой полуволновый резонатор, изготовленный из алюминия или титанового сплава, который соединяет преобразователь с инструментом. Концентратор усиливает или уменьшает амплитуду, а также используется в качестве простого соединительного элемента.

Инструмент

Инструмент или волновод представляет собой полуволновой резонатор, передающий ультразвуковые колебания в свариваемую деталь. Инструмент обычно изготавливается из титана, алюминия или стали. Титан и алюминий обладают необходимыми акустическими свойствами, а титан с наконечником из твердого сплава и закаленная сталь имеют повышенный срок службы. Инструмент из титана с наконечником из твердого сплава используется для сварки при высоких амплитудах, а термообработанная сталь подходит для низкоамплитудной обработки.

Зажимное приспособление

Фиксирует детали и координирует подлежащие сварке детали. Фиксируемая деталь также подвергается воздействию высокочастотных колебаний через сопрягаемую деталь. Зажимное приспособление может иметь полиуретановую прокладку для поглощения вибраций и предотвращения повреждения деталей.

Управление

Процесс ультразвуковой сварки контролируется по продолжительности сварки, осадке сварного шва или мощности, подводимой к сварному шву. Дополнительно контролируются давление сварки и продолжительность охлаждения. При ультразвуковой сварке обычно используются частоты 20 или 40 кГц. Устройства, работающие на частоте 20 кГц, распространены больше, но более высокая частота дает некоторые преимущества [57]. При более высокой частоте уменьшается длина волны, благодаря чему можно сваривать детали малого размера. Увеличение частоты позволяет уменьшить амплитуду колебаний и шум. Чем меньше амплитуда колебаний, тем меньше вероятность повреждения деталей из-за механического воздействия. Уменьшение амплитуды колебаний означает снижение мощности, подводимой к шву, поэтому расстояние между наконечником и местом соединения должно быть минимальным.

Факторы, влияющие на конструкцию соединения

Существующие конфигурации соединений при ультразвуковой сварке можно разделить на две группы. К первой относятся соединения, при выполнении которых ультразвуковые колебания перпендикулярны соединяемым поверхностям (соединения встык и ступенчатые соединения). Ко второй группе относятся соединения, выполняемые с применением колебаний, параллельных сопрягаемым поверхностям (соединения в нахлестку и «на ус») [58]. Основные характеристики соединений

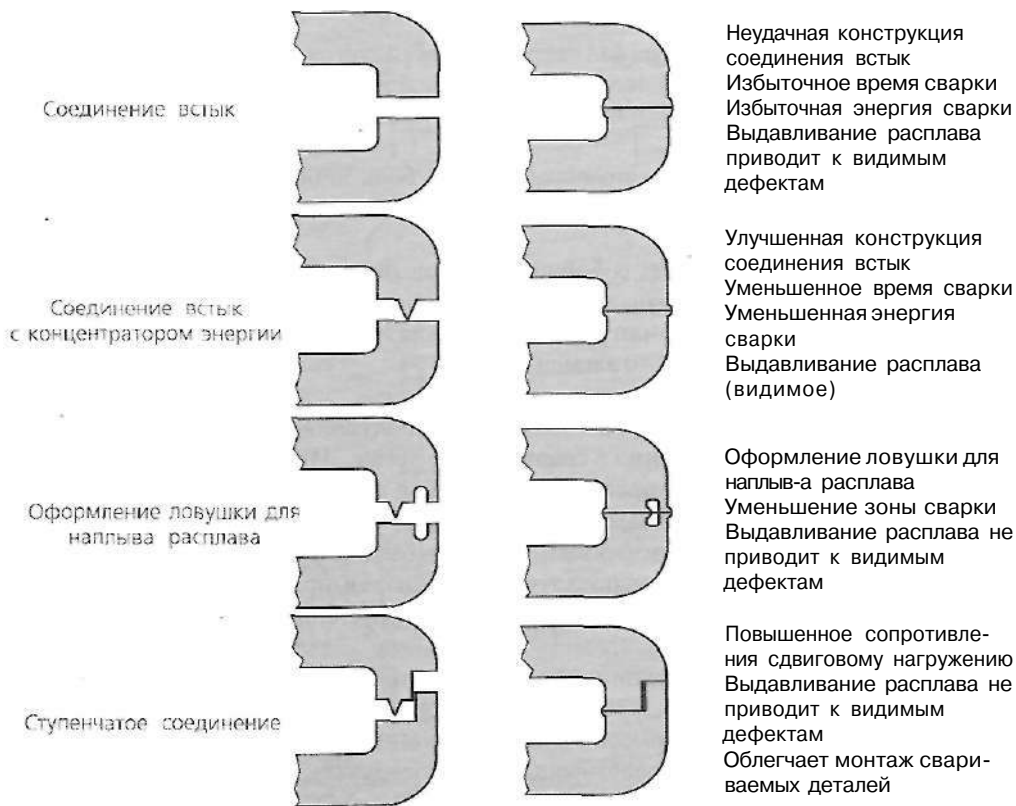


Рис. 6.96. Различные виды сварных швов и конфигураций стыков, использующихся при ультразвуковой сварке. Ступенчатые соединения и соединения встык подходят для большинства термопластов

приведены ниже, но перед сваркой все равно нужно проконсультироваться с изготовителем материала.

Соединения встык

Различные виды соединений встык и ступенчатых соединений приведены на рис. 6.96. Первая конструкция соединения на практике не используется, потому что она требует подведения слишком большой энергии для сварки и характеризуется неровным наплывом шва. Поэтому одну из двух поверхностей снабжают клинообразным или треугольным выступом, называемым концентратором энергии.

Острые концентратора энергии контактирует с сопрягаемой поверхностью в процессе сварки и расплавляется. Под давлением расплавления пластмасса растекается по всей зоне сварки.

Правильно выбранная конструкция концентратора энергии обеспечивает достижение оптимальной прочности и качество шва, как и продолжительность амплитуды колебаний и давление влияют на характеристики соединения. Расход энергии играет

Типовые размеры концентраторов энергии, мм

Размер	Аморфный термопласт		Частично кристаллический термопласт	
	Мелкие детали	Крупногабаритные детали	Мелкие детали	Крупногабаритные детали
h	0,3-0,4	0,5-0,6	0,5-0,7	0,7-1,0
θ	от 60° до 90°		90°	

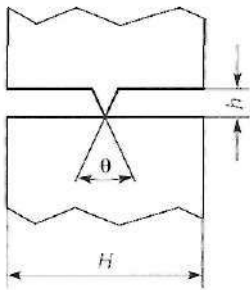


Рис. 6.97. Размеры концентраторов энергии для аморфных и частично кристаллических термопластов

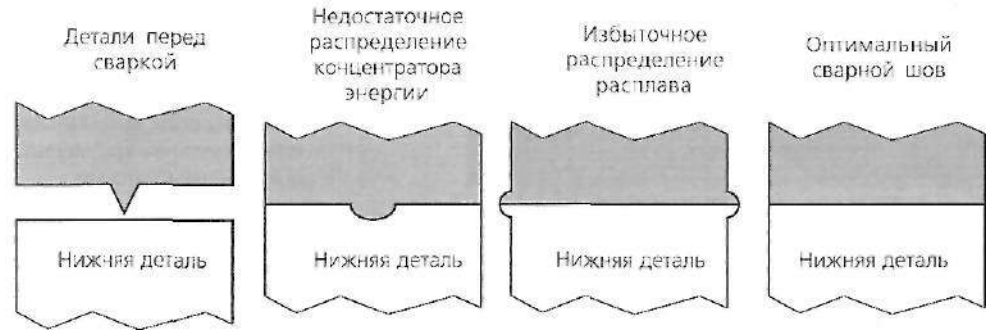


Рис. 6.98. Условия сварки оказывают существенное влияние на прочность и внешний вид сварного соединения

главную роль в формировании качественного шва. Как недостаток, так и избыток энергии ухудшают качество шва [60]. Избыточное сварочное давление приводит либо к недостаточному плавлению концентратора энергии, либо к избыточному вытеканию расплава, когда одновременно имеет место большая продолжительность сварки. Результатом этого является образование заметного наплыва и неблагоприятная ориентация макромолекул вдоль шва. На рис. 6.99 представлены схемы модификации

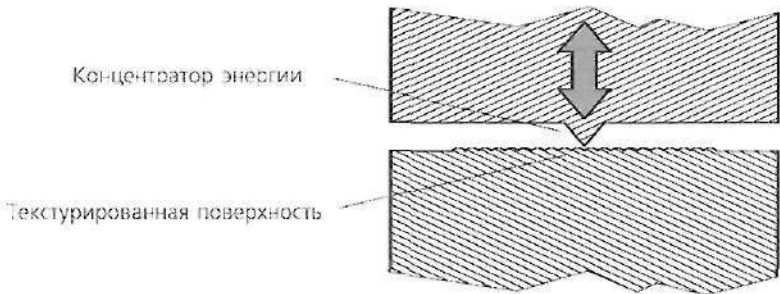


Рис. 6.99. Текстурированная поверхность напротив концентратора энергии улучшает качество сварного шва при соединении встык

конструкций соединяемых встык поверхностей [60]. На одной из деталей имеется обычный концентратор энергии, а вторая деталь имеет шероховатую или текстурированную поверхность, которая способствует повышению качества сварного шва и его прочности, а также упрощает процесс сварки. Существуют и другие конфигурации соединяемых участков с текстурированной поверхностью.

Наплыв, который показан на рис. 6.100, может быть уменьшен с помощью оформления ловушек на соединяемых участках деталей (рис. 6.96). Ловушки для расплава обычно конструируются с 10 %-ым запасом по объему [58].

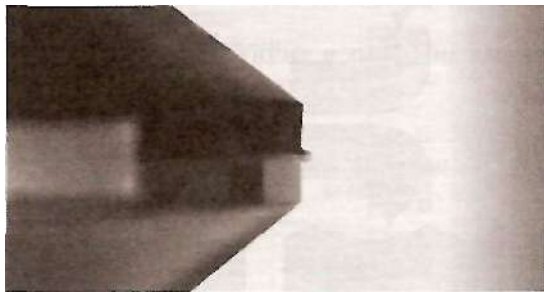


Рис. 6.100. Поперечное сечение стыкового сварного шва. Показано образование чрезмерного по размерам наплава

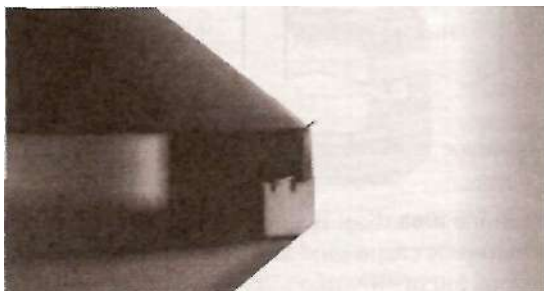


Рис. 6.101. Поперечное сечение стыкового шва, в котором предусмотрены внутренние и внешние ловушки для наплава

Соединения с ограничением вытекания расплава (рис. 6.102) представляют собой альтернативу стандартному соединению встык [61]. Детали для таких соединений сконструированы так, чтобы захватывать или удерживать расплав в зоне сварки. Они хорошо подходят для деталей из полиформальдегида или ПА, которые быстро переходят из твердого состояния в расплавленное в узком интервале температур. Для соединения деталей больших размеров требуются повышенные амплитуды колебаний и энергия сварки по сравнению с деталями, для соединения которых используются треугольные концентраторы энергии [61].

Место расположения стыковых сварных швов обычно выбирают у наружной грани стенки или по периферии литой детали, а иногда вдоль внутренних ребер или выступов. Чтобы избежать образования дефектов в зоне пересечения швов, лежащих под углом в одной плоскости, концентратор энергии в этой зоне должен быть уменьшен и закруглен. Если от сварного соединения герметичность не требуется, в уголках соединяемая поверхность может быть вообще лишена концентратора энергии (рис. 6.103) [59].

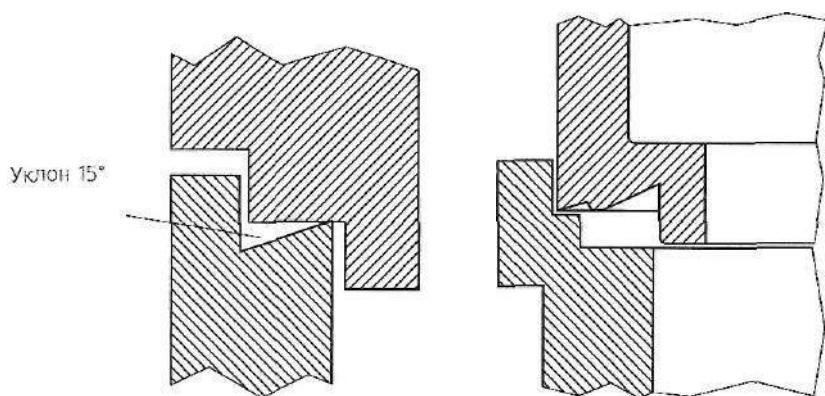


Рис. 6.102. Типичная конструкция соединения пластмассовых деталей ультразвуковой сваркой с ограничением вытекания расплава

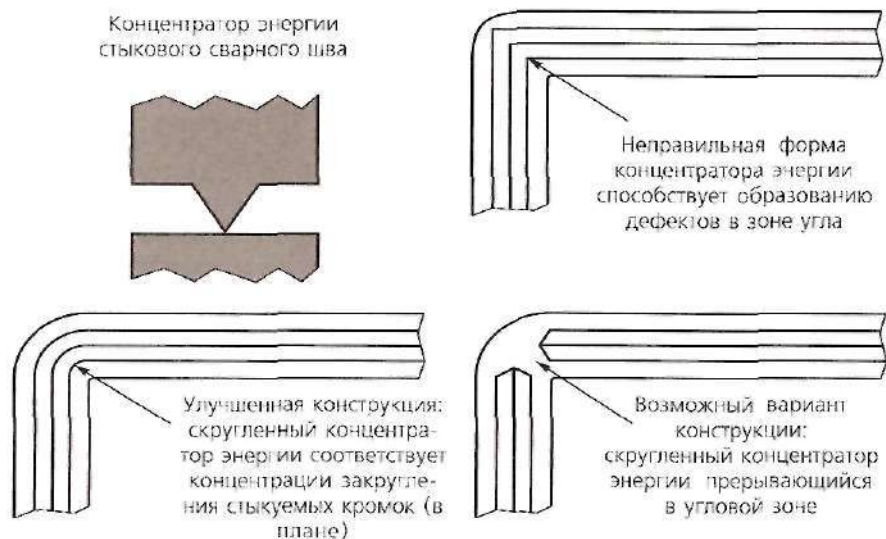


Рис. 6.103. Концентратор энергии может располагаться по всему периметру свариваемого изделия; когда от сварных швов герметичность не требуется, концентратор энергии может быть выполнен прерывистым в зоне угла

Сварка в ближнем и дальнем поле

Очень важно, чтобы инструмент был в плотном контакте с деталью, площадь этого контакта была бы достаточной, и инструмент находился над соединяемой зоной. Расстояние между инструментом и границей контакта соединяемых поверхностей существенно влияет на качество сварного шва (рис. 6.104). Соединения, которые находятся на расстоянии не более 6 мм до поверхности соприкосновения инструмента и детали,

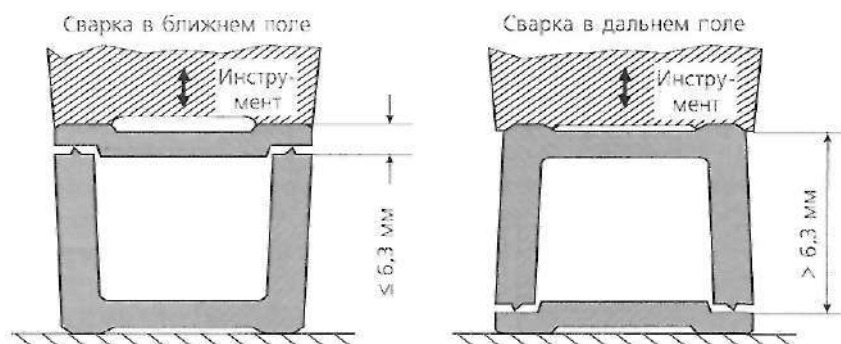


Рис. 6.104. Схематическое изображение близкого и удаленного расположения зон сварки

называют соединением, выполненным в ближнем поле, а те, у которых эта величина больше чем 6 мм, называют соединением, выполненным в дальнем поле. Свариваемость деталей усложняется по мере удаления соединяемых поверхностей от инструмента. Сварка в ближнем поле предпочтительна для большинства термопластов. Сварка в дальнем поле может быть использована для соединения стеклообразных и аморфных термопластов.

Совмещение деталей

Простые сварные стыковые соединения не имеют оформленных выступов для совмещения или центрирования деталей одна относительно другой. Фиксатор может применяться не только для одной, но для обеих свариваемых частей. Кроме того, фиксатор может быть использован для размещения нижней детали, а инструмент (волновод) сварочной установки для фиксации верхней детали [59] (рис. 6.105).

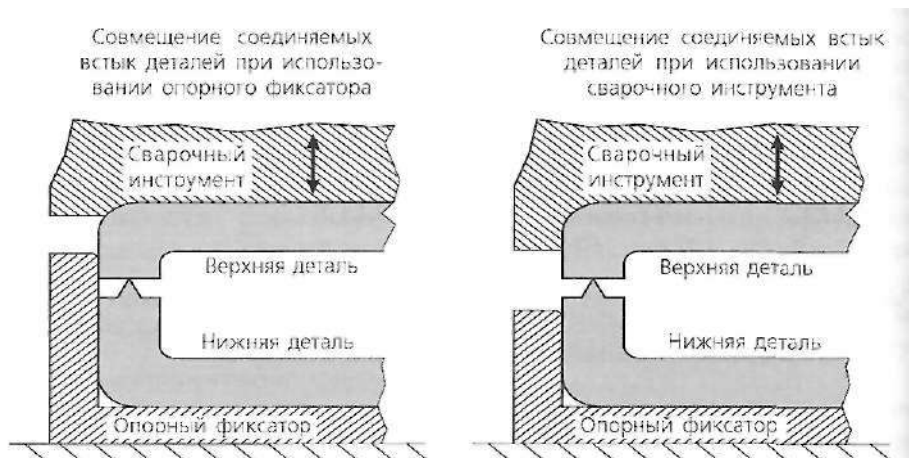


Рис. 6.105. Сварка с использованием опорного фиксатора может привести к образованию царапин на наружной поверхности изделия (слева); совмещение деталей с помощью только сварочного инструмента может привести к смещению сварного шва (справа)

Совмещение деталей осуществляется с помощью формуемых на поверхности литой под давлением детали штырей, штифтов (рис. 6.106) или уступов (рис. 6.107).

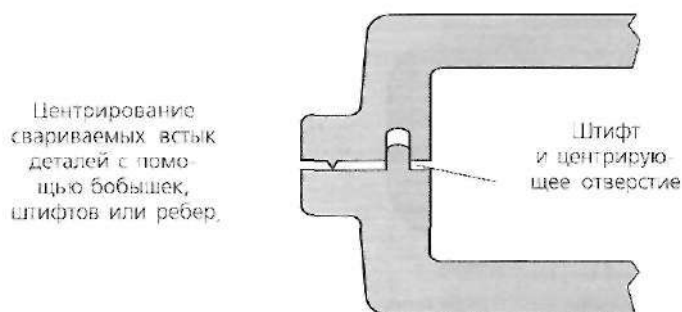


Рис. 6.106. Центрирование деталей может быть облегчена с использованием отлитых штифтов или других элементов конструкции

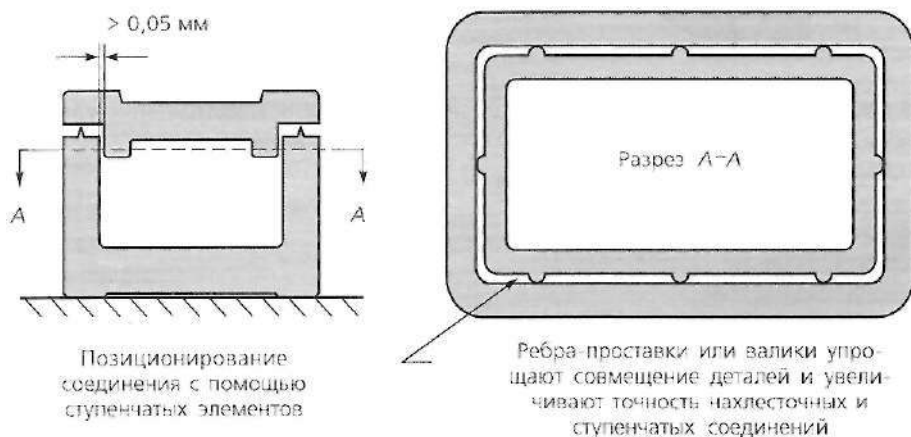


Рис. 6.107. Использование ступенчатых элементов и ребер-проставок улучшает точность расположения деталей

Ступенчатые соединения

Простое соединение встык можно легко видоизменить для получения более качественных соединений. Ступенчатое соединение (рис. 6.108 и 6.109) обеспечивает сопротивление растягивающим и сдвиговым нагрузкам в процессе эксплуатации.

Ступенчатое соединение, показанное на рис. 6.108, имеет наружный буртик, который маскирует любой технологический дефект и улучшает внешний вид изделия. Ребра-проставки, которые были описаны выше (рис. 6.107), используются для повышения точности совмещения деталей и минимизации зоны смещения поверхностей в зоне контакта.

Ступенчатая форма
соединяемых кромок
перед проведением
сварки

Ступенчатое
соединение
после сварки

Зазор для свободного
перемещения детали
вниз

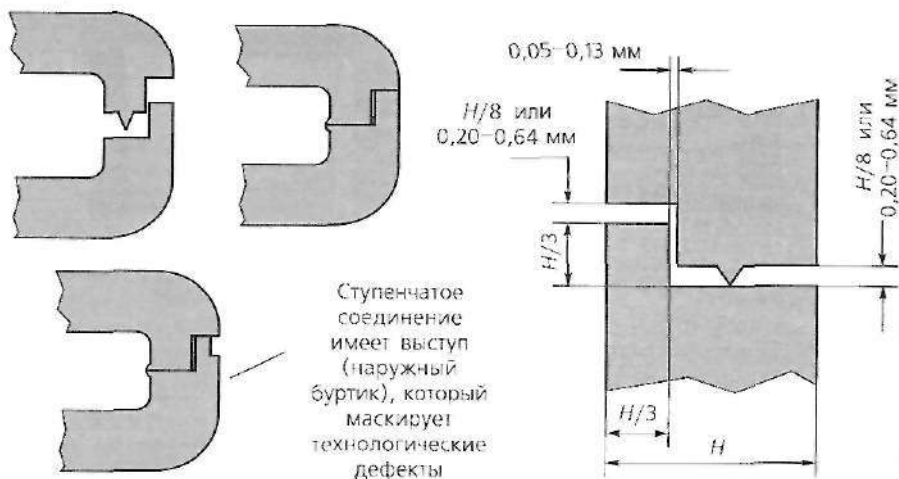


Рис. 6.108. Типичная конструкция ступенчатого соединения, осуществляемого ультразвуковой сваркой



Рис. 6.109. Поперечное сечение сварного ступенчатого соединения, полученного с помощью ультразвуковой сварки. Выступы улучшают центрирование деталей и маскируют наплыв материала

Соединения «шип в паз»

Соединения типа «шип в паз», аналогичные показанному на рис. 6.110, создают прочное соединение, устойчивое к сдвигу и растяжению.

В процессе сварки расплав образующийся в зоне воздействия концентратора энергии, заполняет нижнюю полость и нагнетается вверх через вертикальную щель. В результате этого увеличивается площадь контакта соединяемых поверхностей и повышается

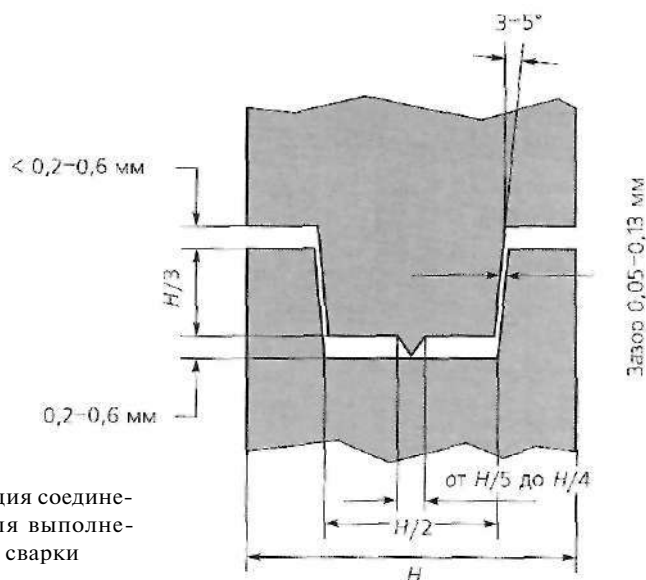


Рис. 6.110. Типичная конструкция соединения «шип в паз» для выполнения ультразвуковой сварки

прочность соединения. Толщина стенок деталей в зоне сварки должна быть увеличенной, чтобы обеспечить размещение элементов соединения. Ребра-проставки, аналогичные показаным на рис. 6.107, повышают точность совмещения деталей в изделии.

Соединения со сдвигом материала

Существует много различных конструкций таких соединений, рекомендуемых для трудно свариваемых полимерных материалов, а также когда требуется герметичность шва. Типовые разновидности соединений со сдвигом материала изображены на рис. 6.111. Они используются для деталей как цилиндрической, так и прямоугольной форм, позволяет добиться высокой прочности сварных швов.

Соединения со сдвигом материала хорошо подходят для частично кристаллических термопластов, поскольку дают возможность получить более прочное соединения, чем соединения, при выполнении которых используется концентратор энергии. Детали, поступающие на сборку, создают в зонах перекрытия натяг и приводят к локальному сдвигу материала, когда в процессе сварки детали впрессовываются друг в друга. Направляющая часть деталей помогает их выравниванию. Угол в верхней части зоны натяга срезан с одной стороны вниз от начальной точки контакта (рис. 6.111, сверху слева). Это способствует концентрации энергии, необходимой для плавления материала деталей. Обе контактирующие поверхности деталей в процессе сварки расплавляются равномерно, так как температура плавления материала поддерживается по всей области контакта [56]. Величина натяга составляет 0,13-0,51 мм на участке высотой 1,0-2,0 мм. Вертикальные стенки деталей должны быть прочно закреплены с помощью фиксирующих устройств. В идеале верхняя деталь должна быть как можно меньше. Однако соединения «шип в паз» со сдвигом материала с одной стороны могут быть использованы в изделиях с более глубокими пазами (рис. 6.111) [57].

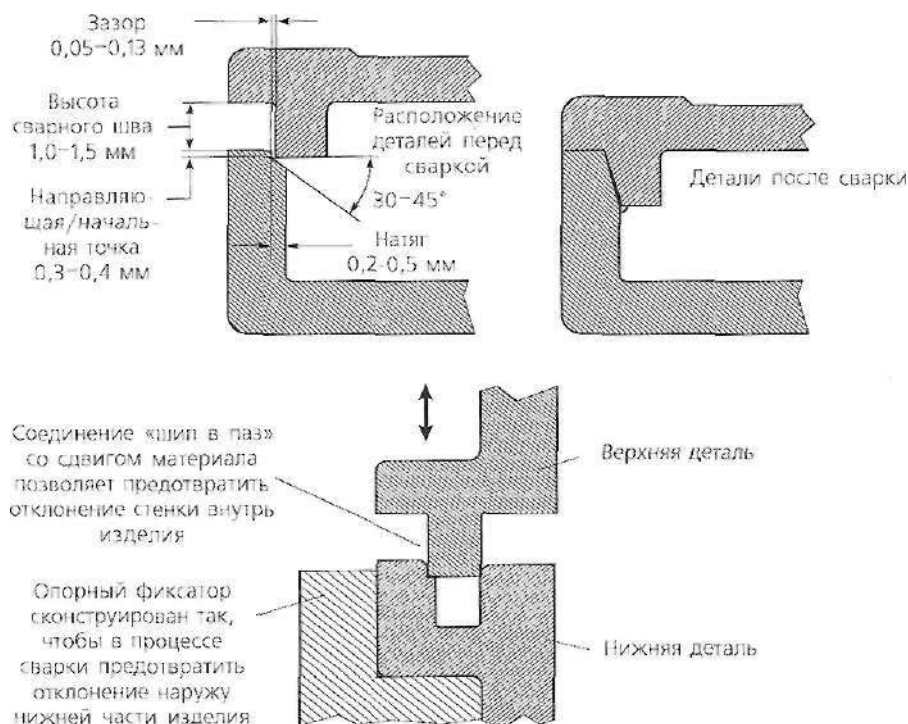


Рис. 6.111. Типичная конструкция соединения со сдвигом материала, выполняемого ультразвуковой сваркой (вверху). Типовая конструкция соединения со сдвигом материала в середине стенки (внизу)

Соединения «на ус»

Соединения «па ус» применяют тогда, когда требуется получить прочные и герметичные сварные швы у изделий из аморфных и частично кристаллических термопластов. У соединений «на ус» взаимное расположение свариваемых деталей устанавливается «автоматически». Эти соединения чаще всего используются в деталях малого размера, имеющих круглое или овальное сечение. Потребность в энергии для получения соединений «на ус» очень высока. Соединения «на ус» (рис. 6.112 и 6.113), имеют несколько конфигураций [56,58].

Соединяемые «на ус» детали имеют скосы под углом от 30 до 60°, которые должны совпадать у обеих деталей с точностью $\pm 1^\circ$. Натяг должен составлять 0,10-0,25 мм. Ловушки используются, если наплыв недопустим с функциональной или эстетической точки зрения [58] (рис. 6.113).

Сварка с дополнительным введением эластомерной прокладки

Надежные герметичные сварные швы могут быть получены с помощью эластомерных уплотнительных колец или прокладок [59]. В одну из соединяемых деталей, показанных на рис. 6.114, вкладывают кольцо из эластомера для повышения надежности

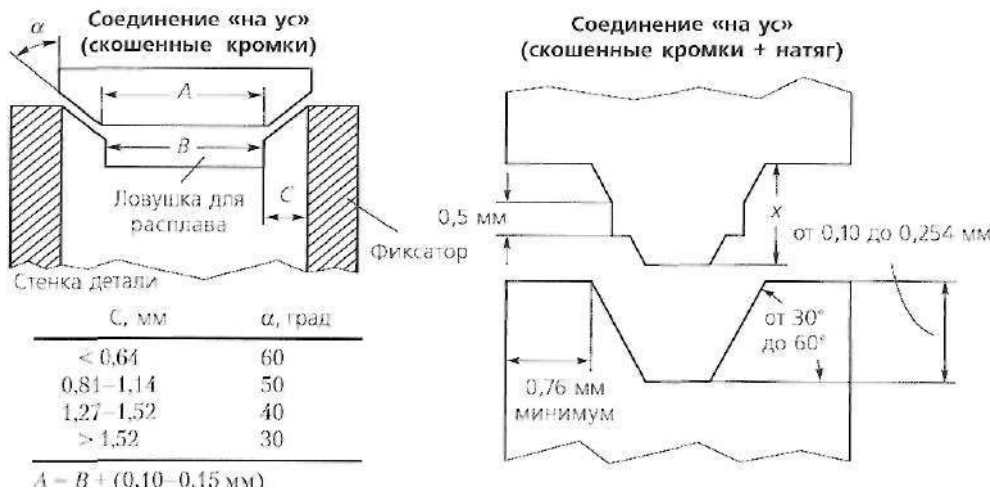


Рис. 6.112. Типичная конструкция соединения «па ус», изготавливаемого ультразвуковой сваркой

Рис. 6.113. Пример ультразвуковой сварки «на ус» с ловушками для избытка расплава [58]

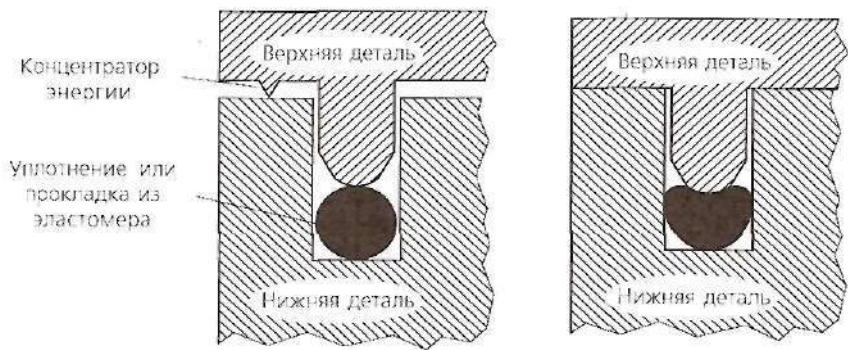
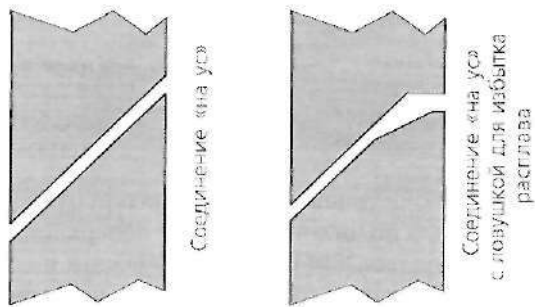


Рис. 6.114. Герметизирующие прокладки иногда необходимы для использования в изделиях, собранных с помощью ультразвуковой сварки. Эластомерные прокладки или уплотнители могут быть использованы для обеспечения повышенной надежности сварного соединения в критических ситуациях [59]

уплотнения шва, изготовленного с помощью ультразвуковой сварки или в случае, когда непрерывный сварной шов по всему периметру исполнить невозможно.

Приварка штифтов

Установка для ультразвуковой сварки может быть использована для получения точечных сварных швов типа «штифт/гнездо» (рис. 6.115). Такие соединения используются при сборке изделий из одного и того же материала, когда не требуется

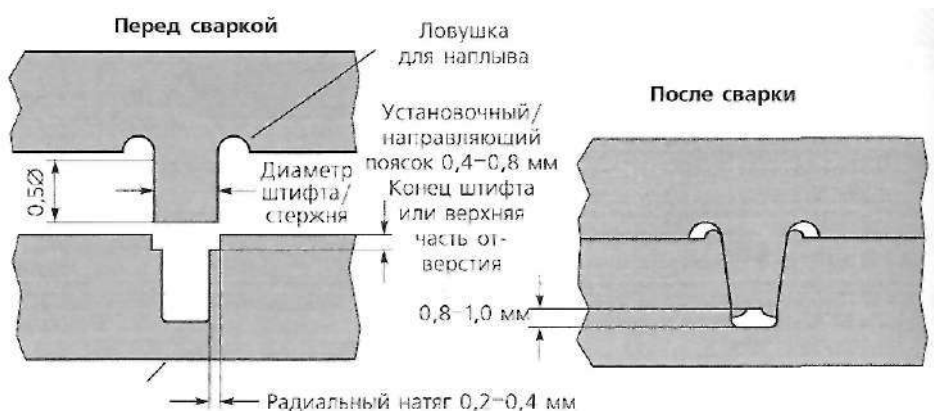


Рис. 6.115. Установка для ультразвуковой сварки может быть использована для изготовления соединений типа «штифт/гнездо» [43]

герметичности шва. Эти соединения относятся к сварным соединениям со сдвигом материала по цилиндрическим поверхностям. Как штифт, так и отверстие в детали используются для позиционирования и совмещения деталей. Ловушки для сбора избытка расплава также могут быть предусмотрены в деталях (рис. 6.115). Для достижения оптимальной прочности глубина введения штифта должна составлять около половины его диаметра [51, 56, 59].

Ультразвуковая клепка

К одному из вариантов сборки изделий с применением ультразвука относится ультразвуковая клепка. Этот метод образования соединения используется для скрепления детали из термопласта с другой деталью, изготовленной из материала, отличного от материала первой детали (рис. 6.116). Стержень (шпилька) из термопласта, отлитый совместно с деталью (нижней), проходит сквозь отверстие в верхней детали. После чего ультразвуковые колебания воздействуют на верхнюю часть стержня, которая расплавляется и заполняет объем в полости инструмента, таким образом фиксируя вторую верхнюю деталь.

Штифт или втулка должны иметь закругление или галтель у основания, чтобы предотвратить их растрескивание или плавление. Верхняя часть втулки должна быть сконструирована так, чтобы поверхность начального контакта с инструментом была минимальной. Это позволяет сконцентрировать в месте контакта энергию ультразвука. Верхняя часть втулки может быть плоской или конической; последняя предпочтительнее для частично кристаллических или наполненных термопластов.

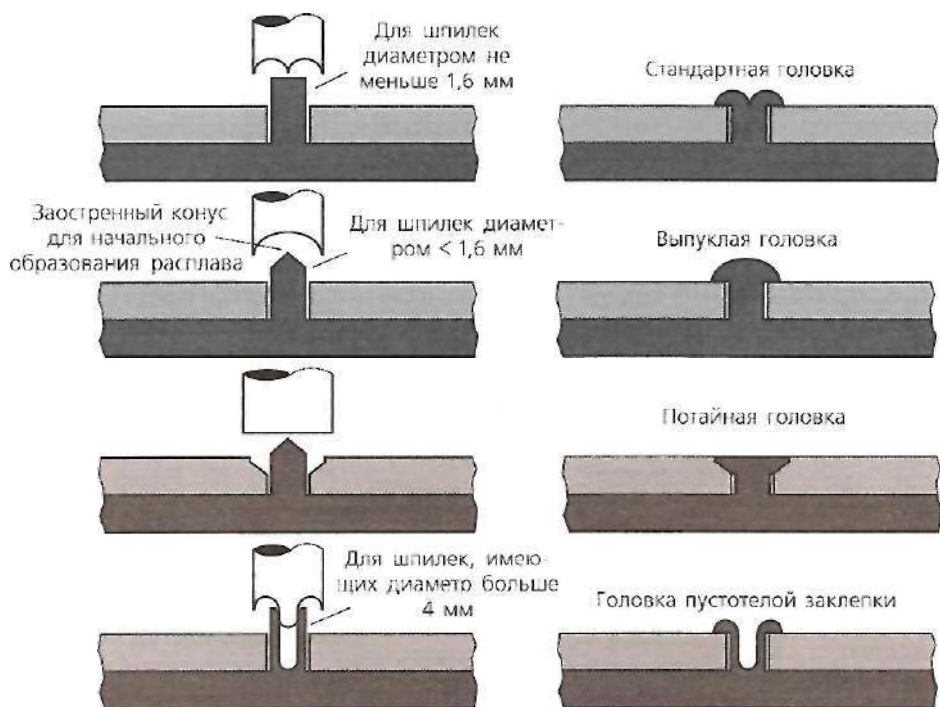


Рис. 6.116. Установка для ультразвуковой сварки может быть использована для изготовления заклепок различной конфигурации [51]

Цельность формы головки, изготовленной с помощью ультразвука, стержня и полости зависит от соотношения объемов стержня и полости инструмента. Правильно выбранная конструкция верхней части стержня обеспечивает оптимальную прочность соединения и хороший внешний вид головки, минимальный наплыв. Могут быть изготовлены головки различной формы, включая те, которые показаны на рис. 6.116 [51, 56].

Стандартная головка

Эта универсальная головка рекомендуется для стержней с плоским торцом как из жестких, так и из эластичных не оказывающих абразивного воздействия термопластов, имеющих диаметр от 1,6 до 4 мм.

Выпуклая головка

Выпуклая головка рекомендуется для заклепок с диаметром менее 1,6 мм. Стержень должен иметь наконечник конической формы, чтобы уменьшить потери энергии. Выпуклая головка рекомендуется для пластмасс, оказывающих абразивное действие.

Потайная головка

Такие головки применяют в изделиях, где требуется плоская или ровная поверхность, и если толщина присоединяемой детали позволяет это, рекомендуется использовать стержни с конической верхней частью.

Головка пустотелой заклепки

Стержни, имеющие диаметр более 4 мм, могут быть пустотелыми или полупустотелыми. Применение полых стержней позволяет уменьшить вероятность образования утяжин и усадочных пустот у основания стержня. Пустотелые стержни легко охладить благодаря их относительно тонким стенкам.

Замковое соединение

Установка для ультразвуковой сварки может быть использована для изготовления замкового соединения, когда нельзя сверлить сквозные отверстия в сопрягаемой детали (рис. 6.117). Для этой цели используется отлитый совместно с деталью стержень и глухое поднутрение на поверхности сопрягаемой детали. В процессе воздействия ультразвука стержень будет размягчаться, и расплав заполнит полость с поднутрением, где охладится, создав замковое соединение [62].

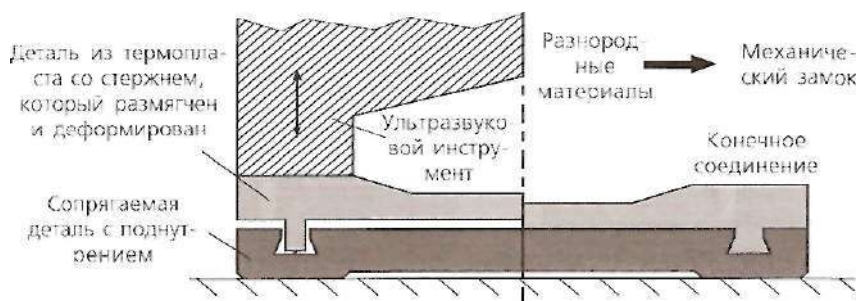


Рис. 6.117. Пример механического замка, сформированного с помощью ультразвука [62]

Влияние свойств материала на свариваемость ультразвуком

Ультразвуковая сварка пригодна для соединения деталей из большинства термопластов. Однако, выбирая ультразвуковую сварку, следует учитывать характеристики материала, включая морфологию, вязкость в расплавленном состоянии, вязкоупругое поведение, гигроскопичность и присутствие добавок.

Аморфные термопласты

Аморфные термопласты, особенно находящиеся в стеклообразном состоянии при комнатной температуре, отлично подходят для ультразвуковой сварки [51, 56, 63]. Стеклообразные аморфные термопласты из-за их неупорядоченной молекулярной структуры являются отличными ретрансляторами энергии вибраций. Свариваемость аморфного термопласта зависит от температуры стеклования T и от жесткости. Стеклообразные аморфные термопласты постепенно, по мере увеличения температуры, переходят из стеклоподобного состояния в размягченное и затем окончательно расплавляются. По мере охлаждения наблюдается обратный процесс, который позволяет пластмассе течь и диффундировать без преждевременного затвердевания. Плавные термические переходы наделяют эти материалы гибкими конструктивными и технологическими свойствами. Их можно обрабатывать с низкими энергетическими затратами. Хорошие трансмиссионные свойства стеклообразных материалов

позволяют сваривать их как в ближнем, так и дальнем полях [64,65]. Свариваемость ультразвуком аморфных термопластов ухудшается по мере возрастания их гибкости. Например, для сварки ударопрочного ПС требуется большая амплитуда колебаний, чем при сварке ПС общего назначения [51]. Эластичные термопласты вообще нельзя сваривать ультразвуком из-за избыточного демпфирования колебаний [54]. Сварка ультразвуком разнородных полимерных материалов возможна, если они имеют сходные химическую структуру, текучесть и Γ_{∞} . Значения $\Gamma^{\wedge}$ двух свариваемых материалов не должны отличаться более, чем на 14–22 °С [54, 55,61].

Таблица 6.1. Общие сведения о совместной свариваемости различных термопластов при ультразвуковой сварке* [63]

Термопласт	Условное обозначение	Полная совместимость	Частичная совместимость**
АБС-пластик	<i>A</i>	<i>A, B, D</i>	<i>T</i>
АБС/ПК	<i>B</i>	<i>A, B, K</i>	<i>D</i>
Полиацеталь	<i>C</i>	<i>C</i>	—
Акриловый полимер	<i>D</i>	<i>A, D</i>	<i>B, E, J, K, T</i>
Акриловый сополимер	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>A, D, Q, T</i>
Производные целлюлозы	<i>F</i>	<i>F</i>	—
Фторполимеры	<i>G</i>	<i>G</i>	—
ПА	<i>H</i>	<i>H</i>	—
Полифенилен оксид	<i>I</i>	<i>I, Q</i>	<i>D, K, T</i>
Полиамидоимид	<i>J</i>	—	—
ПК	<i>K</i>	<i>B, K</i>	<i>D, I, R</i>
Сложный полиэфир	<i>L</i>	<i>L</i>	—
ПЭ	<i>M</i>	<i>M</i>	—
Полиметилметакрилат	<i>N</i>	<i>N</i>	—
Полифенил сульфид	<i>O</i>	<i>O</i>	—
ПП	<i>P</i>	<i>P</i>	—
ПС	<i>Q</i>	<i>I, Q</i>	<i>E, T</i>
Полисульфон	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>K</i>
ПВХ	<i>S</i>	<i>S</i>	—
Сополимер САН	<i>T</i>	<i>T</i>	<i>A, D, E, I, Q</i>

Изменения в составе пластмасс могут приводить к небольшим отличиям в результатах.

** В некоторых случаях.

С помощью ультразвука можно сваривать детали из вспененного термопласта, но сначала нужно сделать экспериментальную проверку. Свариваемость деталей из вспененных материалов ухудшается с уменьшением плотности пенистой структуры. В зоне сварного шва может происходить дополнительное вспенивание из-за непрореагировавших пенообразующих добавок [56].

Частично кристаллические термопласты

Частично кристаллические термопласты сложнее сваривать с помощью ультразвука, чем жесткие или полужесткие аморфные термопласты. Между тем детали из частично кристаллических термопластов, могут быть сварены с деталями из идентичного материала при соблюдении требований технологического процесса и правильного конструирования мест соединения [58]. Частично кристаллизующиеся полимеры больше демпфируют ультразвук, чем стеклообразные аморфные полимеры.

При сварке частично кристаллических термопластов необходимо: 1) повышение энергии, подаваемой от сварочной установки (то есть увеличение амплитуды колебаний) и 2) сокращение расстояния между зоной контакта инструмента с деталью и соединяемой поверхностью [63]. Для сварки частично кристаллических термопластов почти исключительно используется технология ближнего ультразвукового поля. Использование дальнего поля нежелательно, поскольку оно требует большего количества энергии и может привести к ускоренному плавлению на границе инструмент/деталь, нежели в месте соединения [66]. Детали, соединяемые с помощью сварки, должны быть надежно закреплены. Отсутствие дополнительных опор у консольных участков может стать причиной растрескивания или даже разрушения деталей в процессе сварки из-за высокой амплитуды колебаний. Ультразвуковые колебания, обеспечивающие сварку, рассеиваются на отверстиях, выступах и изгибах, которые нарушают прямолинейное распространение ультразвука [63]. Амплитуда колебаний инструмента при сварке рассматриваемых термопластов должна быть в пределах 0,05-0,15 мм. Чтобы обеспечить такие высокие амплитуды колебаний при сварке, требуется использовать титановые инструменты. Подобно аморфным термопластам частично кристаллические материалы требуют подведения большей энергии для сварки с повышением их температуры плавления T_m и уменьшение модуля упругости и жесткости. Материалы типа ПТФЭ с очень высокой T_m , низким коэффициентом трения и низкой текучестью с трудом поддаются сварке ультразвуком.

В большинстве источников указывается, что концентраторы энергии не годятся при сварке частично кристаллических термопластов, когда требуется высокая прочность и герметичность соединения. Это объясняется узким диапазоном температуры плавления и затвердевания материала, не позволяющего получить прочный сварной шов [58,66]. Расплав полимера затвердевает раньше, чем разовьется диффузия в зоне контакта образующейся (под действием концентратора энергии) пленки расплава и примыкающих к ней поверхностей. В особых случаях могут использоваться концентраторы энергии больших размеров, обеспечивающие получение большей массы расплава [59]. Соединения со сдвигом материала и соединения «на ус» вполне пригодны для частично кристаллических термопластов. Они имеют высокую прочность и герметичность.

Сварка гигроскопичных пластмасс

Детали перед процессом литья под давлением теряют воду (из-за предварительной сушки перед процессом литья), но потом набирают ее со временем. Скорость абсорбции воды определяется типом материала, начальным содержанием влаги и условиями окружающей среды. Такие гигроскопичные полимеры, как ПА 66 имеют настолько высокое содержание влаги на поверхности, что это оказывает влияние на

качество сварки. Влага приводит к образованию в сварном шве пенистой структуры, пор, микропор, демпфированию колебаний и даже к гидролитической деструкции некоторых термопластов, полученных методом поликонденсации. Для уменьшения поверхностной влажности пластмасс рекомендуется [56,58,59,63]:

- сваривать детали сразу же после литья под давлением (пока они находятся в относительно сухом состоянии);
- сушить детали перед сваркой;
- хранить детали перед сваркой в эксикаторах.

Вместо эксикаторов можно использовать специальные полиэтиленовые пакеты с застежками и добавлением в них осушителя. Простейшим способом решения этой проблемы является сварка деталей сразу же после их литья, пока они еще не набрали влагу и находятся в подогретом состоянии [58]. Этот способ подходит для аморфных, но совершенно непригоден для частично кристаллических термопластов. Их нужно выдержать в течение минимум 24 ч в герметичных емкостях, чтобы произошла усадка и кристаллизация [59].

Влияние добавок на свариваемость ультразвуком

Почти все термопласты содержат добавки. В некоторых случаях они мало или совсем не влияют, а в других случаях могут серьезно влиять на свариваемость деталей. Количественных данных о влиянии добавок в полимерах на их свариваемость очень мало, поэтому ниже приводится качественная оценка данного влияния.

Наполнители и армирующие добавки

Карбонат кальция, тальк, стекло, углерод и любые другие органические и неорганические добавки, увеличивающие жесткость композиционного материала, могут позитивно повлиять на свариваемость полимерных материалов ультразвуком. Чем ниже концентрация наполнителей, тем прочнее получаются сварные швы. При концентрации наполнителя выше 35 % невозможно добиться герметичности сварных швов [63]. Концентрация наполнителя выше 40% может вообще сделать материал непригодным для сварки. Исключением является ПП, который даже при 40 %-ном содержанием талька характеризуется хорошими показателями качества сварных швов [56]. При концентрации абразивных или армирующих наполнителей выше 10 % используют инструменты с наконечниками (на рабочей поверхности) из карбида титана или закаленной стали. Следует заметить, что определенные наполнители являются гигроскопичными по своей природе и создают дополнительные проблемы, связанные с избыточным содержанием влаги. Применение более высоких частот и более низких амплитуд колебаний позволяет улучшить свариваемость высоконаполненных термопластов [57].

Антиадгезионные смазки для литевых форм

Если детали будут свариваться с помощью ультразвука, лучше вообще такие смазки не использовать. Смазка остается на поверхности детали и затрудняет выделение тепла при трении. Поэтому смазка должна быть удалена с соединяемых поверхностей перед сваркой. В особых случаях, когда смазку вынуждены применять для облегчения выталкивания деталей, рекомендуется использовать марки смазок, применяемые для покрытий или печати [59,63].

Смазки-добавки

Внешние и внутренние смазки затрудняют сварку за счет уменьшения молекулярного трения. Наружные смазки, кроме того, загрязняют поверхность детали. Влияние на свариваемость внутренней смазки минимально, если ее содержание незначительно или она хорошо диспергирована. Рекомендуется провести эксперименты, чтобы достичь оптимальных результатов [63].

Антипирены

Влияние антипиреновых добавок на свариваемость зависит от типа добавок, их концентрации и степени распределения в объеме. Добавка антипиренов требует при сварке повышенной амплитуды колебаний.

Пластификаторы/повышающие ударную прочность модификаторы

Любые добавки, повышающие вязкость разрушения термопласта, увеличивают поглощающую способность материала и требуют подведения повышенной энергии для проведения сварки [63]. В экстренном случае детали их высокопластифицированных эластичных термопластов вообще не удастся сварить ультразвуком [56]. Иногда миграция пластификатора может создать проблемы в связи с загрязнением поверхностей.

Пигменты

Пигменты в малых количествах мало влияют на свариваемость материалов. Сухие красители действуют так же, как и наполнители, но красители на масляной основе могут создавать трудности, если они выходят на поверхность [63].

Шлифовка

Шлифовка поверхностей не решает проблем, пока уровень загрязнения материала и степень деструкции материала не слишком высоки [63].

6.5.3. Вибрационная сварка трением

При этой сварке для нагрева используется трение деталей под давлением. Теплота выделяется как за счет трения, так и сдвиговых деформаций на контактной поверхности. Как только пленка расплава распространится на достаточную глубину в зоне сварки, сварной шов охлаждается и затвердевает под давлением [62]. Обычно под термином «вибрационная сварка» понимают процесс прямолинейной сварки трением. Кроме этого существует угловая вибрационная сварка [67]. Вибрационная сварка может быть использована для соединения почти всех термопластов и пригодна для деталей, сварные швы которых допускают неограниченное перемещение в противоположных направлениях. С помощью вибрационной сварки изготавливаются изделия средних и больших размеров, например, бамперов транспортных средств [68,69].

Материалы

С помощью вибрационной сварки можно соединять детали из большинства термопластов. Даже такие материалы, как ПЭИ (полиэфиримид), РФС (полифенилсульфид), ПЭЭК (полиэфирэфиркетон) и термопласты с высокой степенью кристалличности, которые трудно соединить, используя другие сварочные технологии, поддаются вибрационной сварке [43, 70]. Необходимые параметры материала для вибрационной сварки аналогичны тем, которые важны для ультразвуковой сварки

[54,69,71]. Аморфные материалы свариваются легче, чем частично кристаллические. Из-за несовместимости нельзя сваривать разнородные материалы. Метод непригоден для очень гибких материалов, таких как термопластичные эластомеры. Вибрационная сварка гигроскопичных материалов требует дополнительного учета реального содержания влаги в пластмассе, но здесь требования минимального содержания влаги не столь жесткие, как при ультразвуковой сварке или сварке нагретым инструментом [70]. Процесс вибрационной сварки менее чувствителен к загрязнению поверхности, по сравнению с другими процессами сварки. Природа процесса такова, что эти загрязнения во время сварки удаляются [62].

Угловая вибрационная сварка

Угловая вибрационная сварка (криволинейная сварка вибротрением) используется для соединения деталей, где зона сварки находится приблизительно на одинаковом расстоянии от оси вращения. Соотношение длины к ширине в этом случае должно быть меньше 1,5, чтобы избежать разницы скоростей вращения свариваемых поверхностей.

Прямолинейная вибрационная сварка трением

Прямолинейная вибрационная сварка может использоваться для соединения любых деталей, допускающих линейную вибрацию в одном направлении. Возвратно-поступательное перемещение на сварочной установке обеспечивается с помощью электромагнитов или гидравлического механизма. Механизм возвратно-поступательного перемещения заставляет вибрировать плиту или одну из деталей, в то время как другая остается неподвижной. Вибрирующая плита поддерживается с помощью набора плоских пружин. Давление сварки перпендикулярно направлению горизонтального перемещения, пружины возвращают вибрирующий элемент (и деталь) в исходное состояние после отключения механизма линейного перемещения [69]. Частота колебаний при вибрационной сварке находится в пределах от 120 до 300 Гц. Линейное смещение детали в этом процессе составляет от 0,8 до 5,0 мм. Более высокие частоты колебаний вибрационной сварки могут быть использованы с более низкими амплитудами, и поэтому более пригодны для сварки деталей малых размеров, амплитуда перемещений которых ограничена, а также в тех случаях, когда необходимо ограничить образование наплывов [43]. Использование более высоких частот при сварке способствует улучшению качества швов у материалов с очень низким коэффициентом трения [70]. Продолжительность сварки находится в пределах от 1 до 10 с (обычные значения 2-4 с), а общая продолжительность цикла сварки от 6 до 15 с [54,62,64]. При вибрационной сварке не удастся использовать центрирующие элементы, отлитые вместе с деталью. Окончательное совмещение деталей достигается в конце цикла вибрации, когда вибрирующий элемент возвращается в исходное состояние. Важно чтобы механизм фиксации детали, имеющей форму фитинга и обычно изготавливаемый из алюминия, был способен удерживать и центрировать деталь без перемещения.

Соединения

Процесс вибрационной сварки идеально подходит для деталей, имеющих плоскую или с небольшой кривизной соединяемую поверхность [54]. Одновременная сварка в нескольких плоскостях возможна при условии, что эти плоскости не мешают

линейному перемещению. Соединение деталей вибрационной сваркой преимущественно осуществляется встык (рис. 6.118) [62]. Конструкция места соединения деталей, выполняемого вибрационной сваркой, должна обеспечивать их относительное перемещение и фиксацию положения их стенок. Применение соединения встык по фланцам (обычно их ширина в два раза превышает толщину стенки детали) увеличивает жесткость стенки, облегчает фиксацию детали, гарантирует равномерное распределение давления, создает большую площадь контакта и этим повышает прочность сварного шва [69]. Вибрационная сварка может привести к образованию большого количества наплыва материала. Чтобы замаскировать наплыв, могут быть оформлены специальные ловушки (рис. 6.118).

Внутренние ребра и перегородки могут быть соединены сваркой одновременно с периметром изделия, если они по высоте достигают плоскости основного сварного шва. Внутренние ребра и стенки, расположенные перпендикулярно направлению вибрации, должны быть усилены косынками, так как оформление фланцев у них в процессе литья под давлением невозможно из-за проблем с извлечением детали из формы. Внутренние стенки, параллельные направлению вибрации, должны перемещаться в канавке сопрягаемой детали, чтобы предотвратить изгиб [43].

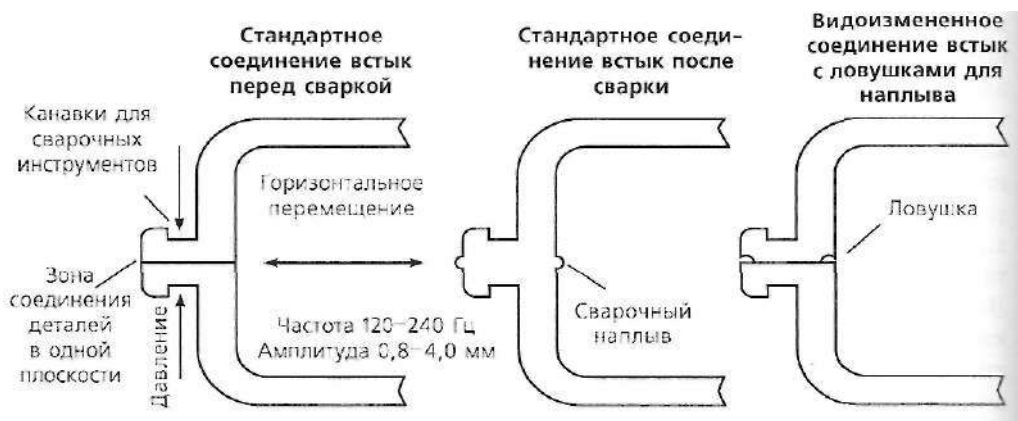


Рис. 6.118. Типичная конструкция соединения деталей вибрационной сваркой. Соединение встык и видоизмененное соединения встык с ловушками для наплыва материала

Механизм процесса вибрационной сварки аналогичен механизму ротационной сварки и включает несколько последовательных этапов [54,62,71,72]. В начале происходит выделение тепла в результате трения поверхностей двух деталей. Поверхности размягчаются, и происходит вязкостная диссипация. Образующийся расплав пластмассы перемещается в горизонтальном направлении (что приводит к образованию наплыва, увеличивая глубину шва линейно продолжительности установившейся стадии). Когда вибрация прекращается, остаточная теплота и действие давления способствуют продолжению пенетрации и осадке материала, пока не произойдет вновь его затверждение. Прочность соединения, достигаемая с помощью вибрационной сварки, не уступает прочности основного материала, если достигается нужная глубина сварного шва [54].

6.5.4. Ротационная сварка

Ротационная сварка относится к сварке трением. Она используется для соединения деталей, имеющих круговую симметрию в плоскости соединения. Теплота, необходимая для плавления или размягчения, создается при помощи взаимного трения поверхностей двух соединяемых деталей. Одна деталь, обычно верхняя, вращается вокруг оси, перпендикулярной к общей плоскости соединяемых поверхностей, а нижняя деталь прочно фиксируется в стационарном держателе или тисках (рис. 6.119). Сварной шов формируется при одновременном приложении давления в направлении оси вращения. Затем относительное перемещение прекращается, расплавленный термопласт в зоне сварного шва охлаждается и затвердевает под давлением [54, 62, 73–75]. Ротационная сварка — наиболее эффективный процесс соединения деталей с круглым поперечным сечением. Таким образом свариваются цилиндрические детали диаметром до 0,6 м и с соединяемой поверхностью до 58 см² [54, 76]. Такие же детали ротационной сваркой соединяются с деталями, не имеющими сечения цилиндрической формы. Сварочное оборудование представляет собой модифицированный сверлильный станок и обычно состоит из мотора, вращающейся головки, маховика и зажимного устройства [54]. Оборудование для ротационной сварки трением работает следующим образом [73]:

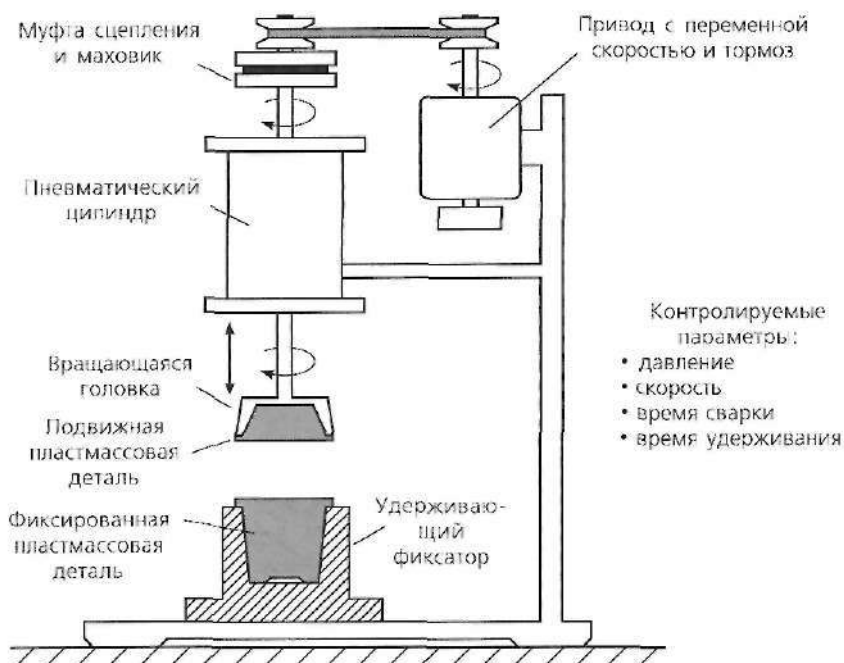


Рис. 6.119. Принципиальная схема ротационной сварки, применяемой для соединения деталей из термопластов цилиндрической формы

При непрерывном методе частота вращения подвижной детали изменяется непосредственно системой привода. Время вращения контролируется таймером, который отключает привод или включает динамический тормоз. В этом методе зафиксированная деталь освобождается после завершения фазы плавления материала.

При инерционной сварке маховик или вращающаяся масса с помощью электродвигателя ускоряется до заданной частоты вращения. Двигатель отключается в момент начала сварки, а кинетическая энергия свободно вращающейся инерционной оснастки превращается в тепловую энергию, за счет которой осуществляется процесс сварки. Стоимость оборудования для выполнения инерционной сварки более низкая. При использовании метода, когда вращение осуществляется непрерывно, удается регулировать частоту вращения.

Для вращения головки и маховика чаще всего используется пневмопривод или электродвигатель. Подпружиненные нажимные пластины или пневматические цилиндры создают сварочное давление.

Соединения, осуществляемые ротационной сваркой, конструируются так, чтобы обеспечить самолокализацию зоны нагрева и достаточную площадь свариваемых поверхностей и исключить значительное различие линейных скоростей по сечению деталей. При ротационной сварке трением чаще всего используются соединения типа «шип в паз», «на ус» или со срезанием материала (рис. 6.120) [54]. Наплыв удаляется после сварки с помощью вращающегося резца, стационарного долота, либо вращающейся проволочной щетки. Кроме того, наплыв может быть удален с помощью обычной или выполняемой в криогенной среде во вращающемся барабане обработки [74]. Косынки на детали в направлении, перпендикулярном ободу, обеспечивают лучшее схватывание с кулачками привода и таким образом способствуют передаче крутящего момента (рис. 6.121).

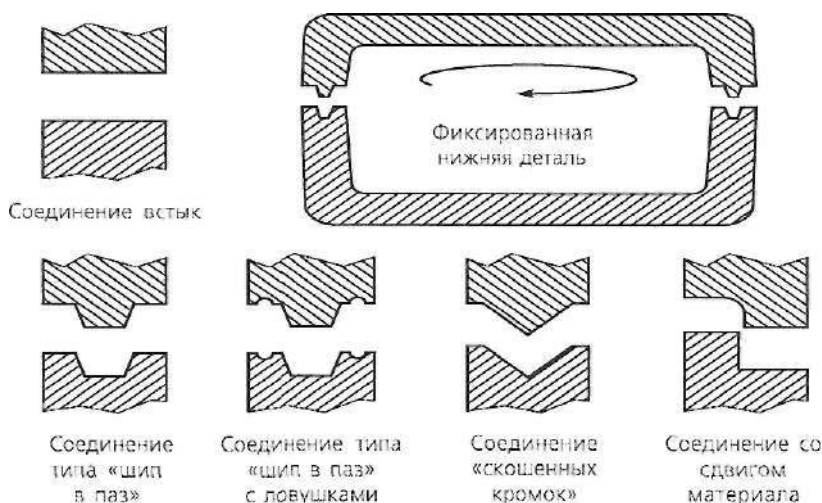


Рис. 6.120. Конфигурации типов соединений изделий из термопластов, которые используются при ротационной сварке

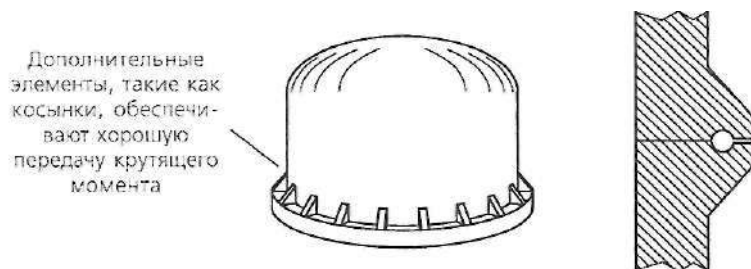


Рис. 6.121. Косынки могут быть введены в конструкцию литой под давлением детали в целях облегчения ротационной сварки за счет улучшения передачи крутящего момента

В процессе ротационной сварки трением большое значение имеют относительная тангенциальная скорость, давление осадки и длительность сварки. Как и вибрационная сварка, ротационная сварка трением может быть представлена в виде набора последовательных фаз (рис. 6.122) [73]. Как только вращающаяся деталь достигла необходимой частоты вращения, две соединяемые поверхности приводятся в контакт под давлением. Таким образом, стартует процесс сварки. В ходе первой фазы сварки устраняются неровности на поверхности до тех пор, пока не будет достигнут полный контакт поверхностей. В это время пластмасса еще твердая, но температура растет, и когда она достигает определенной величины, происходит размягчение. В этот момент механизм взаимодействия сопрягаемых плоскостей меняется — внешнее трение превращается во внутреннюю вязкостную диссипацию за счет сдвига. Рост температуры во время второй фазы процесса плавления происходит быстро — вследствие экстремально высокой скорости сдвига в тонком слое контактирующих участков деталей. Это приводит к увеличению толщины слоя расплава. В конечном счете,

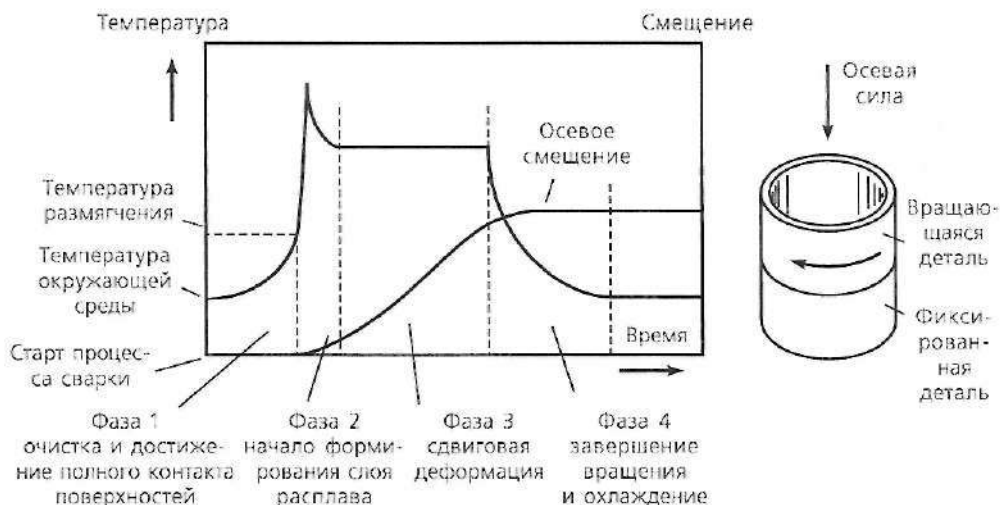


Рис. 6.122. Типичная диаграмма процесса ротационной сварки трением

достигается стационарная третья фаза, в течение которой фазы генерирование теплоты балансируют с образованием буртика напыла в результате горизонтального течения расплава под влиянием осевого давления. Во время последней литьевой фазы сварки вращательное движение резко или плавно прекращается прежде чем шов затвердеет.

Прочность соединения, полученного таким методом, определяется прочностью материала, конструкцией соединения и параметрами процесса. Прочные герметичные сварные швы могут быть получены у изделий из большинства термопластов. Ротационная сварка трением особенно эффективна при образовании соединения материалов, которые обладают низкой теплопроводностью, например, полиамидов или полиолефинов [43]. Продолжительность сварки короткая, обычно менее 1,0 с, плюс одна секунда, которая необходима для охлаждения. Частота вращения изменяется в диапазоне от 1000 об/мин для деталей большого размера до 18 000 об/мин для деталей меньшего размера [75]. Линейная скорость на свариваемых поверхностях находится в пределах от 3 до 15 м/с. Давление сварки находится в диапазоне от 20 до 50 бар. Когда важным является обеспечение заданного углового смещения деталей, может быть применена орбитальная сварка трением (сварка вибротрением) [54].

6.5.5. Электромагнитная (индукционная) сварка

Электромагнитную сварку (ее еще называют индукционной) представляет собой метод образования соединения деталей из термопластов, при котором температура плавления в области сварного шва достигается с помощью индукционного нагрева. Этот гибкий и эффективный сварочный процесс может быть использован для соединения большинства термопластов. Во время индукционной сварки магнитоактивный пластмассовый имплантант нагревается в высокочастотном электромагнитном поле [43, 54, 62, 77-83]. Оснащение для электромагнитной сварки состоит из генератора, охлаждаемой водой катушки, фиксаторов для выравнивания деталей, таблетки из магнитоактивного материала или электромагнитного присадочного материала. Генератор вырабатывает ток высокой частоты (обычно в диапазоне от 2 до 8 МГц), проходящий в рабочей катушке, внутри которой размещены фиксирующие и направляющие элементы для неподвижного и подвижного держателей.

Витки катушки расположены очень близко к области соединения деталей, которые находятся в фиксаторах, изготовленных из материалов, не абсорбирующих и не искажающих радиочастотное поле [54]. Перед сваркой электромагнитный присадочный материал в форме таблетки или прокладки укладывается в канавку одной из деталей (рис. 6.123).

Присадочным материалом обычно является полимерный материал с магнитоактивным наполнителем [82, 83]. Этот присадочный материал содержит мелкие диспергированные частицы размером порядка нескольких микрон из железа, оксида железа, коррозионностойкой стали или другого ферромагнитного материала, поглощающего электромагнитную энергию. Количество электромагнитного порошка обычно бывает меньше 15 % от объема [77]. Уложенная в канавку прокладка подвергается индукционному нагреву, который возникает за счет гистерезиса и вихревых токов. Когда свариваются детали, изготовленные из разнородных пластмасс, «матрица»

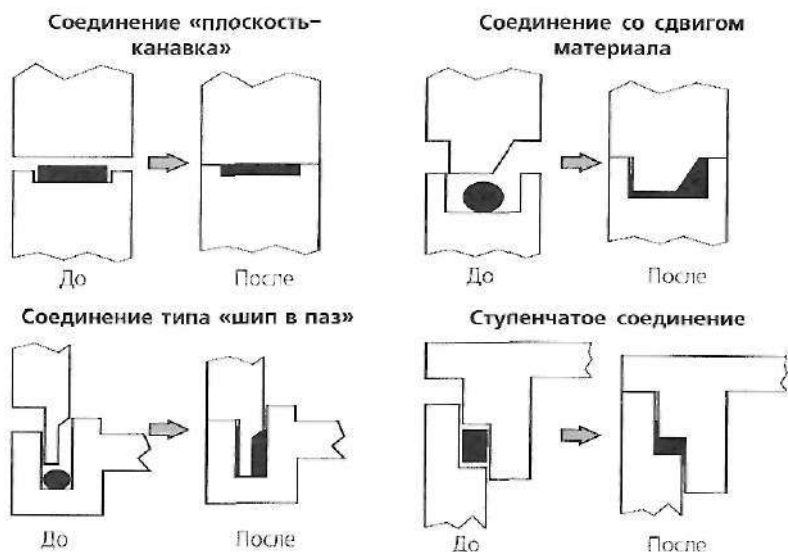


Рис. 6.123- Типичные конфигурации соединений деталей из термопластов, выполняемых электромагнитной (индукционной) сваркой

(т. е. прокладка) с ферромагнитным наполнителем может быть либо смесью из этих двух материалов, либо третьей пластмассой, совместимой с ними [77]. В качестве основы присадочного материала можно использовать клеи, наполненные металлом. Они обычно используются для соединения деталей из отвержденных, неразмягчающихся материалов, например, реактопластов [79].

Во время электромагнитной сварки ток, проходящий по рабочей катушке, создает электромагнитное поле в зоне соединения и нагревает материалы, обладающие способностью поглощать электромагнитное излучение. При этом соединяемые детали должны быть сделаны из материала, прозрачного к магнитному полю. Теплота передается из присадочного материала к соприкасающимся с ним деталям, поскольку во время сварки прикладывается давление. Пластмасса деталей размягчается и после завершения индукционной сварки служит теплоотводом, способствуя охлаждению и затвердеванию материала. Присадочный материал, наполненный ферромагнитными добавками, подается в зону сварки в виде экструдированной ленты, прутка или другого профиля или отлитой прокладки. Электромагнитная сварка деталей на основе гигроскопичных термопластов требует их предварительной сушки. В качестве материала, поглощающего электромагнитное излучение, можно использовать проволочную сетку или закладные металлические вставки [43,54].

Конструкции соединений, изготавливаемых индукционной сваркой, отличаются от тех, которые используются в других процессах сварки (см. рис. 6.123). Наиболее прочные швы получают, когда прикладываемое давление приводит к возникновению сдвиговых усилий в сварном соединении. Индукционной сваркой чаще всего изготавливают ступенчатые соединения и соединения типа «шип в паз». Соединения должны быть сконструированы таким образом, чтобы размягченный материал распределился

внутри контактной зоны [77]. Индукционная сварка, обладая целым рядом достоинств, предоставляет широкие возможности для конструкторов изделий из пластмасс. Она позволяет преодолеть ограничения других методов сварки, однако требует дополнительных затрат на присадочный материал. Этот уникальный процесс позволяет сваривать сложные трехмерные поверхности и материалы с очень низким модулем упругости, такие как термопластичные эластомеры, очень толстые детали, ориентированные или чувствительные к нагреву материалы. Индукционная сварка успешно применяется для соединения деталей из материалов с очень высоким содержанием наполнителей или армирующих добавок, которые из-за малого содержания полимера в поверхностных слоях деталей не могут быть сварены другими методами. В противоположность другим методам индукционная сварка позволяет проводить процесс соединения повторно, в частности при ремонте и устранении дефектов изделий. Допуски для деталей, соединяемых с помощью индукционной сварки, не слишком строги из-за зазора, который заполняет присадочный материал. Результатом сварки являются соединения, которые имеют аккуратный внешний вид и обладают минимальными остаточными напряжениями. Длительность процесса сварки невелика и составляет около 3-10 с [62]. Процесс может быть экономичен при сварке как мелких деталей, так и крупных деталей длиной до 6 м [43,78]. Кроме необходимости использовать присадочный материал, недостатком метода является его непригодность для соединения деталей, содержащих чувствительные к электромагнитному полю элементы, например, металлические вставки, оплетки.

6.5.6. Резисторная сварка

Другим видом имплантантной сварки с использованием энергии электрического поля является резисторная сварка. В этом процессе электропроводящие проволоки или оплетка размещаются непосредственно в зоне соединения. Проволока подключена к электрической цепи и нагревается при прохождении электрического тока. Тепло от проволоки передается прилегающему к ней материалу. Давление используется для того, чтобы поддерживать плотный контакт после выключения электрического тока и охлаждения зоны сварки. Этот процесс сварки очень прост и занимает мало времени [54]. Он особенно пригоден для получения соединения по большим поверхностям благодаря минимальным требованиям к оснастке. Недостатком метода является необходимость использования остающегося в шве нагревательного элемента (проволоки, оплетки), что сопровождается дополнительными затратами, и возможность негативного влияния этого элемента на прочность соединения.

6.5.7. Сварка нагретым инструментом

Сварка нагретым инструментом, которую также называют сваркой нагретой плитой (плоских деталей), представляет собой процесс образования соединения деталей из термопластов, в котором используется металлический инструмент с электрическим нагревом для размягчения соединяемых поверхностей. После нагрева плита или инструмент удаляются, а детали совмещаются под давлением прежде чем произойдет охлаждение и затвердевание их поверхностей. Сварка нагретым инструментом

может быть использована для соединения как мелких, так и крупных деталей из почти любого термопласта. Этот процесс успешно используется для сварки деталей из ПЭ и ПП, которые трудно соединить с помощью другого вида сварки. Этот процесс идеально пригоден для сварки разнородных материалов, когда каждая из рабочих поверхностей инструмента нагревается до соответствующих для каждого из термопластов температур [54]. Этот процесс также пригоден для сварки деталей со сложными поверхностями, расположенными в нескольких плоскостях или деталей с глубокими выемками и с тонкими стенками, которые не могут быть точно соединены сваркой вибротрением [54, 70, 84,85].

Оборудование для сварки нагретым инструментом состоит из пресса, металлического нагревательного инструмента и зажимов, фиксирующих детали. Температура инструмента обычно очень высока, что приводит к сокращению времени разогрева. Нагревательные инструменты часто покрываются тонким слоем напыленного ПТФЭ (тефлона) или сменной тефлоновой пленкой. Температура покрытых ПТФЭ инструментов не должна превышать 270 °С [54, 85, 86]. В качестве альтернативы могут быть использованы другие покрытия с низким коэффициентом трения (например, никелевое покрытие, полученное методом химического восстановления и наполненное ПТФЭ). Для преодоления проблемы прилипания, можно применить: 1) бесконтактный нагрев (излучение и конвекция)[54]; 2) плиты с очень высокими температурами нагрева (до 400 °С, при которых прилипший расплав разрушает, оставляя поверхности инструмента относительно чистыми перед выполнением следующего цикла нагрева. Последний метод пригоден не для всех термопластов и требует применения вентиляции [86].

Основные стадии процесса сварки нагретым инструментом [54,84] показаны схематично на рис. 6.124. Нагретая плита или инструмент устанавливается между подлежащими сварке деталями. Нагретый инструмент должен точно соответствовать контуру деталей. На начальной стадии для контактирования нагретого инструмента с деталями необходимо приложить относительно высокое давление, чтобы компенсировать искривления соединяемых поверхностей и их несоответствие друг другу [54, 84,86]. При плавлении происходит удаление загрязнений и выравнивание соединяемых поверхностей. Как только начинается горизонтальное течение расплава в зоне контакта с инструментом давление снижают, в то время как слой расплава увеличивается в результате вытекания расплава. Ограничители перемещения фиксаторов для деталей и инструмента приходят в контакт. Детали удерживаются в контакте с инструментом, пока не произойдет их достаточный нагрев и слой расплава не распространится на нужную глубину. Важно иметь в виду, что различные слои сварного шва имеют разную «термическую историю», и это может явиться причиной термической разрушки расплава на его границе контакта с инструментом, или термоокислительной разрушки, когда происходит раскрытие фиксаторов. После нагрева удерживающие детали фиксаторы раскрываются, и нагретый инструмент быстро удаляется из зоны сварки. Затем детали приводятся в контакт под давлением, что сопровождается выдавливанием расплава — образованием наплыва. Ограничители перемещения фиксаторов приходят в контакт друг с другом. После охлаждения сварного шва верхний фиксатор отводится из сварочного узла установки.

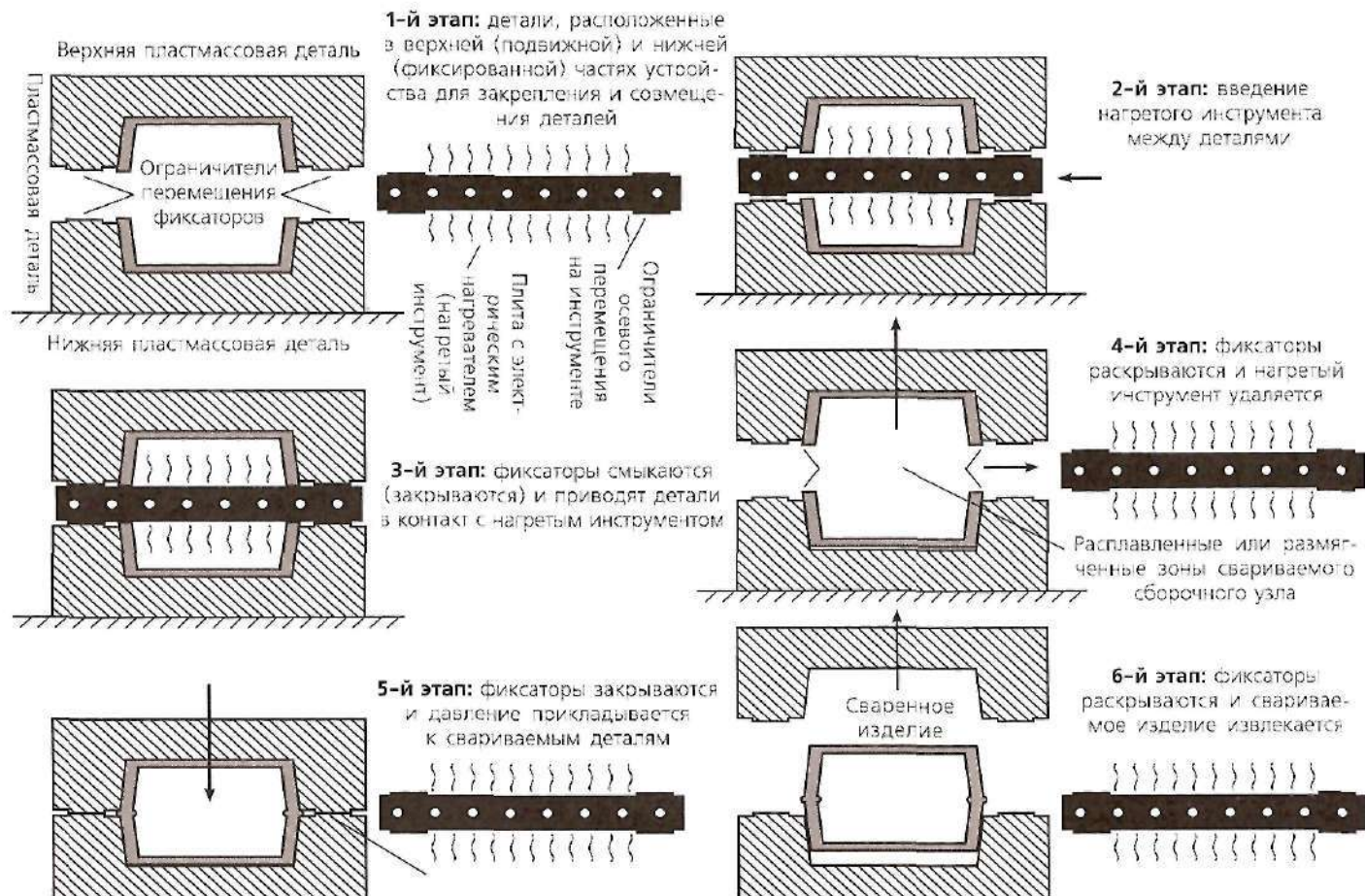


Рис. 6.124. Основной принцип, компоненты и этапы процесса сварки деталей из термопластов нагретым инструментом

Детали, изготовленные из гигроскопичных материалов, нуждаются в предварительной сушке.

При сварке нагретым инструментом обычно используется конструкция соединений встык. Типичные конфигурации соединений встык показаны на рис. 6.125 [62]. Прочность сварного шва, полученного сваркой нагретым инструментом, очень высока, если правильно выбраны режимы процесса. Время цикла сварки нагретым инструментом может длиться от 15 с для мелких деталей до нескольких минут для очень больших [54,85].

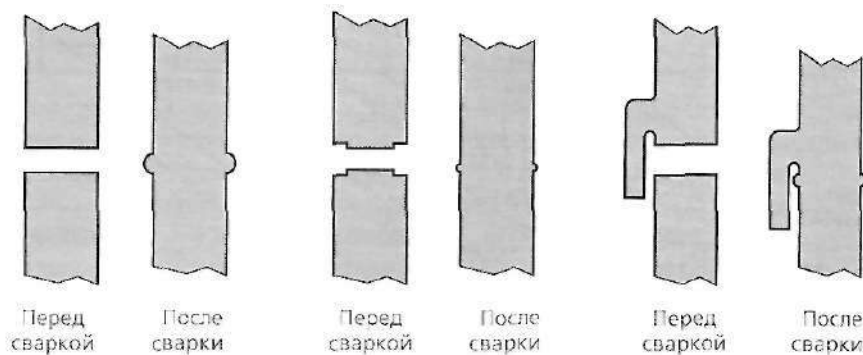


Рис. 6.125. Типичные конфигурации соединений встык, используемые при сварке деталей из термопластов нагретым инструментом

Эффективность сварочного производства можно повысить, если сварку различных изделий осуществлять в течение одинакового цикла при одном и том же расстоянии между фиксаторами деталей.

6.5.8. Сварка нагретым газом

Сварка нагретым газом интенсивно используется для соединения очень больших деталей из термопластов в виде профилей и листов. Этот процесс не применяется для соединения пластмассовых деталей, полученных литьем под давлением, так как имеется много других более автоматизированных методов сварки. Сварка нагретым газом иногда используется, когда нужно отремонтировать изделие из термопласта или изготовить прототип [54, 87-89]. Оборудование для сварки нагретым газом относительно недорогое и несложное. Обычно используются портативные аппараты, но существуют и специальные автоматизированные комплексы.

При сварке нагретым газом в качестве теплоносителя используется воздух (или азот — для материалов, подверженных оксидированию), который одновременно нагревает до размягчения соединяемые поверхности деталей и присадочный пруток (рис. 6.126). Присадочный пруток изготавливается из той же марки термопласта, что и обе детали. Процесс сварки обычно осуществляется вручную. Сварочный аппарат удерживается одной рукой, а сварочный пруток подается другой. Сварочный пруток размягчается и вдавливается в полость между деталями. Модифицированный сварочный аппарат с добавлением прижимных башмаков или роликов позволяет увеличить

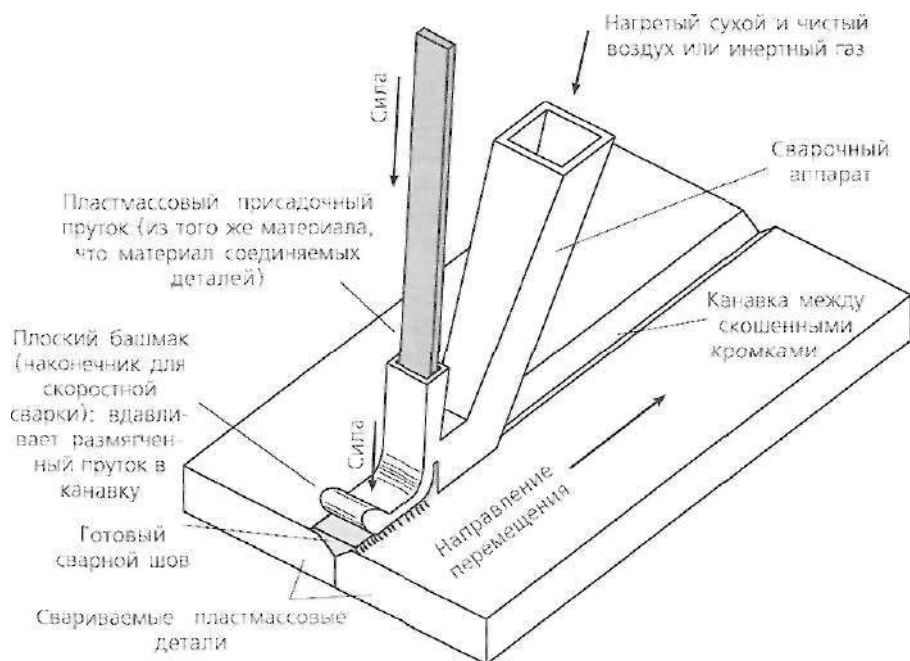


Рис. 6.126. В наконечнике сварочного аппарата нагретым газом нагревают соединяемые поверхности деталей и присадочный пруток, и создается давление для образования соединения

скорость сварки и повысить качество соединения. Качество сварного соединения зависит от свойств материала, характеристик сварочной оснастки и параметров процесса.

Уже отмечалось, что очень важно, чтобы сварочный пруток был выполнен из того же термопласта, что и соединяемые детали. Присадочные прутки промышленного производства имеют круглое сечение, хотя треугольный или U-образным профиль обеспечивают лучший нагрев и течение материала. Иногда применяют двухкомпонентные прутки, сердцевина которых изготовлена из материала с повышенной прочностью и армированного стекловолокном [87].

Процесс сварки начинается с создания фаски на кромках деталей (рис. 6.127). Кромки должны быть чистыми и сухими. Содержание влаги в деталях и присадочном прутке имеет значение, когда термопласт гигроскопичен. Температура нагретого газа и скорость его потока подбираются для каждого свариваемого материала с учетом толщины деталей. Температуры нагретого воздуха при сварке некоторых термопластов приведены в табл. 6.2 [87].

Используемый при сварке воздух должен быть сухим и не содержать масла.

Для сварки используется «маятниковый метод». Он заключается в том, что детали и пруток нагреваются чередуясь. Сварка нагретым газом широко используется при монтаже сантехники и ремонте автомобилей, особенно когда необходимо отремонтировать бампер или панели корпуса. Исследования, посвященные ремонту бамперов, показали, что наиболее высокая прочность достигается при сварке X-образных

Таблица 6.2. Температура нагретого воздуха при сварке термопластов

Термопласт	Температура, °C
Жесткий ПВХ	220–300
ПЭВП	250–280
ПЭНП	270–300
ПС	250
Акриловый полимер	350
ПК	350
АБС-пластик	350
ПП	300

соединений [89]. Но даже если использовать Х-образные соединения, полностью удовлетворительных результатов достичь не удастся вследствие невозможности создать достаточное давление, когда сварной шов затвердевает и усаживается, и из-за образования газовых включений в зоне свариваемых поверхностей. Применение нагретого ролика, следующего вслед за сварочным башмаком, позволяет повысить качество швов, а применение прижимных устройств ведет к удалению воздушных включений.



Рис. 6.127. Типичные соединения и конфигурации присадочных прутков при сварке деталей из термопластов нагретым газом

6.5.9. Экструзионная сварка

Экструзионная сварка развивалась из сварки нагретым газом. В процессе экструзионной сварки используется нагретый воздух или газ /для размягчения зоны V-образного соединения путем конвективного нагрева. Канавка между свариваемыми кромками заполняется под давлением присадочным материалом (аналогичным материалу деталей), переведенным с помощью экструдера в вязкотекучее состояние. Как только присадочный материал сварочного наполнителя заполняет V-образную канавку, прикладывается давление с помощью башмака или ролика. Этот процесс используется для автоматической сварки крупногабаритных листовых конструкций [54,87,90].

6.6. Клеевые соединения

6.6.1. Общие положения

Клеевые соединения широко используются для сборки изделий из однородных или разнородных термопластов и реактопластов, и часто изделий, состоящих из полимерных и металлических деталей, которые не могут быть сварены друг с другом. Клеи являются универсальным сборочным средством и предоставляют много преимуществ по сравнению с другими уже рассмотренными средствами. Но при использовании клеев нужно учитывать множество технологических факторов, чтобы получить прочное и надежное соединение. К преимуществам клеевых соединений относятся:

- хороший внешний вид и возможность создания разнообразных конструкций;
- равномерное распределение напряжений;
- возможность соединения разнородных материалов;
- возможность получения погодоустойчивых, водо- и газонепроницаемых соединений;
- клеи, устойчивые к сдвиговым напряжениям, дают возможность компенсировать несовпадение температурных коэффициентов линейного расширения у соединяемых деталей, а также при использовании гибких, эластичных при сдвиге клеевых прослоек;
- податливые клеевые прослойки могут демпфировать вибрации;
- возможность применения при сборке изделий из тонких и гибких деталей;
- обеспечение электрической и термической изоляции.

Во многих случаях клеевые прослойки выполняют несколько функций. Например, создающая полужесткую прослойку полиуретаговая клеевая система может быть использована для присоединения прозрачных линз из ПК к отражателю, изготовленным из ПА 6.6 в осветительной системе автомобиля. Клеевая прослойка в этом случае выполняет функцию сборочного средства, имеет хороший внешний вид, служит уплотнителем против проникновения влаги, придает стойкость к вибрациям, возможность распределять или исключать образование напряжений, возникающих из-за различия КЛТР. Однако существует ряд ограничений, связанных с использованием клеев. Их необходимо принимать во внимание перед выбором рассматриваемого метода соединения; главные из них рассмотрены ниже.

Неопределенность эксплуатационных характеристик соединения

Прочность клеевого соединения трудно предсказать на стадии проектирования при разработке изделия. Основой клеев являются полимеры, и их механические свойства зависят от продолжительности процесса, температуры, влажности и других факторов окружающей среды. Как и у любого другого полимерного материала, объемная, или когезионная, прочность материала клеевого слоя может быть определена экспериментально или данные о ее величине могут быть получены от производителя. Однако прочность клеевого соединения нельзя предсказать, так как «слабое звено» находится на межфазной границе между клеевым слоем и субстратом. Адгезионная, или межфазная, прочность зависит как от свойств клеевого слоя, так и от

характеристик поверхности соединяемых деталей. Для того чтобы установить величину межфазной прочности, необходима экспериментальная проверка на прототипах изделия. Долгосрочные эффекты воздействия влаги или других параметров окружающей среды на адгезионную прочность определить нелегко. Надежность сборки зависит также от производственных факторов. Неопределенности, связанные с длительной и даже с кратковременной прочностью, заставляют многих конструкторов обращаться к подходу «ремней и подпорок». Клеи часто используются совместно с другими более надежными механическими крепежными деталями, например, с винтами. Механические фиксаторы обеспечивают надежность и безопасность, пока клеевой слой будет набирать прочность по мере отверждения (затвердевания) клея. Клеевой слой дает возможность уменьшить количество механических крепежных элементов, обеспечивает герметичность соединения и поглощение вибраций, или выполнения других функций.

Постоянные сборочные узлы

Как и сварка, клеи обычно используются для сборки изделий с постоянным необслуживаемым соединением деталей. В некоторых случаях, когда требуется обеспечить ограниченный доступ или ремонт собранного изделия, в качестве клеев могут быть использованы легкоплавкие термопласты.

Интеграция химических процессов

Многие сборочные операции по своей природе являются чисто механическими. Однако многие лежащие в основе клеевой сборки операции требуют использования химикатов и очистителей, а следовательно, сопровождаются химическими реакциями. Например, для очистки поверхности детали может потребоваться использование потенциально опасных растворителей или химикатов. Клеи сами по себе также могут содержать опасные химические реактивы или растворители, в связи с чем при выполнении некоторых операций склеивания необходима вентиляция. Качество клеевых соединений определяется такими факторами, как условия хранения клеев, степень их смешения и условия окружающей среды. Например, прочность соединения двух деталей с помощью эпоксидного клея будет зависеть от срока хранения компонентов, стехиометрического соотношения, качества смешения и условий отверждения. Корректное стехиометрическое соотношение компонентов клея обеспечивается автоматизированными дозирующими устройствами. Подобное устройство, включающее неподвижные смешивающие элементы, для двухупаковочного клея приведено на рис. 6.128.

Сменное сопло смесителя заменяется в конце производственного цикла или после продолжительного простоя, в течение которого клей в сопле может отвердеть. Проблемы, связанные с химическими реакциями, можно минимизировать, и используя не термореактивные клеи, а такие как термопластичные клеи-расплавы, автоматизируя как можно большее количество стадий процесса склеивания.

Необходимость чистки поверхности

Поскольку клеевые соединения образуются в результате взаимодействия склеиваемых поверхностей, качество последних должно быть постоянным при переходе от детали к детали. Склеиваемые поверхности должны быть чистыми, свободными от масел, смазки для литейных форм, пыли или других загрязнителей. Подлежащие

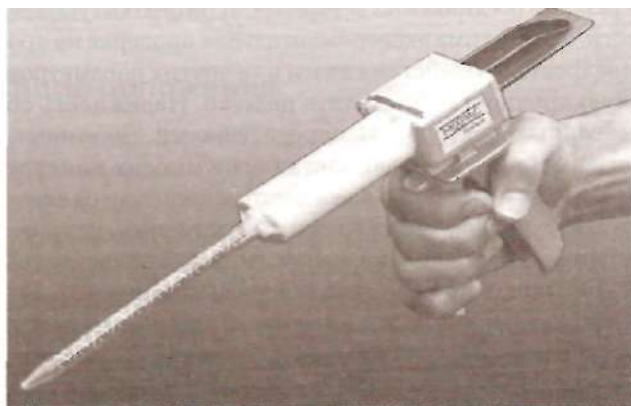


Рис. 6.128. Автоматизированное дозирующее устройство для двухупаковочных термореактивных клеев

склеиванию поверхности деталей перед выполнением процесса обычно подвергают специальной подготовке. Хранение деталей в полимерных мешках снижает опасность их загрязнения.

Отсутствие возможности проверки качества соединения

После завершения склеивания нелегко проверить качество полученного соединения. Невозможно в некоторых случаях точно определить количество клея и его распределение в зоне соединения. Трудно оценить влияние на прочность соединения неправильного применения клея или недостаточной подготовки поверхностей. При механической сборке наличие или отсутствие крепежных деталей легко определить так же, как и величину крутящего момента, прикладываемого при ее выполнении. Поэтому очень важно, чтобы на всех стадиях процесса склеивания точно соблюдались все возможные требования по управлению качеством соединения; прочность соединения будет высокой, если тщательно контролируются такие операции, как подготовка поверхностей и смешение клея. Рекомендуется проводить контроль образцов клеевых соединений, изготавливаемых параллельно с основным производственным процессом.

Время для достижения максимальной прочности

В отличие от механической или тепловой сварки, клеевое соединение достигает своей предельной прочности за большее время. Процесс склеивания включает в себя испарение растворителей или воды; в его основе — химические реакции. Все это требует определенного времени. Длительность склеивания может составлять от нескольких секунд до нескольких дней. Склеиваемые детали необходимо зафиксировать в течение определенного периода времени, чтобы обеспечить надлежащее смачивание, заданную толщину клеевого слоя и компенсировать коробление. Как только клеевой слой достигнет определенной прочности, фиксирующее приспособление может быть удалено или разобрано до момента полного отверждения термореактивного клея. Время отверждения или время испарения растворителя может быть сокращено за счет

повышения температуры, однако это может привести к снижению прочности соединения из-за действия следующих факторов. Повышенная температура и большая скорость отверждения могут привести к образованию пор, термических напряжений, в результате разности КЛТР, остаточным напряжениям и возможной миграции добавок в клеевой слой. Однако в некоторых случаях повышенная температура необходима для окончательно отверждения клея и достижения предельной прочности соединения. В этом случае применяют программируемый никл нагревания.

6.6.2. Теория клеевых соединений

Клей может быть определен как материал, который способен (после отверждения) удерживать детали вместе в результате взаимодействия поверхностей. Ключевое слово здесь — «поверхность». Конструкторы наиболее часто имеют дело со свойствами материала (например, прочность при растяжении, модуль упругости и пр.) в блоке, однако при выполнении клеевых соединений должны принимать во внимание характеристики поверхностей соединяемых деталей. Необходимо отметить, что нет универсального клея, который пригоден для всех термопластов. Приходится делать выбор из множества клеев, представленных на рынке. Выбор клея для конструкторов является, пожалуй, одной из самых трудных задач. При выборе клея для конкретного применения конструктор руководствуется теорией клеевых соединений, предшествующим опытом, рекомендациями производителей клеев, результатами испытаний прототипа изделия.

Процесс создания клеевого соединения начинается с нанесения жидкого клея на одну или обе соединяемые детали. На этой стадии клей должен быть текучим, чтобы произошло его взаимодействие с поверхностью. Затем необходимо приложить внешнее давление, чтобы равномерно распределить клей по соединяемым поверхностям. После того как клей распределится, он должен отвердеть, чтобы удерживать соединяемые поверхности. Таким образом, клей должен:

- смачивать соединяемые поверхности за счет принудительного распределения и капиллярных эффектов;
- удерживать поверхности за счет сил адгезии;
- превратиться (после завершения склеивания) в прочное твердое тело (то есть достигнуть высокой когезионной прочности).

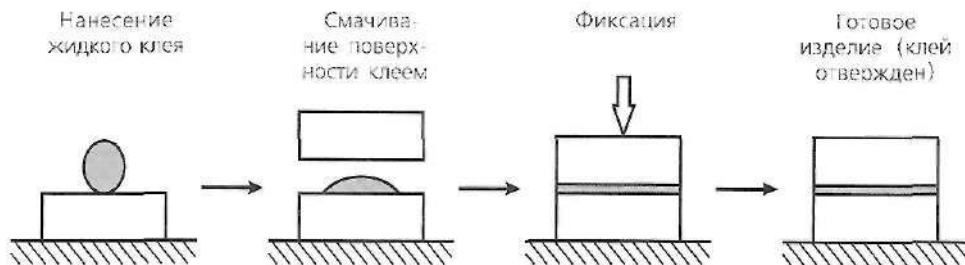


Рис. 6.129. Фазы создания клеевого соединения

Первой фазой процесса склеивания является смачивание поверхности. Природой предписано, что жидкости смачивают твердую поверхность, если поверхностная энергия твердого субстрата больше, чем она же у жидкости. [91-93]. Чтобы смачивание прошло правильно, критическое поверхностное натяжение полимерного субстрата должно быть больше, чем поверхностное натяжение клея.

Металлы и оксиды металлов, имеющие высокое поверхностное натяжение, легко смачиваются рядом органических и неорганических жидкостей с более низким поверхностным натяжением. Капля воды будет стремиться распределиться по поверхности оксида металла. Однако капля полярной воды плохо будет смачивать неполярные с низкой энергией поверхности, такие как воск и ПЭ. Контактный угол смачивания между жидкостью и твердой поверхностью позволяет визуально оценить смачиваемость. Многие проблемы склеивания деталей из полимерных материалов связаны с их смачиваемостью. Значения критического поверхностного натяжения чистых полимерных поверхностей, и поверхностные натяжения некоторых жидкостей приведены в табл. 6.3, а и 6.3, б [91, 92, 94].

Данные табл. 6.3 показывают, что поверхность из ПЭ не может быть смочена стандартным эпоксидным клеем. Смачивание является важной проблемой при склеивании материалов с низкой поверхностной энергией, таких как ПЭ и ПТФЭ. Для того чтобы эффективно склеить материалы такого типа, для повышения поверхностной энергии их поверхность необходимо химически модифицировать или применить клеи на основе, например, фторированной эпоксидной смолы с относительно низкой поверхностной энергией.

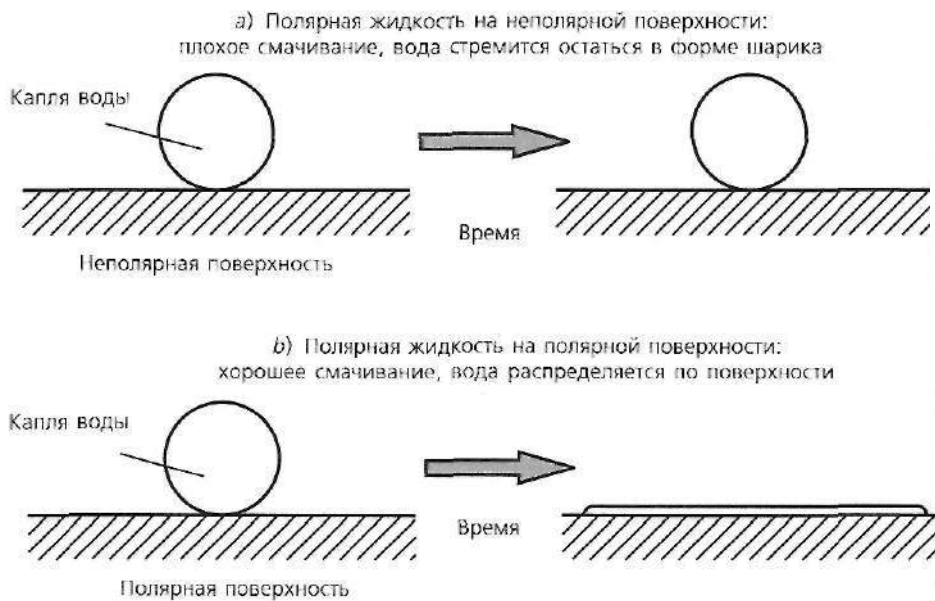


Рис. 6.130. Поверхностная энергия/поверхностное натяжение влияет на способность клея смачивать поверхность

Таблица 6.3, а. Критическое поверхностное натяжение для наиболее распространенных пластмасс и металлов

Материал	Критическое поверхностное натяжение, дин/см
Медь	1,000*
Алюминий	500*
Полиформальдегид	47
Эпоксидная смола	47
ПА	< 46
ПК	46
Целлюлоза	45
ПЭТФ	43
Полисульфон	41
Полиимид	40
ПММА	39
ПВХ	39
Полифениленсульфид	38
АБС-пластик	35
ПС	33
ПЭ	33
Силикон	24
ПТФЭ	18

* Приблизительные значения.

Таблица 6.3, б. Поверхностное натяжение для основных клеев и жидкостей

Материал	Поверхностное натяжение, дин/см
Эпоксидная смола	47
Фторированная эпоксидная смола	33
Глицерин	63
Нефтяное смазочное масло	29
Силиконовое {кремнийорганическое} масло	21
Вода	73

Процесс смачивания зависит также от вязкости клея. Понижение вязкости клея улучшает смачивание поверхности и повышает способность клея заполнять щели на поверхности. Рассмотрим возможность использования ПЭ в качестве клея-расплава для соединения двух литых под давлением деталей из ПК. Значение поверхностной энергии ПЭ, приведенное в табл. 6.3, а, означает, что расплав ПЭ будет смачивать поверхность ПК. Очень низкая молекулярная масса ПЭ или воска является причиной очень низкой вязкости, что обеспечивает и тому и другому веществу возможность легкого распределения по поверхности, чего нельзя сказать о расплавах с высокой молекулярной массой. Например, расплавленный высокомолекулярный ПЭ не будет распределяться по поверхности так же легко, поскольку вязкость расплава находится в строгой зависимости от молекулярной массы (рис. 6.131).

Следует также заметить, что когезионная или объемная прочность полимера (клея) также является функцией молекулярной массы. Большая прочность полимера

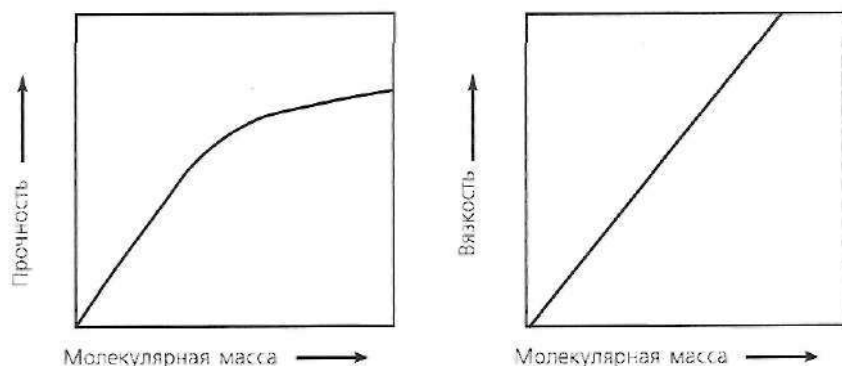


Рис. 6.131. Влияние молекулярной массы клея на его вязкость и механические свойства

достигается только при высокой его молекулярной массе, которая придает материалу значительную вязкость.

Хотя воск может быть более текучим, но он имеет существенно более низкую прочность при растяжении и сдвиге, чем высокомолекулярный ПЭ. Прочность клеевого слоя очень важна, поскольку разрушение клеевого соединения может произойти вблизи межфазной границы или когезионно по клеевому слою, или по одному из субстратов (рис. 6.132).

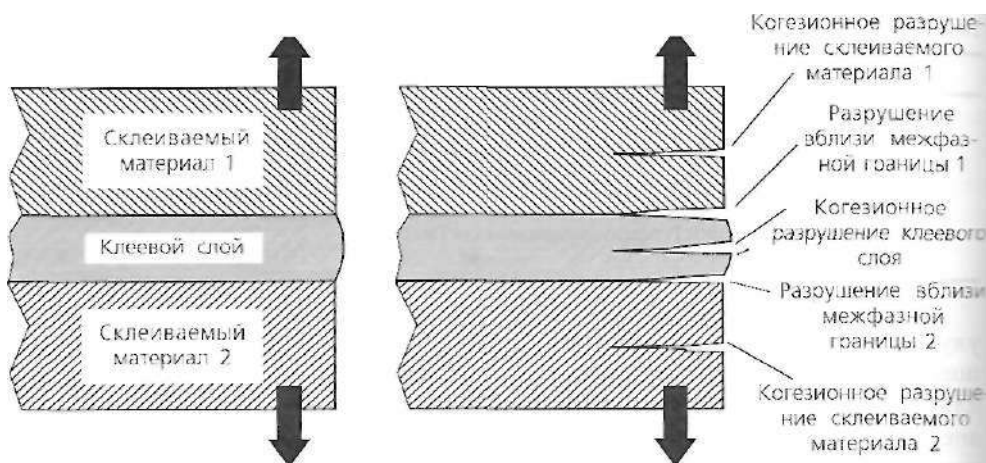
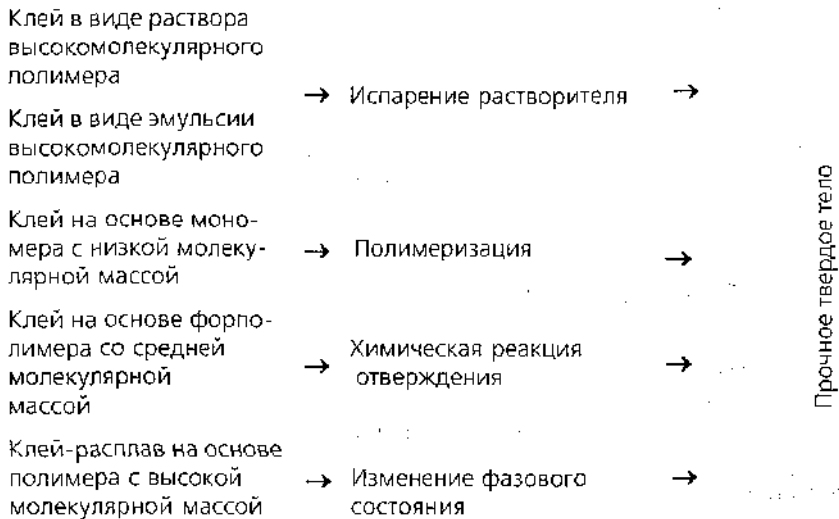


Рис. 6.132. Возможные зоны разрушения клеевого соединения

Клей должен быть текучим для обеспечения смачиваемости поверхности в процессе склеивания, в то же время он должен превратиться в прочный твердый материал, способный удерживать соединяемые поверхности. Чтобы полимер клея стал таким материалом, он в конце концов должен иметь высокую молекулярную массу. Поэтому изготовитель клеев сталкивается со сложной задачей — создать клей, который

с одной стороны, во время применения был бы жидким и, с другой — переходил бы в прочный материал (в течение приемлемого времени) без чрезмерной усадки.

Переход клея из жидкого в твердое состояние может быть осуществлен несколькими способами:



Клеи в виде растворов полимера

В данных клеях используется один или несколько летучих растворителей для растворения полимерной основы клея. Клеи-растворы имеют относительно низкую вязкость. После нанесения клея на соединяемую поверхность, растворитель испаряется, оставляя только высокомолекулярную полимерную массу. В эту же категорию клеев попадают растворы на основе эластомеров или резиновой смеси. Пастообразные или уплотняющие термопластичные цементы также состоят из определенного количества базовой смолы и смеси растворителей. Растворитель влияет на продолжительность склеивания и качество соединения, в то время как концентрация полимера влияет на вязкость и способность клея заполнять зазоры. Уплотняющие термопластичные цементы считаются не обычными клеями, а содержащими растворимые присадочные материалы, обладающие способностью заполнять щели. Опасное воздействие на окружающую среду содержащих растворитель клеев ограничивает их применение. Водоземulsionные клеи, которые могут быть отнесены к этой же группе клеев, быстро приобретают популярность.

Клеи на основе мономеров

Низкомолекулярные мономеры, имеющие консистенцию подобно растворителям, также используются в качестве клеев. Эти жидкие клеи обычно используются, когда нужно получить очень тонкий слой фиксирующего компонента. Полимеризация инициируется светом, нагревом и отсутствием кислорода (анаэробные клеи). К мономерным клеям относятся композиции на основе акрилатов и цианоакрилатов.

Клеи на основе форполимеров¹

Форполимеры с низкой и средней молекулярной массой широко используются в качестве клеев благодаря их универсальности, простоте обработки, малой усадки и способности заполнять зазоры. Эти клеи поставляются в виде одноупаковочных или двухупаковочных систем. В них не содержится растворителей. Отверждение осуществляется в результате химической реакции. После отверждения форполимер представляет собой полимер трехмерной химической структуры. Одноупаковочные системы отверждаются в результате нагрева или воздействия атмосферной влаги/кислорода, а двухупаковочные — в результате реакции между составляющими их компонентами при комнатной или повышенной температуре (конструкционные эпоксидные клеи, полиуретановые клеи и силиконовые клеи также попадают в рассматриваемую группу).

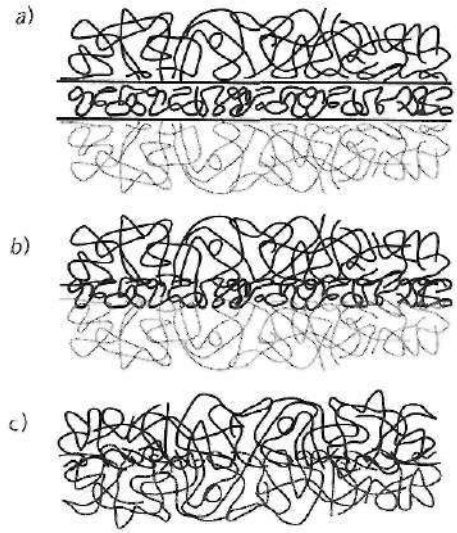
Полимерные клеи-расплавы

Многие термопласты могут быть использованы в качестве клеев в виде блоков. Эти полимеры, нагретые до температуры вязкотекучего состояния, способны смачивать соединяемые поверхности и вновь затвердевать после охлаждения. Изменение состояния клеев — это чисто физический процесс, поэтому склеивание с их использованием относительно легко автоматизировать. Клеи-расплавы представляют собой системы достаточно вязкие, свободные от растворителей и способные хорошо заполнять зазор. Они широко используются для ряда соединений деталей, испытывающих легкие и средние нагрузки. Но имеются системы, обеспечивающие высокую прочность соединения. Некоторые из клеев представляют собой гибридные системы, например, полиуретановый термопласт с однокомпонентным термореактивным полиуретановым форполимером. Термопласт обеспечивает быстрое достижение начальной прочности соединения, а термореактивные компоненты улучшают эксплуатационные характеристики клеевого слоя.

Соединение деталей с помощью полимерных клеев сильно отличается от процесса клеевого соединения металлических деталей. Взаимодействие на границе клеевой слой—субстрат является результатом действия сил Ван дер Ваальса (связи физической адсорбции) и первичных, химических связей (связи химической адсорбции) [91] (рис. 6.133, *а*). При соединении деталей из термопластов с помощью полимерных клеев существует потенциальная возможность диффузии полимерных цепей через поверхность соприкосновения (6.133, *б*). Это может произойти, когда используются клеи, содержащие растворители, мономерные клеи или даже клеи-расплавы (благодаря термическим эффектам). Процесс клеевого соединения для многих деталей, особенно изготовленных из аморфных термопластов, представляет собой нечто среднее между сваркой растворителем и клеевым соединением. Экстремальный случай сварки растворителем отражен на схеме (рис. 6.133, *с*).

Форполимер (прсиолимер) — олигомер, содержащий реакционно-способные группы, и поэтому способный к росту пеней с образованием высокомолекулярного полимера. — *Прим. науч. ред.*

Рис. 6.133. Теоретически клеевое соединение рассматривается как соединение поверхностей. По при использовании полимерных клеев для соединения пластмассовых деталей может произойти диффузия молекул (то есть сварка). В этом случае возможно несколько вариантов: *a* — отсутствие диффузии клея, *b* — взаимная диффузия молекул клея и субстрата, *c* — диффузия, обусловленная исключительно действием растворителя (сварке растворителем)



Поверхности деталей

Поскольку клеевое соединение возможно только при взаимодействии поверхностей, их состояние оказывает прямое влияние на качество соединения. Поверхность никогда не бывает идеально чистой, плоской и гладкой [91]. Например, одной из проблем при изготовлении литых под давлением деталей является коробление. Очень трудно изготовить идеально плоские детали из частично кристаллических термопластов. В результате коробления между соединяемыми деталями образуется зазор. В таком случае изготовитель деталей для устранения коробления может перед склеиванием применять отжиг в приспособлении. Также можно применить клей, заполняющий зазор (рис. 6.134). Подобный клей имеет более высокую вязкость и позволяет

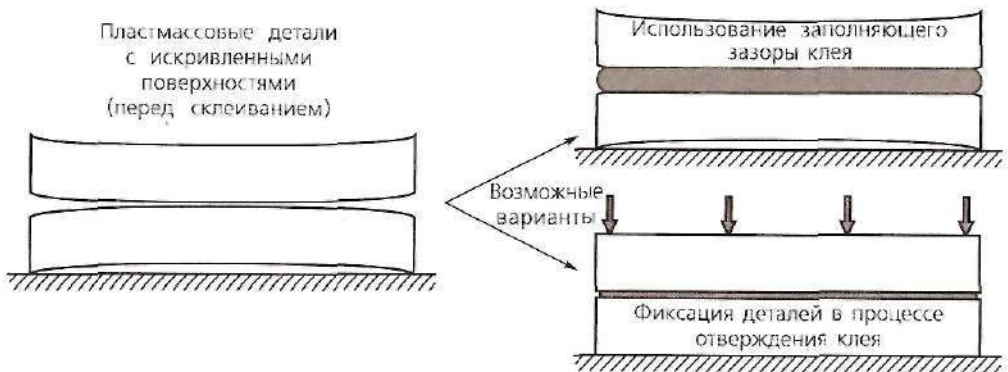


Рис. 6.134. Детали с искривленными поверхностями могут быть соединены с помощью заполняющего зазоры клея или перед склеиванием помещены в фиксирующее или зажимное приспособление, чтобы снизить величину зазора и уменьшить требования к заполнению

выполнить соединение деталей с различного рода неровностями. При этом нужно учитывать, что клеевой слой будет подвергаться в течение длительного времени действию напряжений, когда деталь будет стремиться вернуться в исходное состояние. Величина зазора и требования к его заполнению могут быть уменьшены, если детали во время операции склеивания выпрямляются с помощью фиксирующих или зажимных приспособлений.

Поверхности деталей имеют определенную шероховатость, которая может быть увеличена шлифованием. Повышение шероховатости способствует увеличению силы адгезии, так как увеличивается поверхность соприкосновения деталей и возможности механического сцепления. Однако необходимо, чтобы клей полностью смачивал шероховатую поверхность, что иногда оказывается достаточно сложно, если материал детали имеет поры, а клей слишком вязкий. Склеиваемые поверхности могут быть обработаны, кроме шлифования, другими видами механической обработки. При обработке поверхностей необходимо учитывать направление нагружения соединения, чтобы следы от обработки совпадали с этим направлением. Поверхности должны быть обработаны так, чтобы максимизировать прочность соединения при сдвиге и отрыве. Чистота и химический состав материала поверхности также являются критическими параметрами.

Потенциальная возможность адгезионного разрушения клеевого соединения может быть минимизирована, если поверхности детали подготовлены правильно. Обработка поверхности при осуществлении чисто клеевых соединений имеет большее значение, чем в случае соединений, выполняемых с использованием растворителей и сварки. Предварительная обработка поверхностей предназначены для выполнения одной или нескольких задач [92,95]:

- удаления загрязнений;
- удаления слабого пограничного слоя;
- изменения химических свойств поверхности.

Для удаления загрязнений и слабых пограничных слоев используется протирка тампоном с растворителем, обезжиривание в паровой фазе, очистка моющими средствами или ультразвуковая очистка. Перед склеиванием с поверхности деталей должны быть удалены смазки, перешедшие с поверхности литевых форм или из объема пластмассы, лубриканты, пластификаторы, пыль, масло и консистентная смазка. Использование смазок может быть исключено, по тогда появятся затруднения с вытаскиванием деталей из литевых форм. Чтобы снизить вероятность загрязнения, рекомендуют минимизировать число операций во время формования деталей и сборки изделия. Работа в перчатках, хранение деталей в герметичных контейнерах и автоматизация уменьшают возможность загрязнения поверхности.

У многих термопластов довольно низкая поверхностная энергия. Эта проблема особенно актуальна для ПЭ, ПП, а также ПТФЭ. Перечисленные материалы имеют отличную стойкость к растворителям, поэтому клеи, содержащие растворители, к ним неприменимы. Чтобы улучшить смачиваемость, критическое поверхностное натяжение деталей из этих материалов повышают химической обработкой или окислением поверхности. К модифицирующей обработке относятся: травление, обработка плазменем, коронным разрядом, горячим воздухом или в газоразрядной плазме [92].

В стандарте *ASTMD-2093* приведены способы обработки поверхностей, которые могут быть использованы для большинства наиболее распространенных пластмасс. Почти все способы химической подготовки поверхностей включают в себя использование опасных для здоровья химических реагентов, например, раствора дихромата и серной кислоты для обработки поверхности ПЭ. В этом случае даже такие простые операции, как очистка растворителем, могут быть опасны для работников и окружающей среды.

Обработка холодной плазмой может быть использована в качестве альтернативы обработке реактивами для удаления загрязнений и слабых пограничных слоев и изменения полярности/химического состава поверхностных слоев [96]. Оборудование (реактор) для плазменной обработки имеет разные размеры и может быть использовано для одновременной обработки нескольких деталей. Детали, подлежащие обработке, размещаются в камере для групповой плазменной обработки. Детали, содержащие на поверхности смазки или другие загрязнения могут быть предварительно очищены, чтобы сократить продолжительность пребывания в камере. Камера герметизируется, и в ней создается высокий вакуум. В камеру поступает газ и с помощью радиочастотной энергии происходит его возбуждение. Образующаяся плазма состоит из ионов, электронов и нейтральных частиц, обладающих различной энергией. Электроны получают энергию от высокочастотного электромагнитного поля, затем передают эту энергию в процессе столкновений нейтральным молекулам газа. В результате образуются ионы и свободные радикалы, которые взаимодействуют с поверхностью твердого тела, расположенного в камере. Плазма изменяет только несколько верхних молекулярных

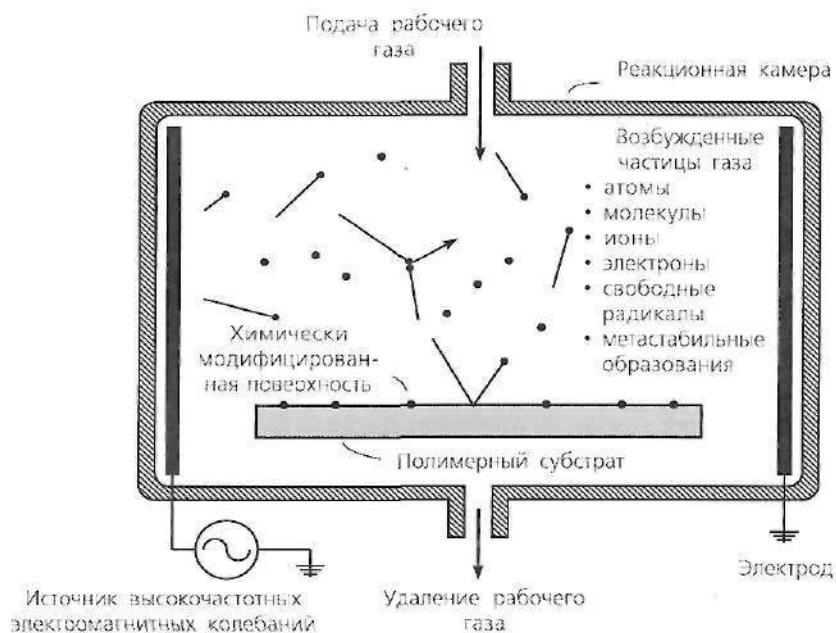


Рис. 6.135. Схема газовой плазменной реакторной камеры, в которой осуществляется модификация поверхностей деталей из пластмасс перед склеиванием

слоев детали, не затрагивая объем материала. Для плазменной обработки в качестве рабочих газов используют кислород, аммиак, воздух и галогены [92,96].

Вне зависимости от метода, который используется для очистки и подготовки поверхности, очень важно поверхность после предварительной обработки сохранять чистой. Число ручных операций должно быть максимально сокращено, а детали должны храниться в помещениях в условиях, недопускающих попадания смазок, масел и пыли.

Интервал времени между обработкой поверхности и операциями самого процесса склеивания является важным параметром. Лучше склеивать детали сразу же после предварительной обработки, чтобы ограничить возможности загрязнения. При большом указанном интервале активированная поверхность может изменить свой химический состав [92].

6.6.3. Выбор клея

Выбор клея зависит от большого числа факторов и обстоятельств, к которым относятся:

- окружающая среда в условиях эксплуатации;
- ожидаемый уровень напряжений;
- химические свойства поверхности субстрата;
- жесткость субстрата;
- КЛТР субстрата;
- требования к способности по заполнению зазора;
- способ применения.

Окружающая среда в условиях эксплуатации

Клеи — это полимерные материалы и их свойства в значительной степени зависят от температуры, относительной влажности и других факторов окружающей среды. Очень важно, чтобы выбранные клеи после завершения процесса склеивания имели нужные свойства в ожидаемых экстремальных условиях окружающей среды. Это может быть очень сложной проблемой, поскольку клеевые прослойки, хорошо работающие при высокой температуре оказываются хрупкими при низкой температуре, и, наоборот, при низкой температуре имеют низкую прочность или размягчаются при высокой температуре. Длительное воздействие окружающей среды или старение оказывают влияние на прочность клеевых соединений. Процесс разрушения по границе клеевой слой-соединяемая поверхность называется десорбцией. К десорбции может привести длительное воздействие влаги, содержащейся как в материале детали, так и в окружающей среде [92].

Уровень напряжений

Уровень напряжений, которые может воспринимать соединение, зависит от его конструкции и от выбранного клея. Скорость, частота и длительность нагружения должны быть количественно оценены до выбора клея. Возможность неправильного применения должна быть также тщательно рассмотрена.

Химические свойства поверхности субстрата

Выбранный клей должен смачивать и взаимодействовать с обеими соединяемыми поверхностями. Выбор клея для конструктора ограничен, когда соединяемый материал имеет очень низкое поверхностное натяжение. Легче всего подобрать клей для

соединяемых деталей, изготовленных из одного и того же материала. Намного сложнее выбрать клей, если соединяемые материалы разнородны (например, АБС-пластик и алюминий).

Жесткость субстрата

При выборе клея важным является учет жесткости субстрата. Клеевые соединения обычно конструируют так, чтобы рабочие нагрузки создавали в клеевом слое сдвиговые напряжения. Однако в некоторых случаях это не может быть полностью достигнуто и клеевой слой подвергается менее подходящему изгибу, раскалыванию или расслаиванию (рис. 6.136). Эта проблема может возникнуть, когда соединяются очень тонкие и гибкие детали [92].

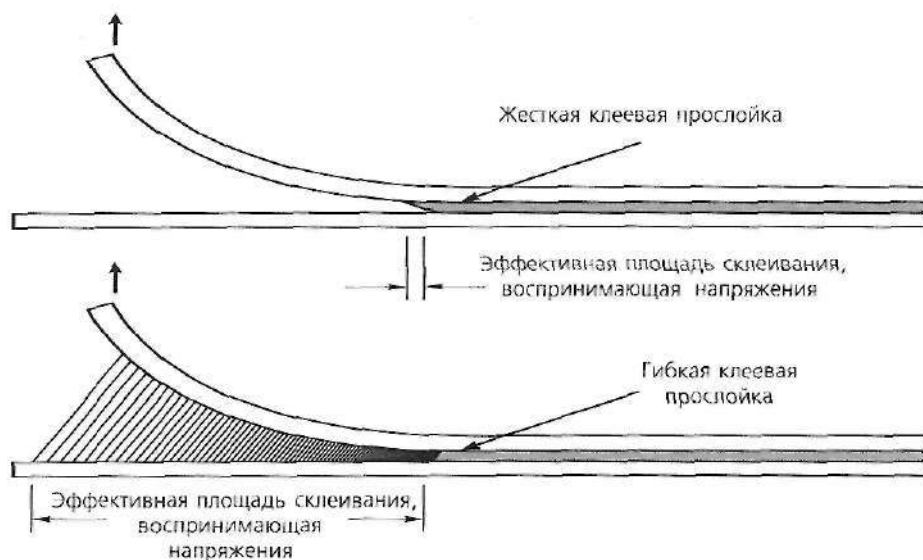


Рис. 6.136. Вязкие при разрушении и гибкие клеевые прослойки распределяют напряжения расслаивания по большой площади

Жесткие клеевые прослойки показывают низкую прочность при расслаивании, поскольку напряжение концентрируется в очень узкой зоне у вершины. Вязкие при разрушении более гибкие клеевые прослойки распределяют напряжения по большей площади и создают более прочные соединения. Таким образом, важным является рассмотрение зависимостей модулей упругости клеевого слоя и субстрата от температуры. Использование клеевых прослоек при температурах, ниже температуры стеклования, не обеспечивает высокой прочности соединения при расслаивании и ударе. Однако для достижения высокой прочности и стойкости к ползучести соединения рабочая температура должна быть ниже T_g .

КЛТР субстрата

Клеи должны быть подобраны таким образом, чтобы разница между КЛТР субстрата и клеевой прослойки была как можно меньшей, чтобы минимизировать термические деформации. Если материалы склеиваемых деталей имеют разные КЛТР

коэффициент клея в идеале должен быть равен их среднему значению, чтобы он мог таким образом «согласовывать» напряжения сдвига [92].

Требования к заполнению зазора между склеиваемыми поверхностями деталей

Шероховатость поверхности и неровности субстрата определяют требования к способности клея заполнять зазоры. Детали могут быть отлиты под давлением и они имеют тенденцию к короблению, обусловленную ориентацией или усадкой. Детали достаточно гибкие, чтобы во время процесса образования соединения с помощью фиксирующих приспособлений выпрямить искривленные участки. Клеи-расплавы и термореактивные клеи обычно хорошо заполняют зазоры, в то время как мономерные клеи с пониженной вязкостью плохо. Способность присадочных материалов, содержащих растворители (при сварке растворителем) к заполнению зазоров определяется концентрацией полимера в растворе.

Конструкция клеевых соединений

Клеевые соединения пластмассовых деталей отличается конструктивно [91, 92, 97, 98]. Конструкция клеевого соединения существенно влияет на прочность всего сборочного узла. Лучше всего заполнение зазоров соединения конструировать так, чтобы клеевой слой в процессе эксплуатации подвергался только сдвиговым нагрузкам. Следует избегать конструкций, которые приводят к возникновению в клеевом слое изгибающих, расслаивающих и отслаивающих напряжений. Площадь соединения должна быть максимальной, чтобы снизить уровень напряжений сдвига. Конструкция соединения должна быть легко реализуемой в производстве, иметь способность самоустанавливаться и обладать привлекательным внешним видом. Соединение встык, показанное на рис. 6.137, представляет собой простейший вариант клеевого соединения.

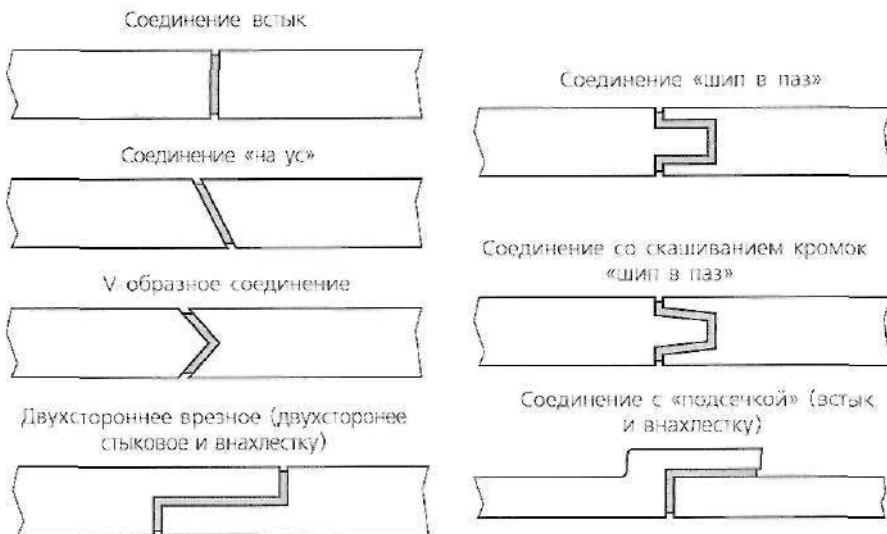


Рис. 6.137. Некоторые виды конструкций клеевых соединений, используемых для литых под давлением деталей из термопластов

В конструкции могут быть предусмотрены ловушки для сбора избыточного количества клея. Соединение «на ус» обладает повышенной работоспособностью по сравнению со стыковым соединением. Однако V-образное в нахлестку и соединение «шип в паз» лучше позиционируются и имеют большую несущую способность. V-образное соединение обеспечивает позитивное позиционирование, а также высокую прочность при растяжении. Соединение обеспечивает капал для размещения клеевого слоя в процессе сборки соединения в нахлестку и соединения «шип в паз» имеют высокую прочность и позволяют выпрямлять детали. Соединения «шип в паз» могут потребовать локального увеличения толщины стенки в зоне стыка и строгого контроля допусков на размеры соединяемых деталей. Они широко используются для литых под давлением деталей, предоставляя возможность увеличения канала для размещения клеевого слоя. При изготовлении литьем под давлением деталей, которые планируется склеивать, особое значение имеет расположение литников. Литники должны быть удалены от склеиваемых поверхностей, поскольку остаточные напряжения в зоне их контакта с деталью могут привести к растрескиванию и образованию волосных трещин при подготовке склеиваемых поверхностей, либо из-за обработки их химикатами, либо под влиянием самих клеев.

6.7. Соединение с помощью растворителей

Этот метод соединения¹ наиболее часто используется для соединения пластмассовых деталей из аморфных термопластов. При его выполнении соединяемые детали обрабатывают растворителем, который вызывает набухание и размягчение поверхностей. Детали затем фиксируют и прижимают друг к другу до момента полного удаления растворителя. По сути, это процесс сварки, при котором подвижность молекул и взаимная диффузия облегчается с помощью растворителя, а не за счет увеличения температуры [16,99,100]. Процесс в большей степени используется для соединения деталей из аморфных термопластов, так как частично кристаллические термопласты имеют хорошую стойкость к действию растворителей. Лучше всего соединять детали из одинаковых термопластов. Однако соединению могут быть подвергнуты детали из разнородных пластмасс, которые должны растворятся в общем растворителе. Можно использовать смесь растворителей, каждый из которых по отдельности растворяет один из разнородных термопластов.

КЛТР разнородных материалов при этом должны быть очень близки, поскольку между соединяемыми деталями не существует промежуточного слоя, например, гибкого клеевого слоя, который мог бы компенсировать несовпадение коэффициентов.

Процесс соединения с помощью растворителя начинается с обработки растворителем одной или обеих соединяемых поверхностей. Детали, которые имеют одну поверхность для соединения, просто прижимают к губке или войлочной прокладке, предварительно пропитанной растворителем. Количество растворителя должно быть минимальным, чтобы исключить образование потеков и возможно трещин. После нанесения растворителя детали должны быть либо немедленно приведены в контакт и выдержаны в таком состоянии короткое время для набухания без чрезмерной потери

¹ Данный метод давно называют сваркой растворителем. — *Примеч. науч. ред.*

легколетучего растворителя. Детали затем сжимаются и под давлением находятся в течение требуемого времени от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от конструкции соединения и выбранного растворителя. Чтобы получить соединение воспроизводимого качества, для фиксации деталей рекомендуется использовать пневматическое устройство, оснащенное таймером. Затем соединенные детали извлекаются из зажимного устройства и их оставляют в таком состоянии в течение нескольких часов для того, чтобы соединение достигло прочности соединяемых материалов. Для ускорения испарения растворителя и сокращения производственного цикла может быть использован нагрев деталей. Выбор растворителя зависит от ряда факторов: требуемой продолжительности процесса; упругости (давление) пара; параметра растворимости; безопасности; возможности растрескивания или образования волосяных трещин. Во многих случаях используется смесь растворителей, обладающая балансом свойств. Соединения должны осуществляться по плоским поверхностям и соответствовать самым жестким требованиям. Правильно совместить детали помогают штифты. Соединения типа «шип в паз» могут быть применены для мелких деталей, так как в этом случае «захват» растворителя удастся избежать. Оставшийся растворитель может вызвать образование волосяных трещин и привести к разрушению деталей. Подлежащие соединению с помощью растворителя детали должны быть отлиты под давлением с минимальными остаточными напряжениями и во многих случаях подвергаются отжигу перед сборкой. Литники должны быть расположены вдали от зон соединения. Кроме того, необходимо проявлять осторожность при работе с «закрытыми» деталями, когда растворитель может остаться внутри детали. Соединение с помощью растворителя относительно простой и недорогой метод который может быть использован в производстве прочных и герметичных изделий из аморфных термопластов. Низкая вязкость растворителей требует, чтобы соединяемые детали не имели искривлений и были отлиты под давлением относительно точно. Для получения соединений деталей, допускающие большие между ними зазоры, можно использовать присадочный материал, представляющий собой раствор соединяемого полимерного материала. К сожалению, этот процесс требует применения растворителей. Особое внимание при этом необходимо уделять вопросу сохранения здоровья персонала и о защите окружающей среды. Поэтому он применяется только в тех случаях, когда другие методы сборки непригодны.

6.8. Литература

1. Bassler, R, Kunststoffe, 76 (9) 777 (1986).
2. Boothroyd, G. and Dewhurst, P., Product Design for Assembly, Boothroyd Dewhurst. Incorporated Wakefield, RI(1989).
3. Stokes, V., SPE Annual Technical Conference, 35 442 (1989).
4. Nussbaum, B., Business Week, 102, September 17 (1990).
5. Kaeufer, H., Kunststoffe, 79 (4) 339 (1989).
6. Miller, E., Plastics Product Design Handbook, Marcel Dekker, Inc., NY (1981).
7. Anonymous, Plastics Design Forum , 2 (2) 34 (1977).
- 8,9. Lee, C, and Dubin, A, SPE Annual Technical Conference, 34 1564 (1988). Lee, C, Dubin. A., and Jone, E., Plastics Design Forum, 1 2 (5) 65 (1987).
10. Trantina, G., and Minnichelli, M., SPE Annual Technical Conference, 33, 438 (1987).
11. Technical Bulletin, Snap Fit Joints in Plastics, Miles Corporation, Pittsburgh, PA (1990)

12. Wuebben, G., *Plastics Design Forum*, 9 (3) 37 (1984).
13. McIntyre, R., *Plastics Design Forum*, 9 (4) 35 (1984).
14. Schonewald, H., *Kunststoffe*, 79 (8) 46 (1989).
15. Technical Bulletin, *Mechanical Fastening*, Miles Corporation, Pittsburgh, PA. 451.
16. Technical Bulletin, *General Electric Data Base Design Guide*, General Electric Co., Pittsfield, MA.
17. La Verne, L., *Plastics Design Forum*, 16 (4) 25 (1991).
18. La Verne, L., *Plastics Design Forum*, 15 (4) 17 (1990).
19. Lincoln, B., Gomes, K., and Braden, J., *Mechanical Fasteners for Plastics*, Marcel Dekker, NY (1984).
20. Shigley, J., and Mischke, C., *Fastening, Joining and Connecting*, McGraw Hill, NY (1986).
21. Bauhof, M., *Maintaining Bolt Preload in Plastic Assemblies*, DuPont, Wilmington, DE.
22. Moore, G. and Kline, D., *Properties and Processing of Polymers for Engineers*, Prentice-Hall, Englewood, NJ (1984).
23. Technical Bulletin, *Fastening Systems*, Catamount Manufacturing, Inc., Orange, MA.
24. Technical Bulletin, *Emhart Fastening System Group*, Heli-coil Division, Danbury, CT.
25. Braden, J., *Plastics Design Forum*, 9 (5) 64 (1984).
26. Englehart, W. and Richter, C., *Modern Plastics*, 54 (7) 72 (1977).
27. Keller, C., *Plastics Design Forum*, 8 (6) 56 (1983).
28. Anonymous, *Plastics Design Forum*, 1 (6) 76 (1976).
29. Malloy, R., Orroth, S., and Arnold, E., *Plastics Engineering*, 41 (4) 43 (1985).
30. Burton, J., *Plastics Design Forum*, 15 (6) 45 (1990).
31. Technical Bulletin, *Dupont Design Guide, Assembly Techniques*, DuPont, Wilmington, DE.
32. Wagner, D., *Modern Plastics Encyclopedia*, 54 (10) 425 (1977).
33. Massey, F.L., *Modern Plastics*, 54 (9) 90 (1977).
34. Massey, F.L., *SPE Annual Technical Conference, Reinforced Plastics*, 32 2-F 1 (1977).
35. Technical Bulletin, *ITW Shakeproof*, Illinois Products, Elgin, IL.
36. Technical Bulletin, *Plastite®*, Continental/Midland, Park Forest, IL.
37. Technical Bulletin, *PT® Fasteners*, ATF, Inc., Lincolnwood, IL.
38. Technical Bulletin, *Poly fast® Fastener Data*, N L Industries, Statesville, NC.
39. Reib, M., *Kunststoffe*, 67 (3) 17 (1977).
40. TRW, *Painut Division*, Mountainside, NJ.
41. Camcar Textron, Rockford, IL.
42. Tinnerman®, *Eaton Corporation, Engineered Fastener Div.*
43. Klein, A., *Plastics Design Forum*, 13 (5) 39 (1988).
44. Crate, J. H., *Plastics Design Forum*, 6 (6) 61 (1981).
45. Galli, E., *Plastics Design Forum*, 11 (3) 29 (1986).
46. Beck, R., *Plastics Product Design*, Van Nostrand Reinhold Co., NY (1980).
47. Tews, H., *SPE Annual Technical Conference*, 35, 1689 (1989).
48. Strasser, E., *Plastics Engineering*, 36 (10) 17 (1980).
49. Wilder, R., *Modern Plastics*, 67 (9) 65 (1990).
50. Technical Bulletin, *Vestoran®*, Bunawerke Huls GmbH, K&K Technologies, Akron, OH (1988).
51. *Ultrasonic Plastics Assembly*, Bronson sonic Power Company, Danbury, CT (1979).
52. Tobias, T., *Plastics Design Forum*, 7 (1) 80 (1982).
53. Wool, R., Yuan, B., and McGahey, *Polymer Engineering & Science*, 29 (19) 1340 (1989).
54. Stokes, V., *Polymer Engineering & Science*, 29 (19) 1310 (1989).
55. Plender, A., *World Plastics & Rubber Technology*, 17 (1991).

56. Anonymous, *Plastics Design Forum*, 5 (6) 81 (1980).
57. Wolcott, J., *SPE Annual Technical Conference*, 36, 1829 (1990).
58. Jaarsma, F, *SPE Annual Technical Conference*, 28, 316 (1982).
59. Herrmann, T., *Kunststoffe*, 77 (7) 15 (1987).
60. Sager, T, *United States Patent*, No.4,618,5 16, October 1, 1986.
61. Baudendistel, S.and Herrmann, Th., *Kunststoffe*, 79 (10)____(1989).
62. *Engineering Data Base Design Guide*, General Electric Company, Pittsfield, MA.
63. Gallagan, S., *Plastics Engineering*, 41 (7) 35 (1985).
64. Benatar, A., and Eswaran, R., *SPE Annual Technical Conference*, 35, 514 (1989).
65. Benatar A., Eswaran, R., and Najar, S., *Polymer Engineering & Science*, 29 (23) 1689 (1989).
66. Benatar, A., & Cheng, Z., *Polymer Engineering & Science*, 29 (23) 1699 (1989).
67. Pontente, H., *Kunststoffe*, 70 (4) 6 (1980).
68. Land, W., *Kunststoffe*, 76 (9) 3 (1986).
69. Mock, J., *Plastics Engineering*, 39 (6) 27 (1983).
70. Mengason, J., *Plastics Engineering*, 36 (8) 20 (1980).
71. Pontente, H. and Kaiser, H., *Polymer Engineering & Science*, 29 (23) 1661 (1989).
72. Schalarb, A., and Ehrenstein, G., *Polymer Engineering & Science*, 29 (23) 1677 (1989).
73. Tappe, P. and Potente, H., *Polymer Engineering & Science*, 29 (23) 1655 (1989).
74. La Bounty, T, *SPE Annual Technical Conference*, 3 1, 855 (1985).
75. Thews, II., *Kunststoffe*, 71 (10) 81 (1981).
76. Kenney, W., *Dupont Design Guide*, «Joint Design a Critical Factor in Strong Bonds», DuPont, Wilmington, DE.
77. Anonymous, *British Plastics & Rubber*, January, 28 (1986).
78. Chookazian, M., *Modem Plastics Encyclopedia*, 68 (11) 345 (1992).
79. Leatherman, A., *Modem Plastics Encyclopedia*, 68 (11)347(1992).
80. Chookazian, S., *SPE Annual Technical Conference*, 36, 1834 (1990).
81. Leatherman, A., *SPE Annual Technical Conference*, 29, 214 (1983).
82. Emabond Systems, Inc., *Ashland Chemical Company*, Norwood, NJ.
83. Hellerbond Division, *Alfred F Leatherman Co.*, Columbus, OH.
84. Ryan, C, *Modern Plastics Encyclopedia*, 68 (11) 347 (1992).
85. Watson, M., and Murch, M., *SPE Annual Technical Conference*, 35 446 (1989).
86. Land, W., *Kunststoffe*, 76 (9) 3 (1986).
87. Miller, R., and Winklemart, D., *Plastics Engineering*, 36 (4) 38 (1980).
88. Atkinson, J., and Turner, B., *Polymer Engineering & Science*, 29 (19) 1368 (1989).
89. *Technical Bulletin 53*, *Leister Hot Air Tools*, Switzerland.
90. Michel, P., *Polymer Engineering & Science*, 29 (19) 1376 (1989).
91. Cagle, C.V., *Handbook of Adhesive Bonding*, McGraw Hill, NY (1973).
92. Petrie, E., *Adhesives Age*, 6, May 15 (1989).
93. Petrie, E.M., *Handbook of Plastics and Elastomers*, McGraw Hill, NY (1975).
94. Rauhut, H., *Plastics Design & Processing*, 22, April (1971).
95. Snagren, R.C., *Handbook of Surface Preparations*, Palmerton Publishing Co., Inc., NY (1973).
96. Kaplan, S. and Rose, P., *SPE Annual Technical Conference*, 34, 1542 (1988).
97. Mohan, R., *Plastics Engineering*, 46 (2) 47 (1989).
98. Durn, L., Moniatis, G. and Rasche, M., *Kunststoffe*, 79 (7) 3 (1989).
99. Klein, A., *Plastics Design Forum*, 14 (3) 59 (1959).
100. Licata, M. & Haag, E., *Plastics Engineering*, 42 (6) 53 (1986).

Алфавитно-предметный указатель

- Адаптер 79
- Азот 138
- Американское общество по испытанию материалов 174
- Анализ
 - компьютерный 41, 67, 110, 144, 227, 323
 - методом конечных элементов 226, 240
 - экспериментальный 224, 249, 359
- Анизотропия
 - свойств 35, 38
 - усадки 98
- Антиоксидант 18, 23
- Антипирен 18, 74, 466
- Арматура 437
- Балка 252, 271, 278, 399
 - двутавровая 260
 - с ребрами 265
- База данных 215
- Бобышка 88, 118, 407, 421
 - сквозная 424
- Вэгли* алгоритм 50
- Вентилирование вакуумное 78
- Вибрационная сварка трением 466
 - прямолинейная 467
 - угловая 467
- Винт 405
 - Plastite* 419
 - Polyfast* 420
 - PT* 419
 - машинный 406
 - самонарезающий 405, 415
 - создающий резьбу 410, 417
- Вискозиметр капиллярный 50
- Влажность относительная 177, 245
- Волокно
 - армирующее 106
 - стеклянное 18, 23, 150
- Воспламеняемость 22
- Впрыск последовательный 83
- Впуск 25
 - газа 141
 - многоточечный 65, 77, 101
- Впускной литник 25, 61, 63, 85
- Время
 - выдержки 85
 - заполнения формы 50, 85
 - охлаждения 110, 134
 - уплотнения 85

Вставка

- запрессованная 440
- заформованная 432
- из низкоплавких металлических сплавов 129
- извлекаемая 128
- расширяющаяся 445
- резьбовая 405
- складывающаяся 131
- создающая резьбу 442

Выдержка под давлением 25,34**Выступ кольцевой 385****Выталкивание 25,113****Вязкость**

- кажущаяся 50, 53,54
- расплава 16
- сдвиговая 48-50

Гайка406

- нажимная 431

Головка заклепки 461**Гомополимер 14****Горючесть 212****Градиент скоростей течения 33,52****Давление**

- в формующей полости 100, 103
- выдержки 87
- газа 139
- газа внутреннее 148
- контактное 134,379,383

Датчик деформации 361**Деструкция термическая 11****Деформация 378,401**

- истинная 180
- предельная 180
- при кручении 307, 378
- сдвиговая 98
- текучести 180

Дисковая схема 28**Диссипация вязкостная 21****Длина зацепления винта 413****Добавка 18, 22, 465****Допуск на размеры 98,128,395****Зависимость напряжения от деформации 176,194, 240****Завихрение потока расплава 59****Заклепка432****Закругление 39,88,171,262****Замковое соединение 385**

- кольцевое 387

- поворотное 385

- разъемное 386

Заполнение формы 25,26,40, 58, 59, 140**Затвердевание 110****Знак423**

- вентиляционный 78

- с возвратно-поступательным перемещением 82

Изгиб 183**Индекс**

- кислородный 212

- полидисперсности 15

Испытания

- Ей 94 212

- на задымление 212

- по *Изоду* 201

- по *Шарпи* 203

- на удар падающим грузом 203

- на усталость 315

- с использованием растворителей 367

- фотоупругие 367

Канал

- вентиляционный 343

- газовый 138,141,144

- прямоугольный 48

- спиральный 44

- цилиндрический 48

Карта контроля продукции 171-173**Качество поверхности 149,339****Клеевое соединение 480,483****Клей**

- на основе мономеров 487

- на основе форполимеров 488

- расплав488

- раствор полимеров 487

- Клепка ультразвуковая 460
Клипса *Tegnetan* 430
Кнопка 432
Колонна 309
Колпачок бобышки 428
Композиционные полимерные материалы 14
Конусность 114
Концентратор энергии 450,451
Концентрация напряжений 230,402
Координатно-измерительная машина 358
Копер маятниковый 201
Коробление 26, 35, 85,98,103,108
Косынка 262,309,421
Коэффициент
 использования глубина резьбы
 винта 413
 запаса прочности 247
 концентрации напряжений 231,250
 линейного теплового расширения
 210,375,406
 пропускания света 20
 Пуассона 184
 сжимаемости 91
 сохранения прочности 73
 теплового расширения 23,168,210
 трения 124,379
Краситель 20
Крепежная деталь 404
 нажимная 429
 наворачиваемая 430
Кривизна надреза 203
Кривые
 кратковременные зависимости
 напряжения от деформации 176
 ползучести 190,193
 течения 48
Кристалл 13
Кристаллизация вторичная 96
Кручение 303
 круглых стержней 303
 некруглых стержней 307
Крючок 227, 385, 387, 394
Лазерное спекание порошковых материалов 336
Линия
 разъема формы 131
 спая 26,42, 65, 70, 323, 433
 спая сплавленная 71
 спая стыковая 71
Литник
 внутренний 65
 впускной 25,61,63,85
Литниковая система 26,27,42,48, 56, 85, 343
 горячеканальная 31
Литье под давлением 24
 «сэндвич» 153
 компрессионное 155
 многокомпонентное 152,438
 с газом 136,138
 с управляемой ориентацией за
 счет сдвига 79
 с циклическим воздействием
 на расплав 79
 со вспениванием 145
Литье под низким давлением 342
 со вспениванием 146,357
 с противодавлением 151
Литьевая форма 343,433
 вращающаяся 438
 двухплитная 28
 для изготовления прототипов 347
 гипсовая 350,357
 корпусно-металлическая 352, 357
 многогнездная 60
 семейная 60
 трехплитная 30
 эпоксидная 352,357
Литьевое прессование 155
Ловушка воздушная 26
Мастер-модель 343
Матрица 120
 вращающаяся 82

- Международная организация по стандартам 174
- Метод
 - маятниковый 479
 - муаровых полос 370
 - параллельного проектирования 24,162
 - поэтапного проектирования 161
 - хрупких покрытий 360
- Механическая обработка 324
- Модуль
 - кажущийся 244
 - начальный 180,242
 - ползучести 186
 - при изгибе 183
 - при сдвиге 183
 - растяжения 242
 - релаксационный 244,276
 - секущий 181,402
 - сжатия 242
 - упругости 180
- Молекулярная масса 14,16
 - среднемассовая 15
 - среднечисловая 15
- Молекулярно-массовое распределение 14,15
- Момент
 - изгибающий 253
 - крутящий 412,413
 - осевой инерции сечения 253
 - полярный инерции 305
 - скручивающий 304, 307
 - сопротивления сечения 256
- Нагрев индукционный 129
- Нагрузка 236, 245, 274, 281, 287
 - динамическая 311
 - периодическая 237,312
 - статическая 237
 - ударная 317
- Наполнитель 18,23, 74,106,465
- Направляющая потока 55
- Напряжение 253, 358,399,434
 - внутреннее 34,85,98,329
 - истинное 180
 - локальное 67
 - механическое 66
 - растягивающее 136,192,251
 - сдвига 46
 - сжимающее 310
 - остаточное 26
- Недолив 26,138
- Никелирование поверхности 123
- Обесцвечивание 29
- Оболочка 297
- Обработка
 - механическая 324
 - ручная 340
 - холодной плазмой 491
- Объемное окрашивание 20
- Ограничитель потока 55, 61
- Окисление 11
- Окружающая среда 276
- Опалубка 343
- Опора 234, 287, 293
 - направляющая 234
 - простая 236,273
 - свободная 235
 - удерживающая 236
 - фиксирующая 236,273
- Ориентация 32
- Осадка 439
- Ось
 - нейтральная 255,268
 - центральная 255,268
- Отверстие 126
 - направляющее 412,422
- Охлаждение 25, 99,103,109,134
- Ошибки конечные 50
- Перепад давления 40,45,48,54,101
- Переработка повторная 11,13
- Перетекание потока расплава 59
- Пигмент 20,466
- Пластикация 12
- Пластина 285,296
- Пластификатор 18,466
- Пластометр 214

- Плита 285
 под модельная 343
Плоскость разъема формы 78
Плотность 19
Поднутрение 126
Побеление 193
Пожелтение 19
Ползучесть 186, 239, 243
Показатель текучести расплава 17, 213
Покрывание
 изолирующее 33
 поверхности 123
Полимеризация 15, 19
Полость усадочная 88
Полуматрица раздвижная 114
Помутнение 19, 29
Порообразователь 147, 151
Послойное наложение расплавленной
 полимерной нити 338
Поток расплава
 ламинарный 45, 52
 радиальный 102
Предел
 пропорциональности 179
 упругости 179
 текучести 179
 текучести допустимый 180
 прочности 180
Прессовое соединение 376
Приварка штифтов 460
Прилив под толкатель 118, 264
Принцип суперпозиции 239
Прозрачность 19
Прототип
 изделия 26, 232, 356, 359
 универсальный 219
Прототипирование 174, 249, 322, 356
 лазерное спекание порошковых ма-
 териалов 336
 послойное наложение расплавлен-
 ной полимерной нити 338
 склеивание слоев 339
 фотополимеризация 331
Прочность
 механическая 16
 на изгиб 38
 усталостная 38, 205, 315
Пруток сварочный 477
Пуансон 114, 120, 128, 134
 складывающийся 131
Пуассона коэффициент 184
Пята шаровая 385
Радиальная схема 28
Радиус инерции 256
Разрушение сдвиговое 46
Растворитель 79, 366, 495
Реабсорбция влаги 96
Реактопласт 13
Ребро жесткости 88, 99, 104, 109,
 118, 171, 261, 309
Резисторная сварка 474
Релаксация 39, 99
 напряжений 197, 198, 239, 247
Реометр шелевой 50
Ротационная сварка 469
Сварка 446
 вибрационная трением 466
 нагретым газом 477
 нагретым инструментом 474
 резисторная 474
 ротационная 469
 ультразвуковая 447
 электромагнитная (индукци-
 онная) 472
Свойства материала 276, 288, 294,
 305
 кратковременные 241
 механические 21, 175, 186, 240
 текучести расплава 213
 термоизолирующие 22
 термомеханические 206
 электроизоляционные 22
 упругие 240
 усталостные 204
Серебристость 29
Силы межмолекулярного взаимо-
 действия 12

- Система
 - выталкивания 30
 - измерения бесконтактная 358
 - измерения контактная 358
- Скорость
 - впрыска 42
 - объемного течения расплава 52
 - охлаждения ПО
 - сдвига 46, 53, 214
 - сдвига кажущаяся 48, 52
- След
 - литника 28, 30, 32
 - толкателя 30
- Смазка 123
- Смачивание 484
- Соединение
 - встык 450, 494
 - замковое 384
 - клеевое 480
 - механическое 404
 - на ус 458, 494
 - прессовое 376
 - сварка 446
 - со сдвигом материала 457
 - с помощью растворителей 495
 - ступенчатое 455
 - шип в паз 456, 494
- Сопло
 - горячеканальной системы 83
 - самозапирающееся 60
 - термопластавтомата 32, 42, 79
- Сополимер 14, 19
- Сосуд давления 297
 - толстостенный 302
 - тонкостенный 299
- Стабилизатор 18
- Станок с ЧПУ 329
- Старение 211
- Степень
 - кристалличности 13
 - ориентации 32
 - релаксации 32
- Стереолитография 331
- Стойкость к химическому воздействию 21
- Струйное заполнение 61, 65
- Сушка 96
- Сшивка 13
- Текстура поверхности 122, 171
- Температура 245
 - изделия 86
 - литьевой формы 20, 32, 85
 - переработки 20, 50
 - плавления 206
 - размягчения по Вика 112, 209
 - расплава 20, 42, 47, 50, 85, 110
 - стеклования 112, 207
 - сушки 20
- Температуропроводность 113
- Тензодатчик 361
- Теплопроводность удельная 21
- Термопласт 11
 - аморфный 12, 89, 206, 462
 - вспенивающийся 137, 145, 153
 - жидкокристаллический 13
 - частично кристаллический 13, 89, 104, 207, 464
- Термостойкость деформационная 209
- Толкатель 125, 397
 - наклонный 396
- Толщина стенки 57, 85, 86, 87, 108, 148, 314
- Точка плавления 16
- Трение внутреннее 21
- Трещина волосая 192, 246, 377
- Угол
 - линии сая 71
 - обратный 386
 - уклона 114, 171
 - установочный 386
- Ударная
 - вязкость 35, 182
 - прочность 200
- Уплотнение расплава 143
- Усадка 55, 85, 104
 - анизотропная 98
 - линейная 94

- объемная 91
- ориентационная 98
- Усилие
 - выталкивания 120,133
 - извлечения винта 414
 - размыкания 86,155
 - смыкания 86,148,155
- Устойчивость к атмосферному воздействию 22
- Утяжина усадочная 88,118
- УФ
 - излучение 19
 - стабилизатор 18,23
- Фиксация изделия 86
- Формующая полость 25
- Фотополимеризация 331
- Фотоупругость 367
- Фронт потока 55
- Холодная капля 32,46
- Хромирование поверхности 123
- Центр тяжести 255
- Шайба 406,420
- Шероховатость поверхности 120, 490
- Шлифование 120,466
- Шов сварной 452
- Шпилька
 - резьбовая 428
 - вдавливаемая 429
- Электромагнитная сварка 472
- Эскиз 167
- Эффект
 - макромолекулярного выстраивания 53
 - пластикация 21,22,96,177
 - сжатия расплава 28
- Эффективность термопластавтомата 20
- ASTM174,220
- CAD-система 167, 227, 323, 329, 369
- CAMPUS 218
- Evaluators* 219
- Fused Deposition Manufacturing* 338
- In-Mold Reciprocating Pins* 82
- ISO 174
- Laminated Object Manufacturing* 339
- Multi-Live Feed Injection Molding* 79
- Push-Pull Molding* 8\
- PVT-диаграмма 90,136,210
- Selective Laser Sintering* 336
- Shear Controlled Orientation-Injection Molding* 79
- SPE 340
- SPI339
- Stereo Lithography Apparatus* 331

Используемые единицы измерения размерности физических величин

Длина

1 дюйм	= 25,4 миллиметр (мм)
1 фут	= 0,3048 метр (м)
1 микрон (мкм)	= $140 \cdot 10^{-6}$ м
1 ярд	= 0,9144 м

Объем

1 сантиметр ³ (см ³)	= $1 \cdot 10^{-6}$ м ³
1 литр (л)	= 10^{-3} м ³
1 дюйм ³	= $1,639 \cdot 10^{-5}$ м ³
1 фут ³	= $2,832 \cdot 10^{-2}$ м ³
1 галлон	= $3,785 \cdot 10^{-3}$ м ³

Масса

1 унция	= $2,83 \cdot 10^{-2}$ кг
1 фунт	= $4,536 \cdot 10^{-1}$ кг

Плотность

1 грамм/сантиметр ³ (г/см ³)	= $1,0 \cdot 10^{-3}$ кг/м ³
1 г/см ³	= $3,61 \cdot 10^{-2}$ фунт/дюйм ³
1 фунт/дюйм ³	= $2,77 \cdot 10^{-2}$ кг/дюйм ³

Давление (напряжение)

1 Ньютон/метр ² (Н/м ²)	= 1,0 Паскаль (Па)
1 атмосфера (атм)	= $1,013 \cdot 10^5$ Па
1 фунт/дюйм ²	= $6,8947 \cdot 10^3$ Па
1 МПа	= 145 фунт/дюйм ²
1 атм	= 14,6885 фунт/дюйм ²
1 фунт/дюйм ²	= 0,0681 атм

Вязкость

1 пуаз (пз)	= 0,1 Па-с
1 фунт-с/дюйм ²	= $6,8947 \cdot 10^3$ Па-с
1 фунт-с/дюйм ²	= $6,8947 \cdot 10^3$ пз

Работа и энергия

1 эрг	= $1,0 \cdot 10^{-7}$ Джоуль (дж)
1 кг-м	= 9,81 Дж
1 Н-м	= 1 Дж