

Георг Менгес
Вальтер Микаэли
Пауль Морен

Как делать литьевые формы

Перевод с английского 3-го издания
под редакцией В. Г. Дувидзона и Э. Л. Калинчева

Санкт-Петербург
издательство
ПРОФЕССИЯ
2007

Содержание

Предисловие к третьему изданию	16
1. Материалы для деталей литевых форм	17
1.1. Стали	18
1.1.1. Общие сведения	18
1.1.2. Цементуемые стали	22
1.1.3. Азотированные стали	23
1.1.4. Стали сквозной закалки	26
1.1.5. Термообработанные стали в состоянии поставки	26
1.1.6. Мартенситные стали	27
1.1.7. Твердые сплавы для литевых форм	27
1.1.8. Коррозионностойкие стали	28
1.1.9. Рафинированные стали	29
1.2. Стальное литье	30
1.3. Цветные металлы	30
1.3.1. Медные сплавы	30
1.3.1.1. Сплавы бериллий–медь	30
1.3.2. Цинк и его сплавы	33
1.3.3. Сплавы алюминия	34
1.3.4. Сплавы висмут–олово	37
1.4. Материалы для электролитического осаждения	37
1.5. Обработка поверхности сталей для литевых форм	38
1.5.1. Общие сведения	38
1.5.2. Термообработка сталей	40
1.5.3. Термохимические методы обработки	40
1.5.3.1. Науглероживание	40
1.5.3.2. Азотирование	40
1.5.3.3. Борирование	41
1.5.4. Электрохимическая обработка	42
1.5.4.1. Хромирование	42
1.5.4.2. Никелирование	42
1.5.4.3. Процесс <i>NYE-CARD</i> (никель–фосфор–силикатные покрытия)	42
1.5.4.4. Твердосплавные покрытия	42
1.5.5. Покрытие при пониженном давлении	43
1.5.5.1. Процесс химического осаждения из газовой фазы	43
1.5.5.2. Процесс физического осаждения из газовой фазы	44
1.6. Лазерная обработка поверхности	45
1.6.1. Лазерное упрочнение и переплавка	46
1.6.2. Термохимические методы	46
1.7. Упрочнение электронным лучом	47
1.8. Технология <i>Lamcoat</i>	47

2.	Технология изготовления литевых форм	48
2.1.	Изготовление форм и формообразующих вставок литьем.	49
2.1.1.	Методы литья и литейные сплавы	49
2.1.2.	Литье в песчаную форму	50
2.1.3.	Технология точного литья	52
2.2.	Технологии ускоренной подготовки производства.	54
2.2.1.	Уровень развития технологий.	54
2.2.2.	Прямой метод получения технологической оснастки	57
2.2.2.1.	Прямое получение металлической литевой формы	57
2.2.3.	Непрямые методы быстрого получения оснастки (технологические цепочки)	63
2.2.3.1.	Цепочки с использованием позитивных моделей	63
2.2.3.2.	Цепочки с использованием негативных моделей	67
2.2.4.	Перспективы.	70
2.3.	Выдавливание	72
2.4.	Механическая обработка и другие виды обработки с удалением материала	74
2.4.1.	Методы механообработки	74
2.4.2.	Чистовая (окончательная) обработка поверхности	75
2.4.2.1.	Шлифование и полирование (ручное или механизированное)	76
2.4.2.2.	Вибрационное шлифование	77
2.4.2.3.	Пескоструйная обработка (шлифование)	77
2.4.2.4.	Внутренняя притирка	77
2.4.2.5.	Электрохимическое полирование	79
2.4.2.6.	Электроискровая полировка	79
2.5.	Методы электроискровой обработки.	80
2.5.1.	Электроэрозионная обработка (ЭЭО)	80
2.5.2.	Электроискровое резание плавающим проволочным электродом	84
2.6.	Электрохимическая обработка (ЭХО)	85
2.7.	Электрохимическое удаление материала — травление	85
2.8.	Состояние поверхности после электроэрозионного или химического воздействий — внешний вид.	88
2.9.	Лазерное гравирование.	89
2.9.1.	Быстрое прототипирование с помощью <i>LASERCAV</i>	90
2.10.	Литье под давлением с выплавляемым пуансоном.	91
2.10.1.	Литевые формы для работы с выплавляемыми пуансонами	94
2.10.1.1.	Литниковая система и впуск	97
2.10.1.2.	Термические аспекты конструирования формы	98
2.10.1.3.	Сдвиг пуансона	98
2.10.1.4.	Вентиляция	99
2.10.2.	Литевые формы для изготовления выплавляемых пуансонов	100
2.10.2.1.	Материал для пуансона	101
2.10.2.2.	Конструкция литевой формы	101
2.10.2.3.	Литниковая система	103
2.10.2.4.	Тепловой режим в формах для литья пуансонов	103
2.10.2.5.	Извлечение выплавляемых пуансонов из формы	104

3.	Определение стоимости изготовления литьевых форм	105
3.1.	Общая схема	105
3.2.	Методика определения стоимости формы	105
3.3.	Группа затрат I: формообразующие детали	111
3.3.1.	Расчет трудоемкости изготовления формующей полости	111
3.3.2.	Расчет коэффициента времени механической обработки	111
3.3.3.	Зависимость времени обработки от глубины формующей полости	112
3.3.4.	Расход времени на обработку поверхности полости	113
3.3.5.	Расчет времени для обработки линии разъема	113
3.3.6.	Поправка на качество поверхности	113
3.3.7.	Время механообработки для фиксации пуансонов	114
3.3.8.	Поправка на допуски	114
3.3.9.	Учет степени сложности и разнородности	115
3.3.10.	Поправка на количество формующих полостей	115
3.3.11.	Расчет времени изготовления электродов для электроэрозионной обработки	116
3.4.	Группа затрат II: пакет плит	116
3.5.	Группа затрат III: основные узлы и детали	116
3.5.1.	Литниковая система	118
3.5.2.	Система разводящих литниковых каналов	119
3.5.3.	Горячеканальные системы	119
3.5.4.	Система термостатирования	120
3.5.5.	Система выталкивания	120
3.6.	Группа затрат IV: специальные узлы и детали	120
3.7.	Другие методы расчета затрат	122
3.7.1.	Определение затрат по подобию	122
3.7.2.	Принцип иерархического поиска по подобию	124
4.	Литье под давлением	125
4.1.	Последовательность технологических операций	125
4.1.1.	Литье под давлением термопластов	127
4.1.2.	Литье под давлением «сшитых» полимеров	127
4.1.2.1.	Литье под давлением эластомеров	128
4.1.2.2.	Литье под давлением реактопластов	128
4.2.	Основные термины	129
4.3.	Классификация литьевых форм	129
4.4.	Функции литьевых форм	129
4.4.1.	Критерии классификации литьевых форм	131
4.4.2.	Основной порядок действий при конструировании формы	133
4.4.3.	Определение размера формы	133
4.4.3.1.	Максимальное количество формующих полостей	137
4.4.3.2.	Усилие смыкания	141
4.4.3.3.	Максимальная площадь смыкания	142
4.4.3.4.	Необходимый ход открытия	142

4.4.4.	Отношение длины потока к толщине стенки	142
4.4.5.	Расчет количества формующих полостей	144
4.4.5.1.	Алгоритм определения технически и экономически оптимального количества формующих полостей	148
4.4.5.2.	Затраты на испытания, наладку и эксплуатацию	157
4.5.	Размещение формующих полостей	159
4.5.1.	Общие требования	159
4.5.2.	Возможные решения	160
4.5.3.	Равновесие сил в литевой форме во время впрыска	160
4.5.4.	Количество линий разъема	161
5.	Конструирование литниковых систем	163
5.1.	Описание литниковой системы	163
5.2.	Концепция и определения различных типов литниковых каналов	164
5.2.1.	Стандартные литниковые системы	164
5.2.2.	Горячеканальные литниковые системы	164
5.2.3.	Холодные каналы	164
5.3.	Требования, предъявляемые к литниковой системе	165
5.4.	Классификация литниковых систем	165
5.5.	Центральный литник	169
5.6.	Конструкция разводящих литниковых каналов	171
5.7.	Конструкция впускных литниковых каналов	176
5.7.1.	Место впуска	179
5.8.	Разводящие каналы и впускные литники для реактопластов	182
5.8.1.	Эластомеры	182
5.8.2.	Реактопласты	183
5.8.3.	Влияние расположения места впуска при переработке эластомеров	184
5.8.4.	Литниковые каналы для высоконаполненных материалов	184
5.9.	Качественное (структура потока) и количественное моделирование процесса заполнения формы. (Имитационные модели)	186
5.9.1.	Введение	186
5.9.2.	Структура потока и ее значение	186
5.9.3.	Использование структуры потока для подготовки к моделированию процесса заполнения	187
5.9.4.	Теоретические основы метода структуры потока	189
5.9.5.	Порядок построения диаграммы структуры потока	190
5.9.5.1.	Изображение фронтов потока	190
5.9.5.2.	Радиус-вектор для выявления теневых участков	191
5.9.5.3.	Области с разной толщиной	193
5.9.5.4.	Структура потока на ребрах	197
5.9.5.5.	Структура потока изделий типа «коробка»	198
5.9.5.6.	Анализ критической области	199
5.9.5.7.	Заключение	200
5.9.6.	Количественный анализ заполнения	200
5.9.7.	Аналитическое проектирование литниковых каналов	201
5.9.7.1.	Реологические принципы [5.32]	201

5.9.7.2.	Определение свойств испытывающего сдвиг вязкого потока с помощью капиллярного вискозиметра	208
5.9.7.3.	Вязкость при растяжении	210
5.9.7.4.	Простые уравнения для расчета потерь давления в литниковых каналах	211
5.10.	Особые явления, связанные с многоточечным впуском	214
5.11.	Конструкция литниковых каналов для сшивающихся составов	215
5.11.1.	Эластомеры	215
5.11.1.1.	Расчет процесса заполнения	215
5.11.1.2.	Влияние параметров процесса на окна переработки	216
5.11.1.3.	Примеры и критика модели окон переработки	218
5.11.2.	Реактопласты	220
5.11.2.1.	Поведение расплава при литье реактопластов	220
6.	Конструирование впускных литниковых каналов	223
6.1.	Центральный литник	223
6.2.	Литник, подводимый к краю изделия, или веерный литник	224
6.3.	Дисковый литник	226
6.4.	Кольцевой литник	227
6.5.	Туннельный («подводный») литник	229
6.6.	Точечный отрывной литник в трехлитной литьевой форме	231
6.7.	Обратный центральный литник с отрывным точечным впуском	233
6.8.	Безлитниковое литье	235
6.9.	Литьевые формы с изолированными каналами	236
6.10.	Литниковые системы с контролем температуры — горячие каналы	240
6.10.1.	Горячеканальные системы	240
6.10.1.1.	Достоинства и недостатки горячеканальных систем	241
6.10.1.2.	Новые возможности и применение горячих каналов	242
6.10.1.3.	Конструкция горячеканальной системы, ее деталей и узлов	244
6.10.1.4.	Сопла для горячеканальных форм	252
6.10.1.5.	Данные, относящиеся к проектированию горячих коллекторов	256
6.10.1.6.	Нагрев горячеканальных систем	259
6.10.2.	Холодноканальные литниковые системы	263
6.10.2.1.	Системы холодных каналов для литья под давлением эластомеров	263
6.10.2.2.	Литьевые формы с холодноканальной системой для переработки реактопластов	269
6.11.	Специальные литьевые формы	271
6.11.1.	Двухэтажные формы	271
6.11.2.	Литьевые формы для многокомпонентного литья	274
6.11.2.1.	Формы для комбинированного литья	274
6.11.2.2.	Литьевые формы для сэндвич-литья	278
6.11.2.3.	Литьевые формы двоянного литья	278
7.	Вентилирование формы	279
7.1.	Пассивное вентилярование	279
7.2.	Активное вентилярование	285
7.3.	Вентилирование литьевых форм с противодействием газа	287

8. Система теплообмена	290
8.1. Время охлаждения	291
8.2. Температуропроводность некоторых полимеров	293
8.2.1. Температуропроводность эластомеров	294
8.2.2. Температуропроводность реактопластов	294
8.3. Расчет времени охлаждения для термопластов	296
8.3.1. Приближенная оценка	296
8.3.2. Определение времени охлаждения по номограммам	296
8.3.3. Время охлаждения при несимметричной температуре стенок	298
8.3.4. Время охлаждения деталей различной формы	299
8.4. Тепловой поток и мощность теплообмена	302
8.4.1. Тепловой поток	302
8.4.1.1. Термопласты	302
8.4.1.2. Терморреактивные материалы [8.16]	306
8.5. Аналитический расчет системы теплообмена на основе расхода тепла (общая схема)	313
8.5.1. Аналитический тепловой расчет	313
8.5.1.1. Расчет времени охлаждения	316
8.5.1.2. Баланс тепловых потоков	316
8.5.1.3. Расход охлаждающей жидкости	317
8.5.1.4. Температура канала охлаждения	319
8.5.1.5. Расположение каналов охлаждения	321
8.5.1.6. Конструкция охлаждающего контура	328
8.6. Расчеты при термическом проектировании форм	329
8.6.1. Двухмерные расчеты	329
8.6.2. Трехмерные методы	330
8.6.3. Упрощенная оценка теплового потока в критических точках изделия	331
8.6.4. Практическая коррекция охлаждения угловой зоны	332
8.7. Практическое конструирование систем охлаждения	332
8.7.1. Системы теплообмена для пуансонов и цилиндрических изделий	332
8.7.2. Системы охлаждения для плоских изделий	337
8.7.3. Герметизация системы охлаждения	341
8.7.4. Динамическое охлаждение литьевой формы	342
8.7.5. Предупреждение деформации углов отливаемых изделий вследствие неравномерности теплового потока	344
8.7.5.1. Холодный пуансон и теплая матрица	344
8.7.5.2. Коррекция формы угловых секций	345
8.7.5.3. Локальное изменение потока тепла	345
8.8. Расчет режима нагрева литьевых форм для терморреактивных материалов	346
8.9. Теплообмен в формах для терморреактивных материалов	346
8.9.1. Тепловой баланс	346
8.9.2. Распределение температуры	350
8.10. Практическое конструирование термоэлектрических нагревателей форм для реактопластов	351

9.	Усадка	353
9.1.	Введение	353
9.2.	Определение усадки	353
9.3.	Допустимые отклонения	355
9.4.	Причины усадки	356
9.5.	Причины анизотропной усадки	362
9.6.	Причины деформации	364
9.7.	Технологический процесс и усадка	365
9.8.	Вспомогательные средства определения величины усадки	368
10.	Проектирование конструкции литевой формы	369
10.1.	Деформация форм	369
10.2.	Анализ и оценка нагрузок и деформаций	369
10.2.1.	Определение действующих сил	370
10.3.	Основания для описания деформаций	371
10.3.1.	Простые вычисления для оценки формирования зазора	371
10.3.2.	Оценка формирования зазора и предотвращение облоя	373
10.4.	Наложение деформаций узлов и деталей формы	374
10.4.1.	Соединенные пружины в качестве эквивалентных элементов	375
10.4.1.1.	Параллельное соединение элементов	376
10.4.1.2.	Последовательное соединение элементов	376
10.5.	Расчет толщины стенок формирующей полости и их деформации	377
10.5.1.	Варианты нагрузок и соответствующие деформации	377
10.5.2.	Вычисление размеров цилиндрической матрицы	378
10.5.3.	Расчет размеров матрицы некруглого сечения	380
10.5.4.	Расчет размеров плит формы	381
10.6.	Методика расчета стенок матрицы с учетом внутреннего давления	382
10.7.	Деформация полуматриц и ползунов под внутренним давлением	383
10.7.1.	Литевые формы с раздвижными полуматрицами	383
10.8.	Подготовка к расчету деформации	388
10.8.1.	Геометрические упрощения [10.15]	392
10.8.2.	Примеры выбора граничных условий	393
10.9.	Примеры расчетов	395
10.10.	Прочие нагрузки	402
10.10.1.	Оценка добавочных нагрузок	403
11.	Сдвиг пуансонов	404
11.1.	Оценка наибольшего сдвига пуансона	404
11.2.	Сдвиг цилиндрического пуансона при боковом точечном впуске в основании (жесткое крепление)	405
11.3.	Сдвиг цилиндрического пуансона в форме с дисковыми впускными литниковыми каналами (жесткое крепление)	407
11.3.1.	Фундаментальное исследование сдвига	408
11.3.2.	Результаты вычислений	408

11.4.	Сдвиг пуансона при различных типах впускных литниковых каналов (жесткое крепление)	411
11.5.	Сдвиг рабочих деталей формы.	413
11.5.1.	Расчет деформации металлических вставок на примере цилиндрического вала [11.3].	413
11.5.1.1.	Определение линии смещения для деталей различной конфигурации	414
11.6.	Примеры конструкций крепления пуансона и регулирования глубины формирующей полости	416
12.	Извлечение отлитых изделий.	418
12.1.	Обзор систем выталкивания.	418
12.2.	Конструкция систем выталкивания — усилия выталкивания и открытия [12.4].	420
12.2.1.	Общие сведения.	420
12.2.2.	Методы расчета усилий выталкивания.	424
12.2.2.1.	Статические коэффициенты трения для определения усилий выталкивания и открытия.	424
12.2.2.2.	Метод оценки усилий для извлечения (съема) цилиндрических втулок	425
12.2.2.3.	Прямоугольные втулки	430
12.2.2.4.	Конические втулки	430
12.2.2.5.	Обобщение ряда основных случаев	431
12.2.3.	Усилия выталкивания для сложных изделий на примере крыльчатки	431
12.2.4.	Количественный расчет процесса выталкивания изделий (для эластомеров).	436
12.2.5.	Определение усилий открытия	440
12.2.5.1.	Изменения состояния на <i>PVT</i> -диаграмме для литевых форм различной жесткости	441
12.2.5.2.	Косвенные усилия открытия	442
12.2.5.3.	Полное усилие открытия	442
12.3.	Типы толкателей.	442
12.3.1.	Конструкция и размеры цилиндрических толкателей.	442
12.3.2.	Точки контакта толкателей и других элементов системы выталкивания	445
12.3.3.	Системы выталкивания	449
12.4.	Приведение системы выталкивания в движение.	451
12.4.1.	Способы приведения в движение и выбор мест контакта.	451
12.4.2.	Способы приведения в движение	452
12.5.	Специальные системы выталкивания	454
12.5.1.	Механизм двойного выталкивания.	454
12.5.2.	Комбинированное выталкивание	456
12.5.3.	Литьевые формы с тремя плитами	457
12.5.3.1.	Перемещение плиты съема тягами.	457
12.5.3.2.	Система выталкивания с замком.	457
12.5.3.3.	Обратное выталкивание со стороны неподвижной полуформы	459
12.6.	Возврат толкателя	459
12.7.	Извлечение изделий с поднутрениями	464

12.7.1.	Извлечение изделия с поднутрениями с помощью выталкивания	464
12.7.2.	Допустимая глубина поднутрений для защелок	465
12.8.	Извлечение резьбовых изделий	467
12.8.1.	Извлечение изделий с внутренней резьбой	467
12.8.1.1.	Съем резьбовых изделий	467
12.8.1.2.	Складывающиеся пуансоны	467
12.8.1.3.	Литьевые формы со сменными пуансонами	468
12.8.2.	Литьевая форма с механизмом для вывинчивания	469
12.8.2.1.	Полуавтоматическая литьевая форма	470
12.8.2.2.	Полностью автоматическая литьевая форма	470
12.8.3.	Извлечение изделий с внешней резьбой	478
12.9.	Поднутрения в нецилиндрических изделиях	479
12.9.1.	Внутренние поднутрения	479
12.9.2.	Внешние поднутрения	479
12.9.2.1.	Литьевая форма с ползунами	481
12.9.2.2.	Литьевая форма с раздвижными полуматрицами	487
12.9.3.	Литьевые формы с механизмом отвода пуансонов	491
13.	Центрирование и смена литьевых форм	493
13.1.	Задачи центрирования	493
13.2.	Регулировка осей узла пластикации	493
13.3.	Внутренняя центровка элементов	494
13.4.	Центрирование больших литьевых форм	498
13.5.	Смена литьевых форм	501
13.5.1.	Системы ускоренной смены форм при переработке термопластов	501
13.5.2.	Смена форм для переработки эластомеров	508
14.	Конструирование литьевых форм с помощью компьютера и использование CAD-систем	510
14.1.	Введение	510
14.1.1.	Метод структуры потока	510
14.1.2.	Разработка конфигурации	511
14.1.3.	Освоение сложных алгоритмов	512
14.1.4.	Моделирование используется недостаточно	512
14.1.5.	Проще и с меньшими затратами	512
14.1.6.	Перспективы	513
14.2.	Применение CAD-систем в конструировании литьевых форм	513
14.2.1.	Введение	513
14.2.2.	Принципы CAD	514
14.2.2.1.	Двух- и трехмерные модели	514
14.2.2.2.	Повышение производительности CAD с помощью ассоциативности, параметрических моделей, геометрических и функциональных характеристик	517
14.2.2.3.	Интерфейсы и интегрированные системы CAD	519
14.2.2.4.	Организация прохождения данных и поток информации	523

14.2.3.	Применение автоматизированного проектирования в изготовлении форм .	524
14.2.3.1.	Моделирование	524
14.2.3.2.	Интеграция функций изготовления форм	529
14.2.3.3.	Расширение функциональности в специальных приложениях	533
14.2.3.4.	Возможность комплексного инженерного подхода к проектированию с применением <i>CAD</i>	533
14.2.4.	Выбор и внедрение <i>CAD</i> -систем	535
14.2.4.1.	Этапы выбора системы	536
14.2.4.2.	Определение общего замысла применения <i>CAD</i>	538
14.2.4.3.	Определение эффективности системы проверкой по контрольному образцу	539
14.2.4.4.	Внедрение <i>CAD</i>	541
15.	Обслуживание литевых форм	543
15.1.	Преимущества графиков обслуживания	545
15.2.	Плановое обслуживание	546
15.2.1.	Сбор данных	546
15.2.2.	Анализ данных и выявление слабых мест	549
15.2.3.	Компьютерная поддержка	550
15.3.	Уход за формами и их хранение.	551
15.4.	Ремонт и реконструкция форм	554
16.	Измерения в литевых формах	559
16.1.	Датчики	559
16.2.	Измерение температуры	559
16.2.1.	Измерение температуры расплава с использованием инфракрасных датчиков	559
16.3.	Измерение давления	560
16.3.1.	Цель измерения давления	560
16.3.2.	Датчики для измерения давления расплава	560
16.3.2.1.	Прямое измерение давления.	561
16.3.2.2.	Косвенные методы измерения давления	562
16.4.	Использование датчиков	563
16.5.	Оптимизация технологического процесса	563
16.6.	Контроль качества	565
17.	Стандартные детали и узлы литевых форм.	568
18.	Регуляторы температуры (термостаты) в литевых формах	576
18.1.	Функции, методы, классификация	576
18.2.	Регулирование	577
18.2.1.	Методы регулирования.	577
18.2.2.	Необходимые условия качественного регулирования.	579
18.2.2.1.	Термостаты	581
18.2.2.2.	Нагревательная, охлаждающая и перекачивающая способность.	581
18.2.2.3.	Датчики температуры	582
18.2.2.4.	Установка датчиков температуры в форме	582

18.2.2.5. Система теплообмена в форме	583
18.2.2.6. Возможности поддержания стабильной температуры.	584
18.3. Выбор оборудования	584
18.4. Соединительные элементы формы и оборудования — меры безопасности	585
18.5. Теплоноситель	586
18.6. Техническое обслуживание и чистка	587
19. Способы устранения дефектов, возникающих в процессе литья под давлением	589
20. Специальные технологии литья под давлением и специальные литьевые формы	593
20.1. Микрولитье	593
20.1.1. Технология литья и управление процессом.	593
20.1.2. Изготовление микроматриц	597
20.1.2.1. Кремневая технология	598
20.1.2.2. Технология <i>LiGA</i>	599
20.1.2.3. Технология <i>LiGA</i> с использованием лазера	600
20.1.2.4. Лазерное резание	600
20.1.2.5. Электроискровая обработка	602
20.1.2.6. Микромеханическая обработка	602
20.2. Декорирование изделий в процессе литья под давлением	604
20.3. Переработка жидкого силиконового каучука	607
20.3.1. Вакуумирование	608
20.3.2. Впуск	609
20.3.3. Выталкивание	609
20.3.4. Контроль температуры.	609
20.3.5. Холодноканальная литниковая система.	610
20.4. Компрессионное прессование	611
Литература	614

Предисловие к третьему изданию

Литьевые формы — это высокоточный инструмент, постоянная и надежная работа которого имеет решающее значение для экономического успеха многих компаний, занимающихся переработкой пластмасс. Поэтому ошибки в проектировании и конструкции форм влекут за собой очень тяжелые последствия.

Цель появления этой книги — помочь избежать подобных ошибок. Основываясь на предыдущих изданиях, она привлекает внимание как итог огромной исследовательской работы, проделанной в Институте переработки пластмасс Аахенского Технического университета с финансовой помощью общественных и частных фондов.

Мы особенно благодарны тем, кто принимал участие в написании этой книги и тем, кто заложил основы для нее в предыдущих изданиях. Это доктор Х. Бангерт, доктор П. Барт, доктор У. Хофен-Нивельштайн, доктор О. Кречмар, доктор М. Паар, доктор Г. Петч, доктор Т. У. Шмидт, доктор Х. Шнайдер, профессор Е. Шюрман и профессор С. Штитц.

Мы в долгу у сотрудников и студентов Института, которые способствовали успеху этой книги своей работой и личным вкладом. Нашу благодарность в их адрес пусть примут мисс Г. Нелиссен, мисс И. Цекорн и мистер У. Окон; всех просто невозможно перечислить. И наконец, мы выражаем признательность издательскому дому *Carl Hanser* и в особенности доктору У. Гленцу и мистеру О. Иммелю за превращение рукописи в столь замечательную книгу.

*Г. Менгес
В. Микаэли
П. Морен*

1. Материалы для деталей литьевых форм

Технология литья пластмасс под давлением должна соответствовать постоянно растущему спросу на недорогие и высококачественные изделия. Решить такую задачу производитель способен только при условии тщательного контроля технологического процесса, соответствии геометрии изделия особенностям полимерного материала и способа его переработки, а также точного воспроизведения размеров и качества поверхности. Литьевые формы должны надежно и стабильно работать, выдерживая в процессе эксплуатации предельные нагрузки, обеспечивая окупаемость инвестиций длительным сроком службы. Надежность и долговечность литьевой формы зависят не только от конструкции и режима обслуживания, но в первую очередь от материалов, из которых она изготовлена, их термической и механической обработки [1.1, 1.2].

В то время как плиты литьевой формы чаще всего стальные, формообразующие детали часто бывают выполнены из других высококачественных металлических и неметаллических материалов. Детали формы, изготовленные не из стали, используют для получения формующих полостей (гнезд) сложной формы. Их часто получают методом электролитического осаждения. В последнее время роль неметаллических материалов в изготовлении литьевых форм возросла. Произошло это, с одной стороны, благодаря использованию новых технологий, а с другой — за счет увеличения практики выпуска пробных серий на прототипах форм, когда заказчики хотят получить первые промышленные партии деталей максимально быстро и дешево, а затем, по результатам испытаний, внести коррективы и сделать доработки. Изготовление таких прототипов и литьевых форм, используемых для выпуска небольших партий, обсуждается ниже.

Литьевая форма, как правило, состоит из набора отдельных элементов (см. рис. 4.3). Специфика работы каждого из них требует соответствующего выбора материала. Формообразующие элементы (матрица и пуансон) отвечают за правильную конфигурацию изделия и текстуру поверхности. Ясно, что выбор материала и методов его обработки для изготовления формообразующих деталей требует особого внимания и определенного опыта.

Выбор материала для матрицы и пуансона определяется несколькими факторами. В них учитываются экономические показатели, внешний вид и размер изделия и специальные свойства перерабатываемого материала (армированный или без наполнения, термоустойчивость и т. д.). Отсюда определяются такие параметры, как минимальные размеры матрицы, допустимый износ литьевой формы в условиях производства, качество отливаемого изделия в зависимости от изменений размеров и внешнего вида. К экономическим показателям относятся необходимый объем производства и, следовательно, срок службы формы, а также допустимые затраты на ее изготовление. Из этих параметров, в свою очередь, складываются требования

к материалу, из которого изготовлена литейная форма, к его термическим, механическим и специальным свойствам. Часто производителю приходится искать компромисс между противоречивыми требованиями.

1.1. Стали

1.1.1. Общие сведения

Обычно сталь является единственным материалом, который гарантирует надежную работу формы в течение длительного срока службы. Марка стали должна быть правильно подобрана из ассортимента, предлагаемого производителями, а ее обработкой должна обеспечиваться структура, необходимая для получения желаемого внешнего вида отливляемого изделия. Здесь на первый план выходит химический состав стали. Как правило, в сплаве содержится несколько взаимодействующих между собой компонентов (табл. 1.1). Окончательный выбор состава зависит от требований, выдвигаемых изготовителями литейной формы. От стали ожидают следующие свойства:

- допустимость применения экономичных способов металлообработки (механообработка, электроэрозионная обработка, полирование, шлифование, травление, выдавливание);
- отсутствие проблем при термообработке;
- достаточные прочность и жесткость;
- термо- и износостойкость;
- коррозионная устойчивость.

Желаемый профиль поверхности достигается в основном механообработкой, что требует времени и дорогостоящего оборудования, но в большинстве случаев не обеспечивает такое качество поверхности, которое позволило бы обойтись без дополнительной ручной доводки. Применение механообработки ограничено механическими свойствами материала [1.9]. Обработка сталей с пределом прочности от 600 до 800 МПа достаточно экономична [1.2]; вообще же обработке поддаются стали с пределом прочности до 1500 МПа. Поскольку прочность ниже 1200 МПа обычно недостаточна, после механической обработки сталь подвергают дополнительной обработке, чаще всего термической. Это может, например, быть закалка и отпуск.

Определенная термообработка придает стали необходимые свойства, в особенности твердость поверхности и достаточную прочность сердцевины. Заметим, однако, что любая термообработка несет в себе определенный риск (деформация, образование трещин). Чтобы в результате термообработки форма не оказалась выведена из строя, перед окончательной стадией механической обработки металл рекомендуется подвергать отжигу для снятия внутренних напряжений. Придерживаться такой последовательности операций особенно важно, когда геометрия элементов формы отличается повышенной сложностью и объем механической обработки достаточно велик.

Чтобы помочь производителю форм избежать подобных проблем, металлурги предлагают предварительно закаленные стали с пределом прочности между 1100 и 1400 МПа, которые допускают механическую обработку благодаря содержанию серы (от 0,06 до 0,10%). При этом очень важна равномерность концентрации серы в стали.

Таблица 1.1. Влияние легирующих элементов на свойства стали [1.3–1.8]

↑ Свойство \ Легирующий элемент	C	Si	S	P	Cr	Ni	Mn	Co	Mo	V	W	Cu	Ti
Прочность	↑	↑	—	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	—
Жесткость	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	—	↓
Ударная прочность (образец с надрезом)	↓	↓	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	—	—	—
Удлинение	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	—	↓	—	↓	—	—
Износостойкость	↑	—	—	—	↑	—	↑	—	↑	↑	↑	—	↑
Прокаливаемость	—	↑	—	—	↑	↑	—	↑	↑	↑	↑	—	—
Твердость	↑	↑	—	—	↑	↑	—	↑	↑	↑	↑	—	—
Обрабатываемость	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	—	—	↓	↓	—	—
Свариваемость	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	—	—	—
Пластичность	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	—	—	↓	—	—
Ковкость	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓	—	↓	—	—
Теплостойкость/твердость при красном калении	↑	↑	—	↑	↑	—	—	↑	↑	↑	↑	—	—
Чувствительность к перегреву	↓	↓	—	—	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	—	↑
Сохранение твердости	↑	↑	—	↑	↓	—	↑	↑	↑	↑	↑	—	—
Коррозионная стойкость	—	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	—

Более высокое содержание серы хотя и облегчает механическую обработку, создает другие проблемы, подчас более сложные. Например, стали с высоким содержанием серы не столь хорошо полируются, как стали без серы, а при их антикоррозионном хромировании и никелировании часто не удается избежать брака. При необходимости восстановления изношенных элементов формы сварка сталей с высоким содержанием серы не дает удовлетворительного результата. Фотохимическое травление для получения текстурного рисунка на поверхности детали из стали с высоким содержанием серы также не используется.

В последние годы при обработке сталей, не содержащих серу, большое значение приобрел метод электроэрозионной обработки. Когда требуется получить ряд небольших матриц (например, для изготовления клавиш компьютерной клавиатуры), экономически эффективно использовать холодное выдавливание. Стали, подходящие для такой обработки, должны иметь хорошую пластичность после отпуска. Применяются, например, мягкие стали с содержанием углерода менее 0,2%.

После формования им придают необходимую поверхностную прочность путем термообработки. Такое повышение прочности становится возможным благодаря науглероживанию (цементации). Стали с упрочненной поверхностью составляют важную группу материалов для изготовления матриц литевых форм.

Деформация и изменение размеров детали часто оказываются побочными эффектами термообработки. Изменение размеров происходит по причине термических напряжений и изменений объема ввиду фазовых переходов в стали. Такие измене-

ния неизбежны. Деформации, наоборот, вызваны либо неправильной термообработкой до, в течение или после формования, либо нетехнологичной конструкцией матрицы/пуансона (острые края и углы, большие перепады сечений и т. д.). Отклонения от точных размеров 3D-модели при термообработке являются результатом как деформации, так и изменения размеров. Практически невозможно однозначно назвать причину. На рис. 1.1 приведена классификация факторов, приводящих к отклонениям от формы и размеров. Влияние этих факторов сводится к минимуму при использовании специальных марок и сплавов стали [1.11, 1.12].

Следует обратить внимание на стали предварительного, мартенситного и сквозного упрочнения. Предварительно закаленные стали не требуют сколь-нибудь существенной термообработки после формования. Требуемая износостойкость таких сталей достигается за счет химических (хромирование) или диффузионных процессов (азотирование при температуре от 450 до 600 °С).

Для мартенситных сталей, подвергающихся термообработке при относительно низкой температуре, обычные риски, связанные с термическими напряжениями и фазовыми переходами, невелики [1.13]. Термообработка сталей сквозного упрочнения такова, что их структура во всем объеме одинакова и заметных напряжений не наблюдается.

Область применения сталей сквозного упрочнения ограничена из-за опасности растрескивания под высокими изгибающими нагрузками, особенно для крупногабаритных литейных форм. Наилучшим образом сочетают прочность сердцевины и износостойкость поверхности стали с поверхностным упрочнением. Например, это очень важно для длинных пуансонов и т. п.

Эксплуатационному износу наиболее эффективно противостоит высокая твердость поверхности. Наилучшие результаты по упрочнению и равномерное качество поверхности достигаются у сталей, которые не имеют поверхностных изъянов, отличаются высокой чистотой и однородностью структуры. Высокая степень чистоты стали является условием безупречной полируемости поверхности матрицы для тех форм, в которых отливаются изделия оптического назначения. Такая чистота присуща только тем сталям, которые подвергаются переплавке (рафинированию) один или несколько раз. Переплавка улучшает и механические свойства. Такие стали применяют при изготовлении высококачественных формообразующих деталей.

Максимальной устойчивостью к истиранию отличаются стали, полученные методом порошковой металлургии (твердый сплав).

Температура литейной формы (обычно ниже 120 °С) и теплообмен в ней определяются свойствами перерабатываемой пластмассы и технологией литья. При переработке большинства термопластичных материалов тепловые потоки практически не оказывают никакого влияния на выбор материала для изготовления формы. Однако сейчас на рынке все шире представлены термопласты с температурой плавления до 400 °С; температура формы при их переработке выше 200 °С.

При переработке терморезистивных материалов температура формы также находится в пределах от 150 до 250 °С. В этих пределах оказываются затронуты механические свойства материала, из которого изготовлена форма. Износ и склонность к деформации возрастают, трещиностойкость и усталостная прочность уменьшается [1.14]. Все это следует помнить, выбирая для литейной формы наиболее подходящий мате-

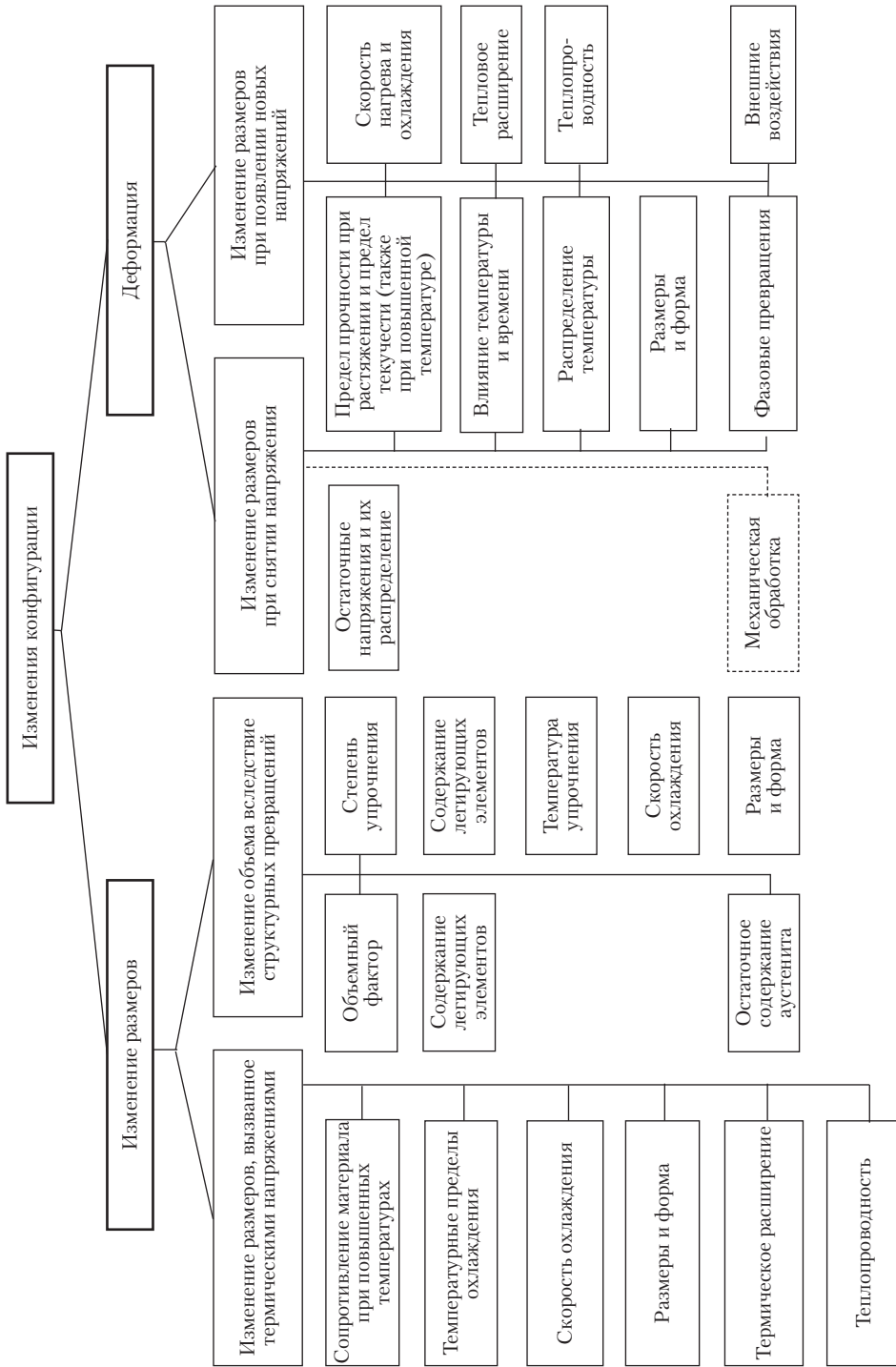


Рис. 1.1. Факторы влияния на размерную точность деталей при термообработке [1.12]

риал. Графики термообработки (твердость–температура) показывают, что допустимая рабочая температура находится на 30 или 50 °С ниже температуры отпуска.

Важным фактором, влияющим на себестоимость литья детали, является эффективность теплообмена между застывающей отливкой и формой. В свою очередь, на теплообмен влияет теплопроводность материала литейной формы, зависящая от физико-химических свойств сплава, определяемых его составом. В определенной степени с концентрацией напряжений можно бороться с помощью упрочнения поверхности (цементации или азотирования), так как эти методы приводят к созданию напряжений в поверхностном слое [1.15]. Тем не менее на этапах конструирования и изготовления формы следует в любом случае уделить внимание проблеме концентрации напряжений.

Некоторые полимерные материалы во время их переработки выделяют химически агрессивные вещества, например соляную кислоту, уксусную кислоту или формальдегид. Такие вещества разрушают поверхность формообразующих деталей формы, если она не защищена покрытием из твердого хрома или никеля.

Но эти покрытия могут отслаиваться на острых углах или при неправильной эксплуатации формы. Если о риске коррозии известно заранее, для изготовления формы рекомендуется использовать коррозионностойкие стали. В таком случае не потребуются принятия особых мер против коррозионного воздействия со стороны охлаждающей жидкости или влаги окружающей среды.

Перечисленные выше требования частично противоречат друг другу. Поэтому конструкторы и изготовители форм выбирают марки сталей, наилучшим образом подходящие в каждом конкретном случае.

Для изготовления формообразующих деталей в настоящее время предлагаются следующие марки сталей (см. табл. 1.2):

- цементуемые;
- азотированные;
- сквозного упрочнения;
- отпущенные, не предназначенные к закалке;
- мартенситного упрочнения;
- твердые сплавы;
- коррозионностойкие;
- рафинированные (электрошлаковый переплав).

1.1.2. Цементуемые стали

Для изготовления литейных форм лучше всего подходят цементуемые стали. Они недороги, и не вызывает удивления тот факт, что в общем потреблении сталей для изготовления форм их доля составляет около 80% [1.16]. (В это число входит изготовление обойм и плит крепления.) Наиболее эффективно упрочнение поверхности нелегированных и низколегированных сталей. Применение к ним технологических приемов науглероживания или цементации позволяет получить твердую поверхность формы и в то же время вязкую сердцевину. Твердая поверхность придает деталям высокую износостойкость, а вязкая сердцевина обеспечивает прочность при ударной и переменной нагрузках [1.17].