



для  
высшей  
школы

*Н. И. Басов  
В. А. Брагинский  
Ю. В. Казанков*

**Расчет  
и конструирование  
формующего  
инструмента  
для изготовления  
изделий  
из полимерных  
материалов**



*Н. И. Басов  
В. А. Брагинский  
Ю. В. Казанков*

# **Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов**

*Допущено Государственным комитетом СССР  
по народному образованию в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности  
„Машины и аппараты химических производств  
и предприятий строительных материалов”*



**МОСКВА  
«ХИМИЯ»  
1991**

ББК 6П7.55  
Б275  
УДК 678.057

Рецензент:

зав. кафедрой „Полимерное машиностроение“  
Тамбовского института химического машиностроения  
к.т.н. А.С. Кликов

**Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В.**

**Б275** Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов. – М.: Химия, 1991. – 352 с.: ил.  
ISBN 5–7245–0665–3

Даны сведения об устройстве, изготовлении и эксплуатации формующего инструмента для производства изделий из полимерных материалов. Приведенные конструктивно-технологические расчеты инструмента и правила его конструирования основаны на современных представлениях о процессах, протекающих в формующем инструменте, и о влиянии его конструкции на качество получаемых изделий.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности „Машины и оборудование по переработке пластмасс и эластомеров“

Б  $\frac{2804070100-036}{050(01)-36}$  36–91

ББК 6П7.55

ISBN 5–7245–0665–3

© Н.И. Басов, В.А. Брагинский,  
Ю.З. Казанков, 1991 г.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| Введение .....   | 6   |
| Глава 1  |     |
| МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ..   | 11  |
| 1.1. Методология системного анализа .....  | 11  |
| 1.1.1. Общие положения .....   | 11  |
| 1.1.2. Конструирование деталей .....   | 16  |
| 1.1.3. Проектирование формующего инструмента .....   | 17  |
| 1.2. Пластмассовое изделие как информационная база для проектирования форму-<br>ющего инструмента .....                    | 18  |
| 1.2.1. Общие положения .....   |     |
| 1.2.2. Технологичность изделий (общая и поэлементная) .....  | 21  |
| 1.2.3. Влияние конструкции изделия на образование остаточных напряжений ...  | 41  |
| 1.2.4. Точность и взаимозаменяемость изделий .....   | 45  |
| Глава 2  |     |
| ФОРМЫ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ .....  | 65  |
| 2.1. Назначение, устройство и принцип действия форм для прессования .....  | 65  |
| 2.2. Исходные данные для проектирования .....  | 77  |
| 2.3. Взаимодействие формы с прессом .....  | 78  |
| 2.4. Система оформляющих деталей пресс-форм .....  | 82  |
| 2.4.1. Основные конструктивные особенности .....   | 82  |
| 2.4.2. Оформляющие гнезда и загрузочные камеры (конструктивные типы и<br>расчет) .....                                     | 85  |
| 2.4.3. Расчеты оформляющих деталей на прочность и жесткость .....  | 87  |
| 2.4.4. Расчет исполнительных размеров оформляющих деталей .....  | 91  |
| 2.5. Литниковые системы пресс-форм литьевого прессования. Конструктивные<br>особенности и расчет .....                     | 99  |
| 2.6. Система обогрева пресс-форм .....   | 103 |
| 2.6.1. Назначение, классификация, основные конструктивные особенности ...  | 103 |
| 2.6.2. Тепловой расчет пресс-форм .....  | 106 |
| 2.7. Системы удаления изделий из полости пресс-формы, перемещения и центриро-<br>вания деталей. Установка пресс-форм. .... | 112 |
| 2.7.1. Система удаления изделий .....  | 112 |
| 2.7.2. Система перемещения деталей .....   | 115 |
| 2.7.3. Система центрирования .....   | 117 |
| 2.7.4. Установка и закрепление пресс-форм .....  | 117 |
| 2.8. Материалы и технологические процессы изготовления формообразующих<br>деталей пресс-форм (ФОД) .....                   | 118 |
| 2.8.1. Стали .....   | 118 |
| 2.8.2. Цветные сплавы и другие материалы .....   | 121 |
| 2.8.3. Технологические процессы изготовления и сборки ФОД .....  | 122 |
| 2.9. Приемка, эксплуатация, ремонт и ресурс пресс-форм .....   | 125 |
| 2.9.1. Приемка .....   | 125 |
| 2.9.2. Эксплуатация .....  | 126 |
| 2.9.3. Ремонт .....  | 127 |
| 2.9.4. Ресурс .....  | 128 |

## Глава 3

|   |     |
|---|-----|
| <b>ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ</b> .....  | 129 |
| 3.1. Назначение, устройство и принцип действия литьевых форм .....                  | 129 |
| 3.2. Исходные данные для проектирования .....                                       | 138 |
| 3.3. Взаимосвязь формы с литьевой машиной .....                                     | 140 |
| 3.3.1. Инжекционные, объемные и основные геометрические соотношения .....           | 140 |
| 3.3.2. Расчет гнездности формы .....  | 142 |
| 3.4. Система оформляющих деталей .....  | 144 |
| 3.4.1. Назначение и классификация .....   | 144 |
| 3.4.2. Конструктивные особенности и расчетные схемы .....                           | 145 |
| 3.5. Литниковые системы .....   | 151 |
| 3.5.1. Назначение и классификация .....   | 151 |
| 3.5.2. Холодноканальные литниковые системы .....                                    | 154 |
| 3.5.3. Горячеканальные литниковые системы .....                                     | 165 |
| 3.5.4. Гидравлический расчет литниковой системы и формы .....                       | 174 |
| 3.6. Системы термостатирования .....  | 178 |
| 3.6.1. Назначение и классификация .....   | 178 |
| 3.6.2. Конструктивные особенности систем охлаждения .....                           | 179 |
| 3.6.3. Расчет системы охлаждения .....  | 184 |
| 3.7. Системы выталкивания .....   | 187 |
| 3.7.1. Назначение, классификация и конструктивные особенности .....                 | 187 |
| 3.7.2. Расчет перемещений выталкивающей системы и усилий выталкивания изделий ..... | 191 |
| 3.8. Системы перемещения и центрирования .....                                      | 193 |

## Глава 4

|   |     |
|---|-----|
| <b>ЭКСТРУЗИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТ</b> .....                                     | 199 |
| 4.1. Общее устройство экструзионных головок и калибрующих устройств ..... | 199 |
| 4.2. Классификация экструзионного инструмента .....                       | 202 |
| 4.3. Факторы, определяющие конструктивное оформление головок .....        | 207 |
| 4.4. Гидравлический расчет головок .....                                  | 220 |
| 4.5. Плоскощелевые головки .....  | 227 |
| 4.5.1. Конструктивные варианты головок .....                              | 227 |
| 4.5.2. Методы выравнивания потока .....                                   | 229 |
| 4.5.3. Расчет размеров каналов головок .....                              | 232 |
| 4.5.4. Устройства для выравнивания потока .....                           | 243 |
| 4.6. Кольцевые головки .....  | 248 |
| 4.6.1. Трубные головки .....  | 248 |
| 4.6.2. Раздувные головки .....  | 252 |
| 4.6.3. Головки для изготовления рукавной пленки .....                     | 264 |
| 4.6.4. Кабельные головки .....  | 272 |
| 4.7. Головки для изделий сложного профиля .....                           | 276 |
| 4.8. Прочностной и тепловой расчет головок .....                          | 287 |
| 4.9. Калибрующий инструмент .....   | 288 |
| 4.10. Фильтры .....   | 297 |

## Глава 5

|  |     |
|--|-----|
| <b>ФОРМЫ ДЛЯ РАЗДУВНОГО ФОРМОВАНИЯ</b> .....       | 302 |
| 5.1. Общее устройство и классификация форм .....   | 302 |
| 5.2. Формообразующие детали .....                  | 308 |
| 5.3. Пресс-канты .....                             | 316 |
| 5.4. Система охлаждения .....                      | 321 |
| 5.5. Система вентиляции оформляющих полостей ..... | 325 |

## Глава 6

|   |     |
|---|-----|
| ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПНЕВМОВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ .....                | 328 |
| 6.1. Технологические разновидности формующего инструмента ..... | 328 |
| 6.2. Факторы, определяющие выбор конструкции формы .....        | 331 |
| 6.2.1. Требования к конфигурации изделия .....                  | 331 |
| 6.2.2. Требуемые серийность изделия и производительность .....  | 335 |
| 6.3. Формообразующие детали .....                               | 339 |
| 6.3.1. Материал и технология изготовления .....                 | 339 |
| 6.3.2. Расположение гнезд и расстояния между ними .....         | 341 |
| 6.3.3. Вентиляционные каналы .....                              | 345 |
| 6.4. Система охлаждения .....                                   | 348 |
| Рекомендательный библиографический список .....                 | 349 |

## ВВЕДЕНИЕ

Многообразие изделий из пластмасс чрезвычайно велико, только в нашей стране их ассортимент включает в себя более миллиона наименований; их потребители – практически все отрасли народного хозяйства и каждый человек в отдельности. В последние десятилетия переработка пластмасс в изделия интенсивно развивается не только в химической промышленности, но и в других отраслях. В связи с этим уже возникла и еще очень долго будет сохраняться большая потребность в квалифицированных специалистах – конструкторах изделий и формующего инструмента для их изготовления.

Чтобы составить представление об основных направлениях деятельности таких специалистов в условиях промышленного производства и о роли знаний в области конструирования формующего инструмента, рассмотрим основные этапы создания и выпуска пластмассового изделия.

Первый этап – проектирование изделия. Проектируя то или иное изделие, отдельный узел машины, прибора, агрегата (например, механизм привода суппорта металлообрабатывающего центра, аппарат „искусственная почка“, панель прибора управления автомобиля, кофемолку и др.), конструктор по комплексу предъявляемых эксплуатационных требований назначает и указывает в чертежах наиболее подходящий для изготовления этого изделия материал. При этом он может пользоваться справочной литературой, консультироваться со специалистами – материалововедами-полимерщиками. Технологические ограничения, накладываемые, например, на форму изделия (а это для пластмассовых изделий очень существенно и специфично), чаще всего на этом этапе оказываются практически неучтенными, что может быть связано в значительной мере с некомпетентностью конструктора в области переработки пластмасс.

Второй этап – размещение заказа на изготовление детали. Если организация – разработчик изделия не имеет собственных производственных мощностей по переработке пластмасс, то она ищет (в своей или смежных с ней отраслях) предприятие, на котором таковые имеются. Специалист технического отдела этого предприятия, знакомый как с оборудованием, так и с технологией переработки пластмасс, спецификой технологии изготовления и эксплуатации формующего инструмента, получив рабочий чертеж изделия, в первую очередь должен определить, возможно ли его изготовление на имеющемся в наличии оборудовании (возможна ли на нем переработка конкретного типа материала, достаточны ли мощность, габариты оборудования и др.). При этом обсуждается вопрос о том, можно ли, в принципе, сконструировать инструмент для предложенной в чертежах конфигурации изделия (если нет, то специалист технического отдела может дать общие рекомендации о ее изменениях). Если конструкция формующе-

го инструмента принципиально возможна, то здесь же решают, изготовит ли его сам заказчик или предприятие, принимающее заказ на выпуск изделия, в собственном инструментальном цехе (если оба варианта не реальны, то поиском изготовителя формы должен заняться заказчик изделия).

В итоге, разрешив все проблемы размещения заказа, завершают организационный этап создания изделия.

Третий этап – конструирование формующего инструмента – является самым ответственным. Если принимаемые на предыдущих этапах решения не влекут за собой каких-либо значительных материальных затрат и в связи с этим последующие корректировки и изменения этих решений практически безболезненны, то ошибки, допущенные при конструировании формующего инструмента, воплощаются в реально изготовленном инструменте и, как правило, могут быть обнаружены уже только после того, как инструмент установлен на машину и начаты его промышленные испытания. Возможные материальные потери при этом значительны, так как только стоимость изготовления формующего инструмента часто превышает 8–10 тыс. руб., кроме того резко удлиняется период запуска детали в производство из-за исправления ошибок в конструкции и нового исполнения инструмента.

Ошибки, допускаемые при конструировании формы, могут носить различный характер. Во-первых, те или иные элементы конструкции формующего инструмента могут быть спроектированы без учета особенностей процессов, протекающих во время формования полимера, и специфики его технологических свойств. Во-вторых, конструкция какой-либо детали инструмента может оказаться трудно осуществимой (или ее вообще нельзя изготовить на имеющемся оборудовании). В-третьих, спроектированный инструмент может оказаться „несопрягаемым” с соответствующей перерабатывающей машиной (например, ход выталкивателя пресса меньше, чем требуемый ход системы выталкивания пресс-формы). Во избежание этих ошибок конструктор формующего инструмента помимо активного владения общими принципами и навыками конструирования должен иметь знания в области оборудования в технологии переработки пластмасс.

Четвертый этап – изготовление инструмента. В нем принимают участие инженеры-технологи по обработке металлов.

Пятый, заключительный этап – испытания формующего инструмента при работе его на перерабатывающей машине, а затем – его промышленная эксплуатация. В этом принимают участие технолог цеха по переработке пластмасс и механик цеха по оборудованию. Первый отвечает за контроль качества сырья и готовой продукции, наладку и контроль технологических режимов формования, а второй – за поддержание оборудования в рабочем состоянии. Каждый из этих специалистов должен обладать знаниями в области технологии переработки, оборудования и формующего инструмента.

Вот пример одной из возможных производственных ситуаций: при литье под давлением на изделии возник облой (материал начал час-

тично вытекать из оформляющей полости). Первым, в соответствии со своими обязанностями, обнаружил это технолог. Пытаясь устранить дефект, он самостоятельно на термопластавтомате (если машина не снабжена ЭВМ) увеличил усилие смыкания полуформ и снизил температуру литья. Однако в результате применения этих приемов дефект не был устранен. Хотя технологические приемы практически исчерпаны, ответственность по устранению дефекта по-прежнему лежит на технологe, он должен установить истинную причину дефекта (недостаток формующего инструмента, оборудования или другие причины). Квалифицированно выполнить это, например обязать механика цеха устранить возможную, по его мнению, причину (проверить крепление и затяжку колонн узла смыкания форм у машины), технолог может в том случае, если он обладает необходимым минимумом знаний в области оборудования. В свою очередь, механик, исчерпав известные ему возможности и получив отрицательный эффект, должен составить собственное мнение о причине брака (например, предположив, что со временем возник прогиб плит литьевой формы из-за недостаточной их толщины) и предложить конструктору формы заняться его исправлением.

По мнению авторов, настоящий учебник является для будущего конструктора формующего инструмента введением в специализацию, а специалистам по переработке пластмасс он может помочь приобрести общие представления о формующем инструменте, достаточные для успешной работы по рассмотренным выше четырем возможным основным направлениям производственной деятельности.

Несколько слов о характере труда конструктора формующего инструмента. Он должен быть достаточно интенсивным (сроки проектирования инструмента очень сжаты, как правило, от 10 дней до месяца), высококвалифицированным и ответственным. Каждую „единицу” инструмента конструирует, как правило, один человек, так что ответственность за все принятые решения — персональная. Продукция конструктора должна быть совершенной „с первого предъявления”, здесь не может быть промежуточных стадий, как при создании машин (опытный, опытно-промышленный образец и др.). Начинающие конструкторы, проработавшие в течение 2–3 лет в данной области, приобретают уникальную и постоянно актуальную профессию.

Конструктор должен искать и реализовывать в чертежах оптимальные варианты, а это связано с необходимостью комплексно решать в большинстве случаев проблемы: *термостатирования* (обеспечения однородности температурных полей в формующем инструменте и экономного расхода энергии); *гидродинамики* заполнения формующей полости материалом (учета скоростных факторов для обеспечения наибольшей производительности работы инструмента и ориентации материала, влияющей на качество изделий и т. д.); *прочности* (обеспечения рациональной материалоемкости формующего инструмента, учета опасных напряжений в наиболее нагруженных элементах); *взаимозаменяемости и точности* (обоснованного выбора долговечных

посадок и оптимальных квалитетов размеров, в первую очередь – размеров сопрягаемых элементов, степеней точности, допускаемых отклонений от правильной геометрической формы, классов шероховатости поверхностей, номинальных исполнительных размеров формующей полости); *надежности и долговечности* работы (кратковременной – в течение каждого технологического цикла, длительной – планируемой на весь период выполнения программы выпуска изделий); *безопасной эксплуатации; патентной экспертизы и чистоты*. Необходимая глубина решения этих проблем определяется уровнем требований, предъявляемых к качеству изделий, и объемом их производства.

В изделия сосредоточены результаты усилий конструкторов, материаловедов, технологов, механиков, метрологов, организаторов производства. Практически всегда поиск решений и их реализация помимо комплексного подхода требуют принятия разумных компромиссов, что характерно для любых инженерных задач. В современных условиях, экономя затрачивая время, рассматривение вариантов проводят с помощью средств вычислительной техники. Известны разного уровня и целей САПР формующего инструмента для изделий из пластмасс, пока не слишком распространенные в отечественной промышленности. Однако САПР – неперенное условие технического прогресса вообще, и в данном конкретном случае, естественно. Развитие, расширение сфер использования и стандартизация прикладных программ САПР является ближайшей задачей конструкторов формующего инструмента – наряду с дальнейшей унификацией деталей, узлов и конструкции в целом.

Прогресс „формостроения” зависит и от совершенствования и специализации инструментальных производств. В этой области главными являются следующие направления: снижение трудоемкости конструирования и изготовления формующего инструмента; повышение стойкости, работоспособности и производительности его; совершенствование конструкций формующего инструмента с целью автоматизации управления его работой в режиме АСУ ТП переработки пластмасс, повышения качества изделий, уменьшения расхода сырья и отходов (необратимых и обратимых), т.е. уменьшения дефицита пластмасс; обеспечение роста объемов производства изделий из пластмасс и формующего инструмента без увеличения общей численности рабочих.

Конструктор формующего инструмента обычно специализируется на определенных объектах, например на формах для литья под давлением, или на экструзионных головках, пресс-формах и т. д. – в зависимости от профиля работы своего предприятия, НИИ, КБ. Но при этом у него должна быть все же достаточная универсальная квалификация, чтобы проектировать разные типы формующего инструмента, принципиальные отличия которых основаны на различии агрегатного состояния формуемого материала, характера процессов превращения материала во время формования; ниже приведены соответствующие данные:

| Агрегатное состояние перерабатываемого материала | Процесс превращения материала               | Формующий инструмент                       |
|--|---|--|
| Формующая зона — замкнутая                       |   |  |
| Вязкотекучее (расплав)                           | Отверждение расплава реактопласта           | Пресс-форма, заливочная форма              |
|  | Затвердевание расплава термопласта          | Форма для литья под давлением              |
| Высокоэластическое                               | Затвердевание, застекловывание              | Формы для термоформования объемных изделий |
| Твердое  | Уплотнение в монолитное твердое состояние   | Таблет-формы                               |
| Формующая зона — открытая                        |   |  |
| Вязкотекучее (расплав)                           | Охлаждение до высокоэластического состояния | Экструзионная головка                      |
| Высокоэластическое                               | Затвердевание                               | Калибрующая головка                        |
| Твердое  | Ориентация, кристаллизация                  | Протяжки формующие                         |

Все эти типы формующего инструмента рассматриваются в отдельных главах учебника, причем подробнее описываются те, которые наиболее перспективны и в настоящее время распространены. С учетом учебных, общеознакомительных целей книги ряд сведений, особенно некоторые методики расчетов, приведены в относительно адаптированных, модельных вариантах, но применение их на практике дает верные результаты.

Отбор материалов в учебник по инженерной прикладной дисциплине достаточно сложен. Авторы использовали наряду с опытом кафедр МИХМа и ЛТИ им. Ленсовета, где они работают, также и опыт отечественных предприятий, отдельные опубликованные иностранными фирмами, зарубежными и отечественными специалистами разработки, полезную конструкторскую информацию. Как принято для учебников, к каждой главе дается краткий рекомендуемый библиографический список. Читатели, и в первую очередь студенты, аспиранты, молодые конструкторы могут присылать свои замечания и предложения по книге, которые будут приняты авторами с благодарностью и учтены в дальнейшей работе над учебником.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

### **1.1. Методология системного анализа**

#### *1.1.1. Общие положения*

Проектирование новых или модернизация существующих конструкций формующих инструментов – сложный и многогранный творческий процесс. Его цель – достижение минимальных затрат труда, материалов, энергии, средств и при этом обеспечение максимальной разумной эффективности при эксплуатации созданной конструкции.

Формующие инструменты – основные рабочие органы машин, перерабатывающих пластические массы в изделия, причем эти органы автономны, их проектируют отдельно от технологической машины, но обязательно ориентируясь на ее технические параметры и предельные возможности. Именно в рабочих органах проходят последовательно все стадии формирования изделий, завершаясь образованием требуемого их качества.

Процесс создания формующих инструментов для изготовления изделий из пластмасс состоит из этапов прогнозирования, проектирования (или разработки конструкторской документации), подготовки производства и его освоения. Рассмотрим подробное содержание этих этапов.

¶ Инженерное прогнозирование – это обработка информации, отражающей потенциальные возможности развития техники (для начинающих конструкторов реален сбор патентных и производственных данных, их анализ и использование на уровне аналогий). Как составная часть в прогнозирование входят вопросы экономики. В технике для прогнозирования используют методы экстраполяции, экспертных оценок, моделирования. В зависимости от цели прогнозирования выбирают конкретный объект прогнозирования конструкции формующего инструмента (в целом или отдельных узлов, деталей), период упреждения и точность прогнозирования. Перевод упреждения (период, на который ведут прогнозирования) зависит от требуемой точности (чем он больше, тем точность прогнозирования меньше и тем полнее должны быть исходные данные). Прогнозирование конструкций включает рассмотрение функционального назначения, основные технические и экономические параметры, возможные компоновочные решения, новые материалы и заготовки, новые технологические процессы, формы и методы организации и управления производством и т. д.

Разработка конструкторской документации должна проводиться в соответствии с единой системой конструкторской документации (ЕСКД, ГОСТ 2.103–68). Формующий инструмент проектируют на основании технического задания (по ГОСТ 15.001–73); выполняют сборочные чертежи, соответствующие стадии технического проекта, и рабочую документацию.

Разработка конструкторской документации – это результат проектирования, в процессе которого осуществляют анализ и синтез; абстрагируются от некоторых несущественных свойств исследуемой конструкции, сосредоточиваясь только на главных функциональных свойствах; используют метод аналогий и выдвигают альтернативы.

Подготовка производства к выпуску вновь спроектированного формующего инструмента проводится в соответствии с требованиями стандартов Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) и Единой системы технологической документации (ЕСТД). При этом решают следующие основные задачи: отработка конструкции на технологичность, разработка типовых и специальных технологических процессов изготовления, контроль, сборка конструкции (в целом, отдельных функциональных узлов, деталей); установление технических норм времени на изготовление конструкции, норм расхода материалов и т. д.; расчет потребного оборудования, производственных мощностей и других технико-экономических параметров.

В ЕСТПП ГОСТ 14.201–73 предусматривает общие правила отработки конструкции изделия на технологичность. Различают два вида технологичности конструкции: производственную и эксплуатационную (ГОСТ 188–73 „Технологичность конструкций. Термины и определения”).

Производственная технологичность конструкции проявляется в сокращении времени и средств на конструкторскую и технологическую подготовку производства нового изделия, процессы изготовления изделий, организацию и управление процессом производства. Технологичной называют такую конструкцию, которая полностью отвечает предъявленным требованиям к изделию и может быть изготовлена с применением наиболее экономичных (при принятом типе и масштабе производства) технологических процессов.

Эксплуатационная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат (средств и времени) на подготовку изделия и функционированию, на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Главные факторы, определяющие технологичность конструкции: вид изделия (деталь, сборочная единица, комплекс, комплект); объем выпуска; тип производства.

Главные задачи на технологичность: снижение трудоемкости изготовления изделия; стандартизация и унификация составных частей изделия, являющихся сборочными единицами (блоки, узлы) или деталями; унификация элементов конструкции (посадок, качественных размеров, шероховатости поверхности, резьб, модулей зубьев, диаметров отверстий, радиусов и т. д.); возможность применения унифи-

цированных технологических процессов сборки, контроля, испытаний, технического обслуживания.

Задачами отработки на технологичность конструкции сборочных единиц (какими являются формулирующие инструменты) являются: обеспечение технологичности компоновки сборочной единицы; выбор правильных и рациональных установочных баз; рациональное членение сборочной единицы на составные части; обеспечение условий регулировки и применения производительных процессов сборки, контроля и испытания.

Задачами отработки на технологичность конструкции отдельных деталей являются: рациональный выбор конструкционных баз, обеспечивающих возможность их использования также в качестве технологических баз); обеспечение однотипности форм обрабатываемых поверхностей; построение рациональных размерных цепей, дающих требуемую точность функциональных параметров; обеспечение четкой принадлежности конструкции детали к определенной классификационной группе, на представителя которой составляется типовая технологический процесс (ЕСТД, ГОСТ 3.1409-74 „Правила оформления документов на изготовление деталей из пластмасс“).

На стадии разработки технологического задания на проектирование устанавливаются базовые показатели технологичности конструкции. Эти показатели могут быть частными или комплексными, относительными или абсолютными.

Отработка конструкций на технологичность – это доведение их до соответствия определенной системе требований, обеспечивающих минимальные сроки и стоимость подготовки производства изделий, расход материала и трудоемкость при высоких эксплуатационных качествах изделия. Отработка должна производиться независимо от намечаемой серийности производства изделий.

ГОСТ 14.202–73 устанавливает правила выбора показателей технологичности конструкции: по трудоемкости – изготовления (в том числе – по видам работ), подготовки к функционированию, технического обслуживания, ремонта; по себестоимости – технической, подготовки к функционированию, профилактического обслуживания, ремонта; по унификации и взаимозаменяемости – унификации в целом и отдельных конструктивных элементов, стандартизации, коэффициента повторяемости, коэффициента взаимозаменяемости; по расходу материала – масса общая, коэффициенты использования и применяемости; по обработке – коэффициент точности обработки; коэффициент качества поверхности; по составу конструкции – коэффициент сборки, коэффициент перспективности использования и др.

Наконец, последний этап – освоение производства – проводится в соответствии с ГОСТ 15.001–73, где предусмотрены правила не только разработки, но и постановки продукции на производство, а также виды испытаний конструкций серийного и массового производства.

Формулирующий инструмент, установленный на технологическом оборудовании (машине) при любом технологическом процессе изго-

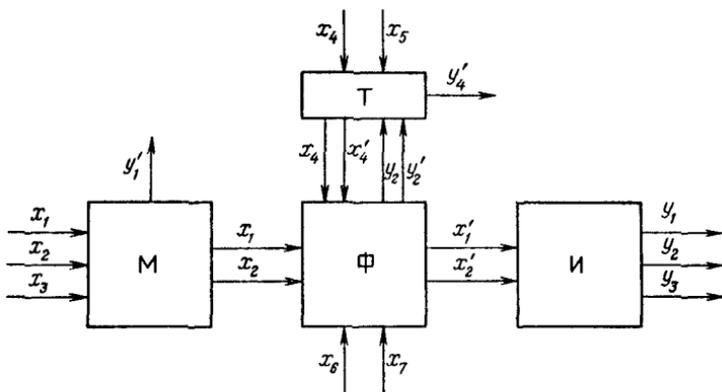


Рис. 1.1. Структура системы „машина (М) – форма (Φ) – изделие (И)” с подсистемой „форма (Φ) – термостат (Т)”. Пояснения в тексте

товления пластмассового изделия, является частью, элементом системы. Упрощенно вся эта система представлена на рис. 1.1.

Системой называют совокупность (множество) любым способом выделенных объектов (реальных или воображаемых), если заданы связи между объектами; каждый из элементов внутри системы считается неделимым; с окружающей средой они взаимодействуют как целое; в разные моменты времени между объектами системы можно провести однозначное соответствие; совокупность объектов образует целостное единство. Такое определение наиболее распространено.

Между составляющими системы могут быть отношения и связи, что не тождественно. Наличие отношений не означает, что изменение одной части системы определяет какие-либо изменения другой части. Наличие связей указанные изменения предполагают обязательными. Связи между частями, объектами системы делят на две категории: внутренние, при которых взаимодействие происходит между частями системы; внешние, при которых взаимодействие происходит с окружающей средой.

Понятие „связь” имеет первостепенное значение, так как оно определяет и собственно систему, и содержание системного анализа. Установлены три группы связей: взаимодействия (они выявляются целями, которые преследует каждый из объектов системы); строения или структурные; функционирования (они обеспечивают действие системы; их разновидности – связи развития, отражающие процесс смены состояний, и связи управления).

Системный анализ при задании конструкции (в частности, формирующего инструмента) – это методология решения сложных технических задач, основанная на концепции системы (или иначе – построение системы для решения сложных задач, что взаимосвязано). Важнейшей составной частью системного анализа является разработка структуры рассматриваемой системы объекта.

Обратимся к рис. 1.1, на котором дан пример структуры системы „машина (М)– форма (Ф) – изделие (И)”. В систему входят ( $x_i$ ) и выходят ( $y_j$ ) материальные, энергетические и информационные потоки ( $x_1$  – материал,  $x_2$  – энергия,  $x_3$  – информация о параметрах процесса, реализуемых в машине;  $y_1$  – качество,  $y_2$  – количество,  $y_3$  – информация о параметрах качества изделий). Внутри системы между ее элементами существуют связи, реализуемые также материальными, энергетическими и информационными потоками (например, в форму входит расплав  $x_1$  и информация о нем, т. е. о температуре и давлении расплава  $x_2$ ; между формой и изделием происходит теплообмен, т. е. процесс передачи энергии  $x'_1$  и информация о нем  $x'_2$ ).

Теплообмен формы с окружающей средой регулируют с помощью термостата (Т), который совместно с формой (Ф) образует подсистему (т. е. включает элементы, не подвергающиеся дальнейшему разделению). В этой подсистеме также циркулируют материальные, энергетические и информационные потоки, существуют связи. Внешние связи:  $x_4$  – теплоноситель;  $x_5$  – информация о состоянии (температуре, скорости) и количестве теплоносителя;  $x_6$  – тепловой поток, зависящий от теплообмена с окружающей средой и особенностей геометрии изделия;  $x_7$  – информация о геометрии изделия и величине его теплоотдающей поверхности. Внутренние связи:  $x_4$  – поток теплоносителя (хладоагента или и теплоносителя, и хладоагента), поступающего в форму;  $x'_4$  – информация о температуре теплоносителя  $x_4$ ;  $y_2$  – поток отработанного теплоносителя и  $y'_2$  – информация о его состоянии. Выходом из рассматриваемой подсистемы является  $y'_4$  – потери тепла термостатом (и соответствующая информация об этом);  $x'_4$  – потери тепла изделием, находящимся в форме, и информация о состоянии изделия  $x'_2$ . Энергетические потери при переработке от технологической машины –  $y'_4$ .

Другие связи на схеме не приведены и вообще их выделение, равно как и число элементов в подсистеме (системе), а также количество подсистем, зависит от постановки цели и задач системного анализа, намеченных путей решения.

Оценка состояния системы, приведение ее к определенной цели могут быть наиболее точно осуществлены, если известна количественная характеристика ее элементов, объектов. Для этого требуется введение определенного критерия.

Процесс формообразования изделия в рабочем органе, в замкнутой или открытой полости формирующего инструмента, подвержен нарушениям, а для инструмента дискретного действия – обязательным, технологически обусловленным нарушениям термического равновесия. Поэтому одинаковые технологические условия формования изделия могут продолжаться лишь с определенной вероятностью  $P^{\Phi}$ , что и описывается вероятностной матрицей вида

$$P^{\Phi} = \begin{pmatrix} P_{11}^{\Phi} & P_{12}^{\Phi} \\ P_{21}^{\Phi} & P_{22}^{\Phi} \end{pmatrix}; \text{ пример: } P^{\Phi} = \begin{pmatrix} 0,99 & 0,01 \\ 0,46 & 0,54 \end{pmatrix}.$$

Числа, приведенные в матрице справа, могут быть установлены экспериментально; они поясняют, что вероятность продолжения нормальной работы  $P_{11}^{\Phi}$  составляет 99%, а вероятность нарушения  $P_{12}^{\Phi}$  – 1%. В то же время, если нарушение произойдет, то вероятность его устранения к следующему циклу  $P_{21}^{\Phi}$  составит 46%, а вероятность продолжения нарушения  $P_{22}^{\Phi}$  – 54%.

Система, в которой происходят нарушения, называется ремонтируемой. Для быстрого ввода системы в состояние нормальной работы необходимо, чтобы все ее элементы были снабжены средствами сбора, регулирования и даже управления соответствующими технологическими параметрами. Применительно к такому элементу системы, как форма ( $\Phi$ ), это означает оснащение ее датчиками температуры, давления или вязкости расплава; осуществление быстрой, малоинерционной „обратной связи” между формой ( $\Phi$ ) и машиной ( $M$ ), лучше всего реализуемой с помощью ЭВМ. Такие формы еще мало распространены, но тенденции их широкого появления очевидны (см. гл. 3).

Систему „машина ( $M$ ) – форма ( $\Phi$ ) – изделие ( $I$ )”, как и любую техническую систему, характеризуют надежность (см. гл. 2), точность и стабильность. Точность характеризует систему в некоторый фиксированный момент (период) времени с точки зрения соответствия полей рассеяния значений показателей качества изделий  $U_1$  заданным полям допусков этих показателей (их величинам и расположению). Стабильность характеризует систему с точки зрения возможности сохранения показателей качества изделий в заданных пределах в течение заданного планового периода времени.

### *1.1.2. Конструирование деталей*

Принимая деталь как систему (рис. 1.2), функциональные части ее рассматривают как подсистемы, а поверхности детали как элементы. В зависимости от типа и сложности детали число структурных составляющих может быть различным, а для формообразующих деталей формующих инструментов – и большим.

Пользуясь методологией системного анализа, зная общую цель, стоящую перед конструкцией, можно определить направления оптимального конструирования детали. При этом происходят два процесса – расчетный и графический (параллельно, последовательно, чередуясь). Системный анализ (по опыту применения) позволяет существенно уменьшить количество изменений, вносимых в период подготовки и освоения производства деталей, связанных с несовершенством существующих расчетных методик и широким использованием при конструировании метода аналогий.

К конструкции детали предъявляют требования эксплуатации и требования производства, которые могут быть противоречивыми, независимыми друг от друга. Требования эксплуатации и производства рассматривают как подсистемы, между которыми имеются связи. Требования эксплуатации имеют постоянный характер, а производства –

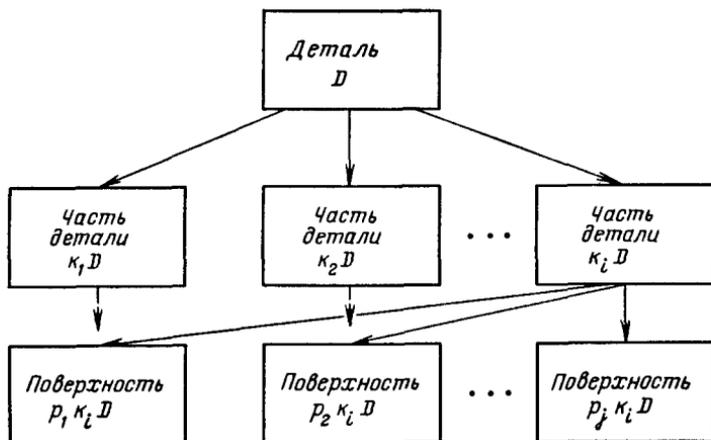


Рис. 1.2. Структура конструкции детали как системы

переменный, зависящий от объема выпуска деталей. В итоге это приводит к необходимости постановки многовариантных задач и, следовательно, обоснованию компромиссного („оптимального”) решения, но с учетом технико-экономических критериев, принятых не только для конструируемой детали, а для объекта (например, формующего инструмента) в целом.

### 1.1.3. Проектирование формующего инструмента.

Формующий инструмент (сборочная единица) – это совокупность конструкций малых сборочных единиц и деталей, находящихся в определенной взаимосвязи, обеспечивающей требуемое функционирование. Пользуясь методологией системного анализа, представляют конструкцию формующего инструмента как иерархическую систему, состоящую из структурных единиц разного уровня (на рис. 1.3. показано пять уровней). Каждая малая сборочная единица может состоять из некоторого числа деталей, причем одна и та же деталь может входить в разные сборочные единицы (это либо отражает уровень унификации деталей, либо их повторяемость, либо многофункциональность). В свою очередь, отдельные части (функциональные или структурные) детали (см. рис. 1.2) могут входить в конструкцию разных наименований деталей; на нижней ступени иерархической структуры – элементы системы, поверхности детали (форма, точность размеров, шероховатость).

Итак, формующий инструмент следует рассматривать только как систему (в то же время – это как показано выше, элемент технологической системы М – Ф – И); малую сборочную единицу – в зависимости от постановки задачи системного анализа – как систему и подсистему; деталь – как систему, подсистему и элемент; функциональную и струк-

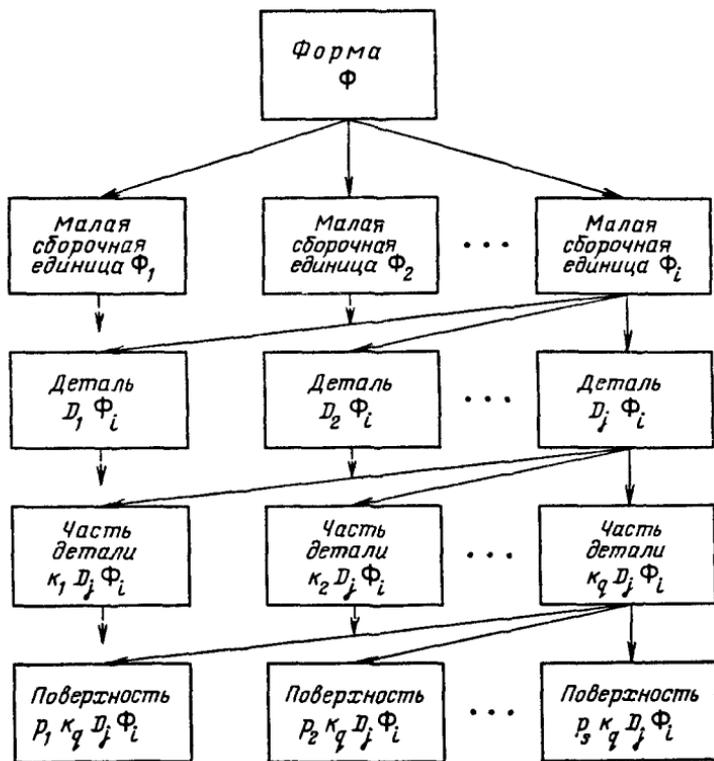


Рис. 1.3. Иерархическая структура конструкции формующего инструмента как системы

турную часть детали – как подсистему и элемент; поверхность детали – только как элемент.

Системные модели формующих инструментов, так же как и отдельных деталей, должны отвечать требованиям эксплуатации и производства (рассматриваемым как подсистемы) с учетом существующих между ними взаимосвязей и противоречий. Отдельные положения системного анализа использованы в последующих главах.

## 1.2. Пластмассовое изделие как информационная база для проектирования формующего инструмента

### 1.2.1. Общие положения

Проектирование формующего инструмента выполняют с учетом особенностей технологических свойств материала изделия. Высокое и стабильное качество изделий при относительно низкой себестоимости, частая смена номенклатуры изделий достигаются при комплексном подходе к проблемам конструирования и изготовления изделия,

формулирующего инструмента. Первым шагом при решении этих проблем является выбор материала изделия. Ответственность за этот шаг несет конструктор изделия, подписывающий соответствующий чертеж. Иногда окончательному решению предшествует экспертная оценка, составление опросного листа с анализом условий эксплуатации изделия и программы его выпуска. Системный подход к проблеме применения пластмасс, выбору их для конкретного изделия – см. работу [2], а к конструированию самого изделия – см. разд. 1.1.2.

Наиболее важным для выбора материала является температурный интервал эксплуатации. Он должен быть внутри интервала температур морозостойкости и теплостойкости – при отсутствии внешних нагрузок; в противном случае рассчитывают (для опасных точек) напряжения в изделии  $\sigma_p$ , сопоставляя их с допускаемыми напряжениями  $\sigma_d$ , причем запас прочности  $K = \sigma_d / \sigma_p$  должен быть не менее 2–3. При длительном действии внешней нагрузки необходимо также учитывать закономерности релаксации напряжений. При выборе допускаемых напряжений  $\sigma_d$  для пластмасс, в первую очередь конструкционных, необходимо учитывать изменения прочности материала в зависимости от скорости нагружения и разгрузки, колебаний температуры, длительности нагружения, влияния влаги и агрессивности среды; неоднородность материалов (причем многие из них отличаются непостоянством механических характеристик для различных видов деформаций).

Неучет этих факторов может вызвать значительные изменения размеров и формы пластмассовых изделий под нагрузкой, превосходящие предельно допустимые, рассчитанные из условий функциональной взаимозаменяемости. При этом вполне вероятно потеря изделием конструктивной определенности.

Конструктивная определенность деталей машин и приборов (из практики машиностроения) сохраняется, если изменения размеров происходят в пределах от 0,5–1% (качества 10–12) до 3–4% (качества 12–14). Допускаемые напряжения для реактопластов в 1,2–1,5, а для термопластов – почти в 2 раза меньше, чем соответствующие им пределы прочности. Для кратковременных ударных нагрузок рекомендуется снижать допускаемые напряжения на 20–30% для термопластов и на 50–60% – для реактопластов. Эти рекомендации по снижению действующих напряжений по сравнению с предельными не универсальны.

В более ответственных случаях исходные допускаемые напряжения необходимо корректировать для каждого отдельного случая проектирования пластмассового изделия. С этой целью может быть применен дифференциальный метод: предварительный выбор корректирующих коэффициентов для расчета изделий из пластмасс учитывает многие факторы, влияющие на прочность в предположении, что они не зависят друг от друга.

Недостатком дифференциального метода является отсутствие количественной оценки разброса разрушающих нагрузок вследствие статистической природы прочности материала.

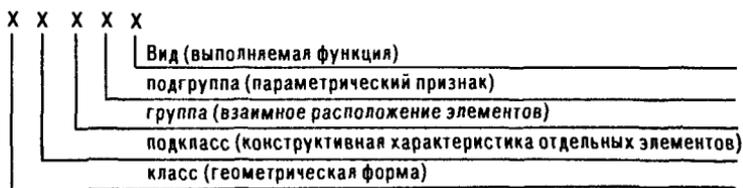


Рис. 1.4. Структура конструкторского кода изделия

Учитывая статистическую природу прочности материала и вероятностное распределение нагрузки [можно построить графики плотностей вероятности распределения  $P(x)$  по напряжениям  $\sigma$ ] определяют запас статистической прочности  $n = \sigma_b / \sigma_{\max}$ , где  $\sigma_b$  – предел прочности материала;  $\sigma_{\max}$  – максимальное действующее напряжение.

Конструктивная определенность (КО) как комплексный показатель качества изделий, в свою очередь, может быть представлена системно, состоящей из нескольких единичных показателей: внешнего вида, массы и отклонений массы от номинала, точности размеров, формы; шероховатости поверхности; уровня остаточных напряжений; прочностных параметров и т. д. Каждый единичный показатель относится к показателю первого порядка – если отклонения его значений за допустимые пределы сразу же устраняют конструктивную определенность данного изделия (см. выше – допускаемые изменения размеров изделия в сравнении с величинами допусков по различным квалитета́м).

Показатели качества определяются технологическим состоянием изделия (т. е. той фазой технологического процесса, в которой эти показатели не только достигаются, но и сохраняются неизменными). Общие условия соблюдения требований, предъявляемых к качеству пластмассовых изделий – см. стр. 16.; в ГОСТ 24105–80 даны определения дефектов внешнего вида.

После выбора материала и показателей качества изделий возможно реализовать следующий шаг, особо актуальный в современном производстве при наличии в отрасли (или вообще в народном хозяйстве, без четко выраженной отраслевой принадлежности) автоматизированного банка данных по пластмассовым изделиям и автоматизированной информационно-поисковой системы (АИПС); этот шаг – классификация (конструкторская и технологическая) и кодирование изделий.

Конструкторский код изделия строится по принципу иерархической системы: его структура показана на рис. 1.4.

Технологический код изделия строится на основе фасетной системы классификации, позволяющей производить многоаспектный поиск информации по любому набору признаков, что необходимо для выявления аналогов; в этом коде имеется постоянная часть (габариты изделия, тип, материал, способ формования) и переменная часть

(площадь формования, марка материала, качество размеров, степень сложности изделия и его толщина, вид дополнительной обработки, масса).

Оба кода указывают в паспорте изделия; на их основе в дальнейшем составляется код формующего инструмента, другие коды, используемые для обращения в АИПС, из банка данных которого можно подобрать аналог – конструкцию универсального блока, стационарной формы, формовкладыша (см. гл. 2, 3).

### *1.2.2. Технологичность изделий (общая и поэлементная)*

Оценка общей технологичности пластмассового изделия проводится аналогично изложенному в разд. 1.1.1. Однако при проектировании изделий из пластмасс, формуемых в металлических формах, следует учитывать дополнительно следующие основные рекомендации.

Конфигурация изделия должна быть такой, чтобы оно легко оформлялось и извлекалось из формы; было простым в изготовлении и удобным в эксплуатации (иногда целесообразно изготовление вместо сложного двух или более простых изделий с последующей сборкой их в узел). К упрощению изделия всегда следует стремиться по технологическим, эксплуатационным и экономическим соображениям: чем оно проще, тем дешевле форма, выше производительность труда, точность и качество изделия и ниже их себестоимость. С другой стороны, некоторое усложнение конфигурации, например благодаря введению ребер жесткости, обеспечивает большую прочность изделия при минимальной массе; при больших плоских поверхностях изделий ребра жесткости позволяют избежать их коробления.

Общая технологичность конфигурации изделия и поэлементная технологичность (отдельных типовых конструктивных элементов) изделия в дополнение к отмеченным в разд. 1.1.1 целям направлена на обеспечение: рациональных условий заполнения расплавом формующей полости, повышение прочности и уменьшение остаточных напряжений в изделиях (или рациональное управление ими), повышение точности размеров и степени точности отклонений от правильной геометрической формы поверхностей изделий и положения их осей; уменьшение или полное устранение необходимости механической обработки и зачистки после формования изделия. Вклад общей конфигурации и отдельных типовых конструктивных элементов изделий в решение перечисленных задач различен (что будет уточнено в этом разделе дальше) и переменен в зависимости от производственных возможностей, программы выпуска, других технико-экономических факторов.

Общая конфигурация изделия – это главное – не должна препятствовать течению расплава при заполнении формующей полости. Поэтому и надо всегда стремиться к возможно большему упрощению формы, ее наружных и внутренних поверхностей.

На выбор формы изделий прежде всего влияет текучесть, или вязкость, пластмассы. Особенно это влияние проявляется у малоте-

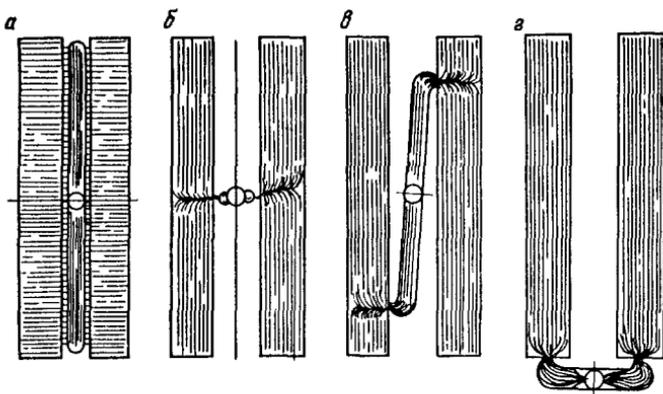


Рис. 1.5. Влияние формы изделия и условий его эксплуатации на выбор вариантов ориентации массы при заполнении формующего гнезда. Пояснения в тексте

кучих терморепактивных пресс-материалов. Изделия из этих пластмасс должны быть невысокие, без тонких стенок, ребер и сквозной арматуры. Конфигурация изделия должна обеспечить наиболее короткий путь потоку массы. Это главным образом требуется при литье под давлением любых изделий, особенно разнотолщинных. Условия течения массы влияют на характер и величину внутренних напряжений, усадку и ориентацию материала, анизотропию прочностных и точностных характеристик изделий (рис. 1.5). Если изделие при эксплуатации испытывает сжимающие нагрузки, то его следует изготавливать по варианту „а“, если изгибающие – то по варианту „г“; важно при этом правильно учитывать места образования „спаев“ (места встречи потоков расплава).

При конструировании изделий, изготавливаемых штамповкой, следует стремиться к созданию таких геометрических форм, при которых возможности образования трещин, ореолов и расслоений были бы минимальными. Наиболее технологичными формами плоских изделий из пластмасс являются круглая, овальная или любая другая, но с плавными очертаниями.

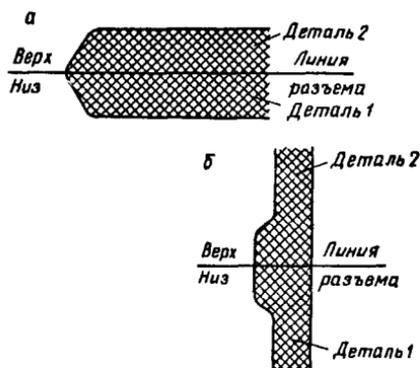
Форма изделия должна обеспечивать возможность применения неразъемных матриц и пуансонов; разъемные элементы резко повышают стоимость и увеличивают трудоемкость процесса изготовления.

Форма сопрягаемых изделий важна для точной подгонки их. Например, на рис. 1.6 показаны варианты – контуры под углом, в виде приливных поясков, обеспечивающие определенность и качество сопряжений двух изделий.

Форма изделия имеет принципиально важное значение для выбора плоскости разъема формующего инструмента, которая должна быть расположена так, чтобы не было затруднений для извлечения изделий после их формования. От положения плоскости разъема зависит точность элементов изделий (см. разд. 1.2.4).

Рис. 1.6. Варианты формы сопрягаемых изделий:

а — контуры под углом; б — приливные полосы



Рассмотрим достаточно кратко технологичность типовых конструктивных элементов изделий, т.е. таких, которые имеются у всех изделий (стенка, дно, торцы, опорные поверхности, радиусы, у большинства (уклоны поверхностей, ребра жесткости, отверстия и углубления)

или у изделий с особыми функциональными признаками (резьбовых, армированных и т. д.). Подробнее об этом см. [3].

Толщина стенок и дна изделий из пластмасс оказывает существенное влияние на возникновение напряжений в изделии, на точность изготовления и время выдержки при формовании, т. е. на эксплуатационные и технико-экономические показатели. Разнотолщинность изделий вызывает неравномерную усадку, являющуюся причиной образования вздутий, трещин и коробления. Значительная толщина стенки вызывает большую по величине усадку, также приводящую к короблению. Все это объясняется главным образом неравномерностью протекания процессов формования пластмассы в форме и охлаждения изделий после их извлечения из формы. Отсюда одно из главных условий наивысшей технологичности конструкции изделия — оно должно быть равнотолщинным. Реально это возможно не часто, но конструктор изделия обязан всегда стремиться к достижению наименьшей разностенности; имеются проверенные опытом рекомендации допустимой разносторонности — 1:2 для изделий из термопластов и 1:3 для изделий из реактопластов, но они являются весьма ориентировочными.

Толщину стенок назначают, как правило, в зависимости от габаритных размеров, необходимой механической прочности изделия и текучести данной пластмассы. Минимальную толщину стенок можно выбирать в зависимости от высоты прессованного изделия или от длины пути потока расплава термопласта в форме (рис. 1.7).

Для изделий из пластмасс рекомендуют также следующие эмпирические формулы — для реактопластов и для термопластов соответственно:

$$s_{\min} = 2h / (L_{\text{тек}} - 20) + 1 / \lg(0,1a) \quad \text{и} \quad s_{\min} = 0,8 \sqrt[3]{h - 2,1}$$

где  $s_{\min}$  — наименьшая допускаемая толщина стенки, мм;  $h$  — предполагаемая высота стенки, мм;  $L_{\text{тек}}$  — текучесть пресс-материала по Рашигу, мм;  $a$  — ударная вязкость пластмассы в Н·см/см<sup>2</sup>.

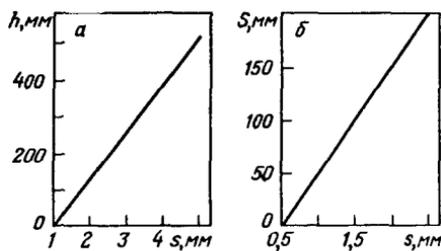


Рис. 1.7. Определение минимальной толщины стенок изделий из пластмасс:

а — терморективных; б — термопластичных;  $h$  — высота изделия;  $s$  — толщина изделия;  $S$  — длина пути расплава термопласта

Формула для реактопластов дает удовлетворительные результаты при следующих параметрах: высота стенки до 160–200 мм, величина текучести по Рашигу от 50 до 200 мм, ударная вязкость пресс-материала от 25 до 1000 Н·см/см<sup>2</sup>.

Наиболее часто равнотолщинность нарушается в узлах — местах переходов от стенки к дну изделия, при пересечении стенок друг с другом или ребрами жесткости, ребер жесткости между собой — даже при одинаковых толщинах соединяющихся или пересекающихся элементов. Это объясняется увеличением массы материала в узлах, из-за чего увеличивается вероятность появления дефектов: усадочных утяжек, микро- и макротрещин и т. д. На рис. 1.8 показаны возможные варианты сопряжения стенок одинаковых толщин. К анализу этих вариантов применен графический метод определения увеличения массы в узлах. Необходимо устранять подобные узлы, для чего выполняют, например, скругления углов стенки и дна из одного центра — для внутренней и наружной поверхностей; в местах пересечения ребер предусматривают кольцевую перемычку и т. д.

На тонкостенных изделиях небольшая разнотолщинность, соизмеримая с точностью изготовления формы, часто отрицательно не проявляется, и отмеченное выше относится к изделиям относительно толсто стенным, на которых дефекты становятся заметными.

Слишком тонкие стенки вызывают значительные трудности при изготовлении изделий. Опыт показывает, что возможно получить в серийном производстве изделий из пресс-порошков с диаметральными размерами до 50 мм и высотой до 10 мм толщины стенок до 0,5 мм; такие же и меньшие (до 0,3 мм) — при пресс-литье малогабаритных изделий из волокнистых пресс-материалов типа АГ-4 и литье под

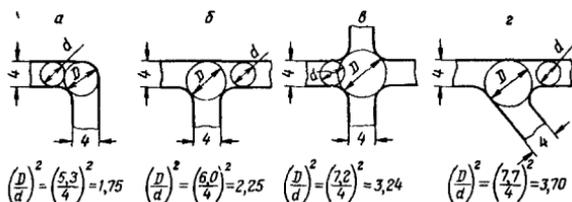


Рис. 1.8. Варианты сопряжения стенок одинаковой толщины (например,  $S = 4$  мм). Увеличение массы материала в „узлах“ сопряжения (%) составляет 75 (а), 125 (б), 224 (в), 270 (г)

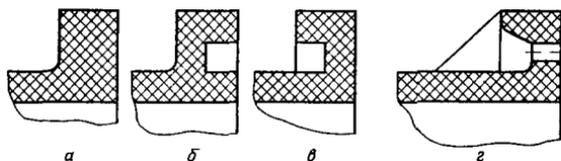


Рис. 1.9. Варианты «облегчения» торцев изделий:

а — неверно; б, в — достижение равенственности; г — повышение жесткости за счет применения ребра

давлением изделий из полиамидов. Для изделий из масс холодного прессования минимальная толщина стенок должна составлять 4–6 мм.

Вопрос назначения оптимальных толщин стенок связан не только с конструкционной целесообразностью, но и с технологическими возможностями. Необходимо предусматривать опасности незаполнения расплавом узких щелей в полости формы, например при литье под давлением располагать впускные каналы для расплава в соответствующих тонкостенных участках и учитывать повышение вязкости расплава за счет его саморазогрева (см. гл. 3); с другой стороны, и утолщенные участки требуется лучше подпитывать для компенсации дефицита массы, возникающего при охлаждении расплава, усадке его.

**Торцы изделий** не должны быть чрезмерно утолщенными, чтобы облегчить формование и извлечение изделия, упростить конструкцию формы. Особенно важным является правильное оформление тех торцев изделия, по которым происходит выталкивание его из формы. При выталкивании может происходить изгиб или поломка дна изделий, особенно тонкостенных. Поэтому следует упрочнять изделия в точках выталкивания.

Торцы конструируют в виде буртиков разнообразных конструкций, выполненных, как правило, по периметру изделия и предохраняющих края его от поломок, уменьшающих коробление; при этом толщина буртиков должна быть в пределах допустимой разнотолщинности (см. выше). На рис. 1.9 показаны типичные примеры решений по облегчению торцев и одновременно повышению их прочности и жесткости за счет применения ребер.

Опорные поверхности служат для монтажа изделий из пластмасс. Эти поверхности должны быть такими, чтобы препятствовать короблению после извлечения изделия из формы и в процессе ее эксплуатации, выдерживать необходимые нагрузки и т. д. Сплошные опорные поверхности, не обеспечивающие устойчивости изделия, заменяют выступами, буртиками, ножками, бобышками (особенно у изделий, имеющих значительную протяженность или площадь). Эти конструктивные элементы должны выступать над поверхностью не более чем на 0,3–0,5 мм. Лучше всего применять трехточечные опоры. Крепежные проушины и выступы должны быть достаточно прочными и жесткими,

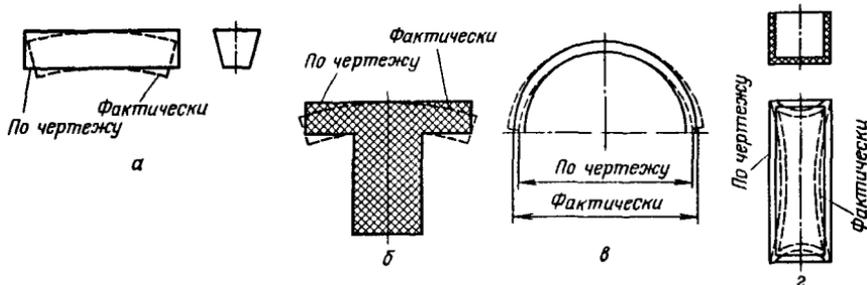


Рис. 1.10. Примеры конструкций изделий без специально выполненных опорных поверхностей и торцов (штрихами указаны направления коробления, деформации элементов). Пояснения в тексте

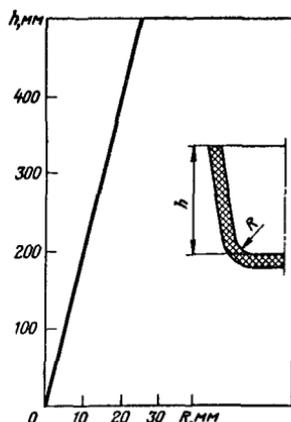


Рис. 1.11. Рекомендуемые радиусы закругления  $R$  в зависимости от глубины  $h$  формуемой детали

чтобы выдержать усилие, прикладываемое к изделию при сборке. Как правило, крепежные проушины укрепляют ребрами жесткости.

Нерациональные конструкции опорных поверхностей являются одной из причин возникновения погрешностей формы пластмассовых изделий, величины которых зависят от конфигурации и габаритов изделия, а также от температурных и временных параметров процесса изготовления и способа извлечения изделий из формы.

Отклонения от правильной геометрической формы плоских поверхностей — непрямолинейность, неплоскостность — находятся в прямой зависимости от величины стрелы прогиба изделия. Значения максимально допустимых величин стрелы прогиба (в мм) в зависимости от наибольшего размера изделий из пластмасс определяются по следующей эмпирической формуле:

$$f_{\max} = kL_{\max} + 0,1,$$

где  $L_{\max}$  — наибольший размер, измеренный на данной плоскости — диаметр, любая сторона, диагональ, мм;  $k$  — коэффициент, равный 0,01 для реактопластов и 0,016 для термопластов.

На рис. 1.10 приведены примеры формуемых изделий, показывающие важность рационального конструирования опорных поверхностей и торцов. Изделие в виде бруса (рис. 1.10, а) с трапециевидальным

поперечным сечением коробится, обращаясь выпуклостью к большему основанию трапеции, поскольку с этой стороны оно медленнее охлаждается; изделие Т-образной конфигурации (рис. 1.10, б) коробится, „опуская” полочку, поскольку внутренняя часть его охлаждается медленнее наружной; изделия с подковообразными сечениями (рис. 1.10, в) деформируется в сторону „разгибания подковы” также благодаря более интенсивному охлаждению наружной стороны; изделия коробчатой формы (рис. 1.10, г) имеют тенденцию к прогибу стенок вовнутрь — это характерно и для термопластичных изделий, получааемых литьем под давлением.

**Радиусы закруглений** на наружных и внутренних поверхностях изделий из пластмасс позволяют облегчить течение массы в форме, упростить ее изготовление и уменьшить износ, упростить извлечение изделий после формования, улучшить внешний вид. Благодаря закруглениям устраняются или заметно снижаются напряжения, уменьшаются величина и колебание усадки изделия, повышается точность.

Особенно важны закругления на поверхности изделий из термопластов, так как при их изготовлении напор массы достаточно велик и плавные переходы между поверхностями необходимы для обеспечения максимального и быстрого заполнения формы.

Радиусы закруглений не предусматриваются, как правило, только у поверхностей, находящихся в плоскости разъема форм (при прессовании), так как закругления или фаски величиной 0,2–0,3 мм на этих поверхностях образуются после снятия облоя механическим путем.

Выбор величин радиусов закруглений зависит от глубины детали (рис. 1.11), а также толщины стенки и материала изделия.

Оформление радиусов закруглений имеет свою специфику при изготовлении изделий из слоистых пластмасс. Для сохранения монолитного материала при штамповке форма изделия должны быть круглой, иначе говоря, острые, прямые и тупые углы необходимо как снаружи, так и в отверстиях выполнять закругленными при определенных минимальных значениях радиусов закруглений. Радиусы закруглений здесь уменьшают последующее после штамповки пружинение материала (при вырубке изделия без нагрева) или пружинение и усадку материала (при вырубке изделия с нагревом), повышая точность изготовления изделий.

**Технологические уклоны** поверхностей изделий из пластмасс облегчают выталкивание их из формы после окончания цикла изготовления. Технологические уклоны могут иметь одновременно и конструктивное значение. Уклоны не назначаются: если конфигурация изделия сама способствует простому извлечению ее (например, конусный стакан); если внутренняя полость изделия имеет сложную форму, способствующую тому, что изделие при раскрытии формы останется на пуансоне, а формовать это изделие в матрице нежелательно из-за следов выталкивателей; если высота буртов или углублений не превышает 1–5 мм; если изделия тонкостенные и име-

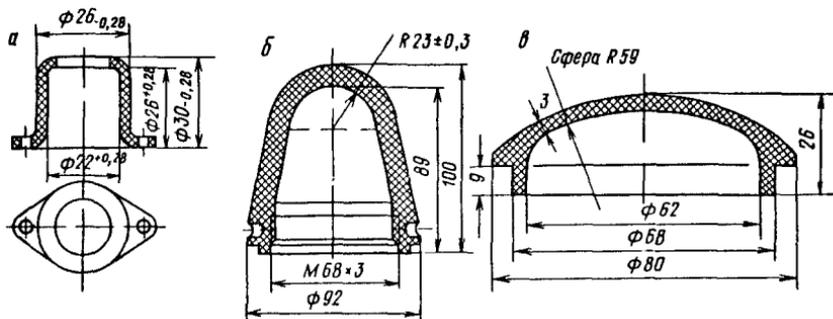


Рис. 1.12. Пластмассовые изделия без уклонов:  
 а — стакан; б — колпачок; в — заглушка

ют высоту 10–15 мм. Иногда предусматривается обратный конус. На рис. 1.12 приведены примеры оформления изделий без уклонов.

Технологические уклоны необходимо назначать на вертикальные поверхности, параллельные направлению усилия замыкания формы, а также на те поверхности изделий, которые параллельны направлению перемещения составных частей сложных форм.

Величина технологического уклона оказывает существенное влияние на размерную точность соответствующих элементов изделий (рис. 1.13).

Величина одностороннего уклона определяется в зависимости от высоты  $H$  пластмассового изделия и угла уклона  $\alpha$ . При  $\alpha \leq 1^\circ$  погрешность от уклона должна располагаться в заданном поле допуска размера, на точность которого влияет уклон (как и другие погрешности геометрической формы, если они не оговариваются особо). При

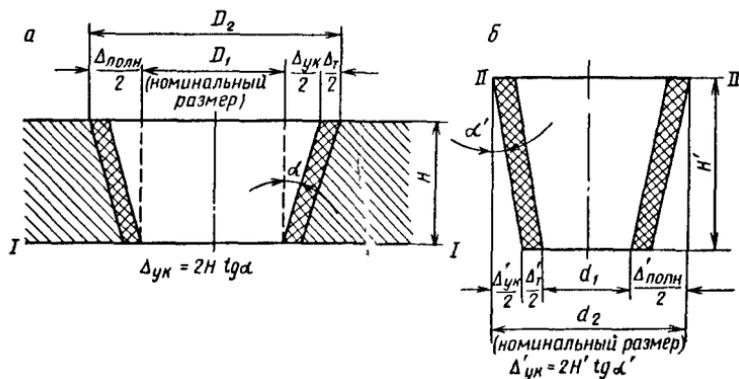


Рис. 1.13. Влияние технологического уклона на точность размера изделия:  
 а — плоскость разреза формы I—I; б — плоскость разреза формы II—II

$\alpha > 1^\circ$  поверхности изделия рассматриваются как конические или плоские сходящиеся.

Рекомендуемые для различных поверхностей изделий из пластмасс значения углов уклона  $\alpha$ :

|  |                    |
|--|--------------------|
| Наружные поверхности .....   | 30'; 45'; 1°; 1,5° |
| Внутренние поверхности и отверстия глубиной более 1,5d (d — диаметр отверстия) ..... | 45'; 1°; 2°        |
| Отверстия глубиной до 1,5d .....   | 30'; 45'           |
| Ребра жесткости, выступы и т. д. ....  | 1°; 2°; 5°; до 10° |

При назначении угла уклона необходимо учитывать также способ выталкивания пластмассового изделия, шероховатость поверхности формирующих деталей, состав перерабатываемой пластмассы. Минимально допустимые значения технологических уклонов для изделий из полистиролов, этролов, полиамидов составляют 30' и 45', а для деталей из полиэтилена 45' и 1° (соответственно на внутренних и наружных поверхностях). На практике часто уклон задают на чертеже двумя размерами.

Если матрицы форм изготавливают выдавливанием, то технологические уклоны наружных поверхностей пластмассовых изделий оказываются увеличенными (так как при малых уклонах, указанных выше, выдавить внутреннюю полость матрицы трудно).

**Ребра жесткости** конструируют для общего увеличения прочности, жесткости изделий, локального усиления особо нагруженных во время эксплуатации частей, выступающих элементов, а также из технологических соображений — для более равномерного распределения по всему объему изделия внутренних напряжений, усадки. Ребра жесткости позволяют уменьшить поперечные сечения отдельных элементов изделий. В зависимости от назначения ребра жесткости подразделяют на усиливающие, разводящие (рассредоточивающие), обеспечивающие равномерность, конструктивные, технологические. На плоских поверхностях изделий из пластмасс они во многих случаях способствуют обеспечению требуемой прочности, предохранению от коробления. Предпочтительно конструировать тонкостенные изделия, но с ребрами жесткости. Сами ребра должны иметь равномерную толщину, конусность в направлении замыкания формы и закругленные внутренние и наружные края.

Наиболее часто на практике встречается форма ребра жесткости в виде усеченного конуса с закругленной вершиной и плавным переходом от стенки ребра к изделию. Если выталкивание изделий из формы осуществляется по ребру жесткости (для чего особенно часто используют ребра по внутренней поверхности), то следует иметь в точках выталкивания местные небольшие утолщения с плоской вершиной. Высота ребер определяется их числом и конструкцией изделия: у плоских изделий она обычно равна удвоенной ширине его у основания. Высота внутренних ребер должна быть не менее чем на 0,5 мм меньше общей высоты изделия. Это делается для упрощения последующей механической обработки поверхности, а также для того, чтобы облегчить монтаж или сборку изделий.

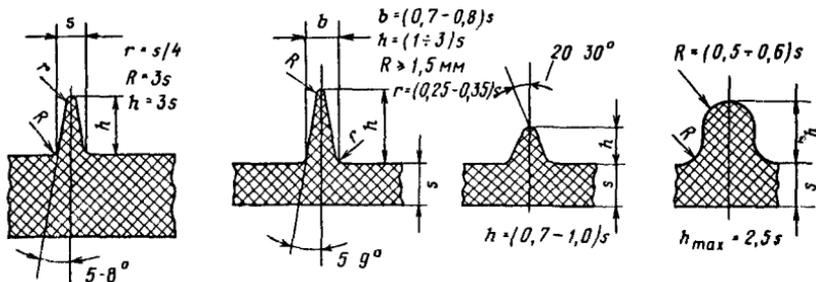


Рис. 1.14. Рекомендуемые соотношения размеров элементов ребер жесткости изделий из пластмасс

При конструировании изделий с ребрами жесткости следует либо вообще избегать замкнутых контуров, либо стремиться к тому, чтобы периметр замкнутых контуров ребер жесткости был по возможности минимальным, так как пластмасса, находящаяся внутри контура, не имеет возможности свободно усаживаться, что приводит (особенно при малой толщине стенок) к появлению трещин.

Рекомендуемые соотношения размеров элементов ребер жесткости приведены на рис. 1.14. Ребра следует располагать на прямых участках диагонально или диаметрально так, чтобы они работали при эксплуатации изделия на сжатие, а не на растяжение. Для увеличения жесткости крышек, днищ крупногабаритных изделий, боковых стенок, если допустимо конструктивно, применяют мелкие ребра (высотой 0,5–1,0 их ширины) – нервюры.

**Отверстия и углубления** в пластмассовых изделиях, их расположение и число влияют на величину усадки и точность размеров; в изделиях из пластмасс можно получить отверстия любой конфигурации. Однако следует принимать во внимание трудоемкость изготовления соответствующих знаков форм, исходя из чего предпочтительнее более простые конфигурации отверстий; они же легче поддаются точному измерению. Любой тип отверстия может быть сквозным и глухим, ступенчатым. Возможная конфигурация и соотношение размеров сквозных отверстий приведены на рис. 1.15.

Отверстия в изделиях из пластмасс могут быть выполнены полностью во время формования, частично в форме с последующим сверлением, сверлением после формования.

Соотношения расстояний между отверстиями (величина перемычки) и расстояний от края отверстия до края изделия должны быть такими, чтобы исключить возможность поломки, растрескивания.

Наиболее целесообразно отверстия располагать в направлении приложения усилия замыкания формы. Однако иногда они необходимы в плоскостях, перпендикулярных направлению приложения усилия формования.

Наибольшую длину глухих отверстий, расположенных в направле-

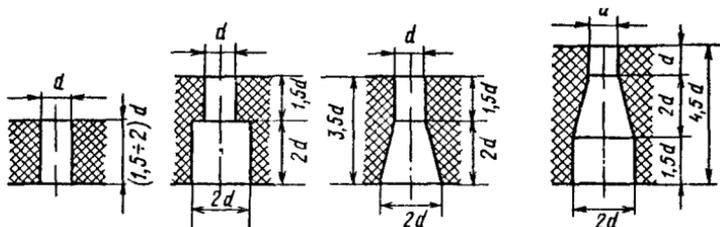


Рис. 1.15. Возможная конфигурация и соотношения размеров сквозных отверстий в изделиях из пластмасс

нии, перпендикулярном направлению формования, можно определить по формуле

$$l = d[E\pi f_{\max}/(8\rho_0)]^{1/4},$$

где  $l$  — длина отверстия;  $d$  — диаметр отверстия;  $E$  — модуль упругости материала формирующего знака;  $f_{\max}$  — величина допустимого прогиба;  $\rho_0$  — удельное давление на материал в процессе формования.

Приведенная формула пригодна для определения длины только цилиндрических отверстий (при величине одностороннего уклона, не превышающей  $-1:50$ ).

Допускаемую длину сквозных отверстий, также расположенных перпендикулярно направлению формования, можно определять по формуле:

$$l = d[6E\pi f_{\max}/(5\rho_0)]^{1/4}.$$

Номограмма на рис. 3.16 построена по приведенным формулам при  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $f_{\max} = 0,005$  см. Наклон линий 1–7 связан с заданным удельным давлением  $\rho_0$ : 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 МПа.

В отдельных случаях при конструировании изделий можно допускать расположение отверстия под углом к вертикали, на разных осях и т. д., причем сами отверстия могут иметь различную конфигурацию. При этом изделия из пластмасс нужно конструировать обязательно с совмещенными центрами отверстия и радиуса закругления края наружной поверхности.

Изделия с отверстиями под крепежные болты следует конструировать так, чтобы использовать прокладочные шайбы для увеличения опорной поверхности.

Минимально возможные размеры отверстий в изделиях из слоистых пластиков, получаемых штамповкой или вырубкой, зависят от формы отверстий и составляют для круглых отверстий  $d = 0,50s$ , для квадратных отверстий  $d \geq 0,45s$  (где  $s$  — толщина листа, а  $d$  — соответственно диаметр круглого отверстия, размер стороны квадрата или размер наименьшей стороны прямоугольного отверстия). Практически все отверстия по технологическим причинам следует изготавливать с

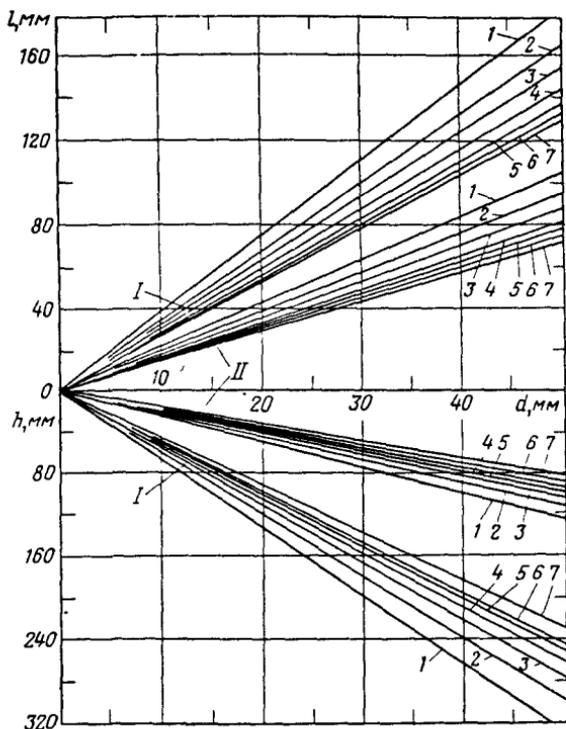


Рис. 1.16. Номограмма для определения максимально допустимых длины  $l$  и высоты  $h$  отверстий — сквозных (I) и глухих (II)

технологическими уклонами, направление которых соответствует направлению формы.

Углубления, пазы и подобные специфические конструктивные элементы различного назначения, позволяют выравнять толщины стенок и дна, массу изделия. Иногда возникает конструктивная, функциональная необходимость выполнять их как поднутрения, т. е. располагать оси углублений, пазов, выемок материала под углом к основному направлению формования изделия. Это всегда связано с усложнением конструкции формующего инструмента (применяют разъемные вставки, знаки, требующие закрепления, и т. д.).

**Резьба в изделиях из пластмасс** получается, как правило, непосредственно в процессе формования. При изготовлении резьбы необходимо считаться с усадкой материала и спецификой изготовления формующих знаков и колец. Прессованием или литьем под давлением могут быть получены резьбы на внутренней и наружной поверхностях диаметром 2,8–3 мм и более и с шагом не менее 0,7 мм. Профиль резьбы может быть любым, но предпочтительнее метрическая резьба по ГОСТ 11709–81 (если по условиям эксплуатации для образования

резьбового соединения не требуется иной резьбы – круглой, крепежной, трапецеидальной) – см. разд. 1.2.4 и гл. 2 (табл. 2.7). Указанный стандарт регламентирует нормы взаимозаменяемости резьбовых пластмассовых изделий.

Резьбовыми кольцами (или матрицами) оформляются резьбы на наружной поверхности изделия. В зависимости от конструкции изделия матрицы или кольца могут быть цельными или разборными, состоящими из двух или более секторов. Разборные кольца рекомендуются как обязательные при формовании наружной резьбы на изделиях из хрупких пластмасс, например из полистирола. Использование такой разборной оснастки полностью исключает повреждение поверхности резьбы при вывинчивании деталей из формы. Однако при этом требуется зачистка облоя по плоскостям разреза, ухудшающая качество поверхности.

Если в резьбовом соединении используется болт (винт) металлический, то пластмассовую гайку целесообразно выполнять с запрессованной металлической резьбовой арматурой (втулкой), поскольку при многократном свинчивании пластмассовая резьба относительно быстро разрушается.

Соотношения диаметров и длин рабочей части резьбовых знаков (т. е. глубина формования) могут быть приняты такими же, как для гладких стержней, оформляющих отверстия. Обычно в большинстве случаев не требуется глубоких резьбовых отверстий, и глубина формования назначается равной 1,5–2 диаметрам резьбового знака. Перемычку между резьбовыми отверстиями и расстояние от отверстий до краев детали следует увеличивать примерно в 1,5 раза по сравнению с гладкими отверстиями.

Примеры оформления резьб на деталях из пластмасс приведены на рис. 1.17. Если резьба на поверхности изделия имеется в двух или более различных местах, она должна иметь одинаковый шаг. Заходная часть резьбы выполняется так, чтобы на длине  $(0,5 + 1,0)p$  ( $p$  – шаг) не было нарезки, что облегчает свинчивание в начальный момент. На другом конце резьбы также может быть предусмотрен участок без нарезки, если это не мешает извлечению изделия из формы.

Резьбовые поверхности изделий из слоистых пластмасс обычно нарезают метчиками, что позволяет получать как сквозные, так и глухие отверстия. В последнем случае необходимо предусмотреть возможность для выхода стружки. Известны и широко распространены способы нарезания резьбы самонарезающими гайками в предварительно отформованных отверстиях.

Резьба в изделиях из пластмасс должна конструироваться (выбираться) на основании расчетов. В резьбовом соединении, как известно, возникает осевая сила, создающая растягивающие осевые напряжения в стенках изделия и сжимающие напряжения на поверхности резьбы. При большом числе витков резьбы сжимающие напряжения уменьшаются, а растягивающие – увеличиваются, и возрастает опасность разрушения изделия от их действия.

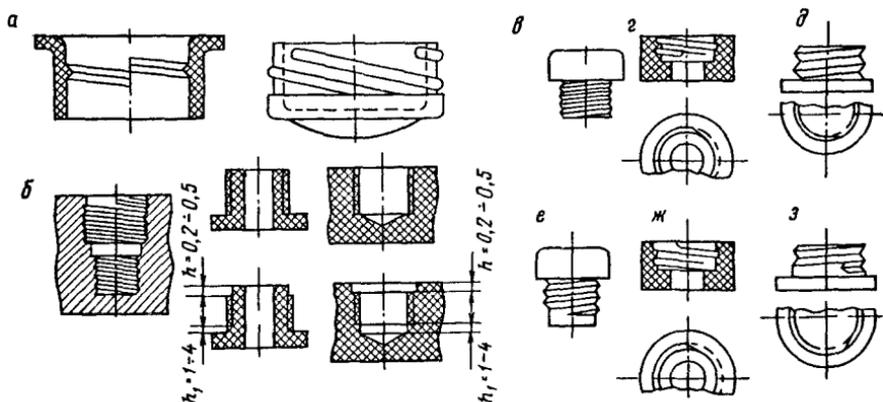


Рис. 1.17. Оформление резьб на поверхностях изделий из пластмасс:

а — одно- и многозаходная резьба; б — резьба одинакового шага на двух последовательно расположенных участках; в, г, д — неправильные; е, ж, з — правильные конструкции резьбовых изделий

Из условия равнопрочности стенки изделия на растяжение ( $\sigma_p$ ) и резьбы на смятие ( $\sigma_{см}$ ) рассчитывают число витков резьбы:

$$n_1 = (\sigma_p / \sigma_{см}) (\sigma / h),$$

где  $h$  — высота резьбы;  $\delta$  — толщина стенки изделия, определенная по впадинам резьбы.

Из условия равнопрочности на растяжение и изгиб стенки резьбового изделия рассчитывают число витков резьбы:

$$n_2 = 3(\delta + h) / \delta,$$

причем всегда  $n_2 > n_1$ .

Из условия равнопрочности в осевом и тангенциальном направлениях число витков определяют по формуле  $n_3 = d / (2ptg\alpha)$ , где  $d$  — диаметр резьбы;  $\alpha$  — угол наклона боковой поверхности витка резьбы (для упорных и круглых резьб  $\alpha = 90^\circ$  и  $n = 0$ ).

При максимальной осевой нагрузке вследствие деформации резьбы образуется радиальный зазор:

$$\Delta_3 = (\sigma_p / E) [d^2 / (4nptg\alpha)].$$

Если  $\Delta_3 = h$ , то происходит выдергивание болта или гайки (при условии, что пластмасса достаточно эластична и не разрушается при напряжении  $\sigma_p$ ).

Вместо резьбы в соединениях типа „пластмасса — пластмасса” в последние годы применяют различные замковые конструкции, используя эластичные свойства материалов. На рис. 1.18 показан пример такой конструкции. Здесь важно точно определить размеры уступа и канавки. При разъеме соединяемых изделий осевое усилие должно отогнуть конец изделия с уступом и вывести его без повреждения из канавки; для этого угол должен быть в пределах  $30 - 40^\circ$ , а высота

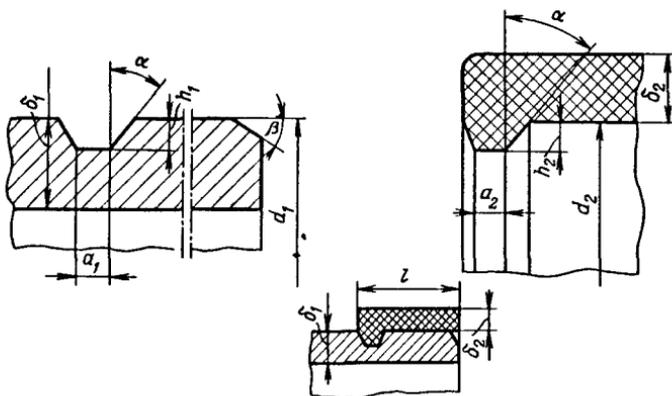


Рис. 1.18. Вариант конструкции замкового соединения двух изделий

$l = (0,2 \div 0,3)\delta$ ; размеры  $a$  и  $h$  целесообразно принимать равными для обеих соединений изделий:  $d_2 < d_1$ ;  $\beta = 15 \div 20^\circ$  — обозначения см. на рис. 1.18.

**Конструкции пластмассовых изделий с металлической или другой арматурой** — это неразъемные соединения, образующиеся непосредственно в процессе формования — за счет усадки материала, разности коэффициентов теплового линейного расширения пластмассы и металла (или другого материала) арматуры.

Необходимость применения арматуры появляется в следующих случаях: когда без нее нельзя повысить прочность или жесткость отдельных участков изделия; для повышения точности и определенности сопряжения изделия с другими, особенно металлическими; для повышения стойкости к износу из-за истирания или заедания пластмассы; для создания более плотного резьбового соединения и крепления других изделий болтами или заклепками.

Арматура бывает трех видов: втулочная, стержневая, листовая (плоская), причем для любого из этих видов — сквозная и глубокая (т. е. выходящая из изделия).

Известны способы образования сборно-разборной конструкции, когда арматура устанавливается в заранее изготовленное изделие сразу после извлечения его из формы. И в этом случае соединение происходит за счет усадки материала, который плотно охватывает арматуру.

Наконец, может быть осуществлено неподвижное или разъемное соединение пластмассового изделия с арматурой после охлаждения изделия. При этом неподвижное соединение создается, как правило, с помощью клея, развальцовкой и т. д.

Конструкции изделий с запрессованной арматурой обеспечивают относительно высокую прочность крепления арматуры в пластмассе (при правильно выбранной форме и конструкции арматуры) и высокую

точность координации арматуры. Однако такие конструкции обладают и рядом существенных конструктивных ограничений: возможно появление значительных трещин в материале изделия из-за различных коэффициентов линейного расширения пластмассы и металлической арматуры; повышается вероятность выхода из строя изделий с запрессованной арматурой во время эксплуатации, особенно в условиях резкой перемены температур и в тропических условиях из-за наличия микротрещин в пластмассе вокруг арматуры; увеличивается продолжительность загрузки горячей формы, особенно при больших партиях изделий и малых размерах запрессованной арматуры, удлиняется цикл изготовления таких изделий; возрастает процент брака из-за арматуры (происходит затекание массы на арматуру при формовании); увеличивается процент вероятного брака готовых изделий с арматурой из-за повреждения арматуры при эксплуатации (срыв резьбы, повреждение слоя гальванического покрытия и т. д.); возникают дополнительные источники неравномерного охлаждения изделия после формообразования и, как следствие, внутренние напряжения, приводящие к образованию трещин; значительно увеличивается стоимость и сложность изготовления форм для изделий с металлической арматурой; затрудняется осуществление автоматизации процесса изготовления изделий.

Изготовление армированных изделий путем последующей сборки частично устраняет отмеченные недостатки.

Там, где арматура является токопроводящей, ее необходимо располагать так, чтобы увеличить путь электрического разряда, максимально удаляя контакты друг от друга или вводя дополнительные ребра и пазы.

При запрессовке арматуры во время формования требуются специальные гнезда для установки арматуры. Фиксирование арматуры должно осуществляться достаточно прочно, чтобы она могла противостоять давлению течения массы материала и так, чтобы не происходило затекания массы в гнезда. Кроме того, необходимо, чтобы она удобно устанавливалась в гнезда и был достаточным слой пластмассы вокруг опрессовываемой части арматуры. Материал следует выбирать с учетом свойств контактируемой пластмассы. Например, недопустимо сочетание никелированной и посеребренной арматуры с пресс-материалами, содержащими сернистые соединения.

Металлическая арматура существенно влияет на точность изготовления изделий из пластмасс, так как она затрудняет, сдерживает процесс усадки после извлечения ее из формы, что в равной мере относится как к гладким элементам изделия, так и к межосевым размерам. От рационального расположения арматуры во многом зависит правильная геометрическая форма изделий. Арматуру не следует располагать близко к поверхности, внутренней стенке и краю изделия, а также только с одной стороны изделия во избежание образования трещин, вздутий, коробления и других дефектов.

Минимальные толщины слоя пластмассы вокруг металлической

арматуры (от 0,5 до 5 мм) выбирают с учетом размера опрессовываемой арматуры и физико-механических свойств пластмасс таким образом, чтобы предотвратить появление трещин от усадочных напряжений. Для образования тонких слоев пластмассы на металлических деталях должны применяться материалы, обладающие возможно меньшей усадкой и наиболее низким коэффициентом линейного расширения. Во избежание вспучивания пластмассы над арматурой расстояние  $b$  от ее края по поверхности детали должно быть не менее 1,5–2 мм. Эта рекомендация пригодна для арматуры с наружным диаметром до 5 мм. Если диаметр арматуры  $d$  оказывается больше 5 мм, то расстояние увеличивается в соответствии с увеличением отношения  $d/b$ . Чтобы предотвратить осевое смещение штифтовой или втулочной арматуры (даже при условии, что на арматуре имеется накатка или насечка), следует предусматривать в изделии технологическое отверстие под опорный знак, расположенное на одной оси с арматурой.

Располагать металлическую арматуру перпендикулярно направлению приложения усилия не рекомендуется, однако там, где такая арматура необходима, следует предусматривать возможность установки опорных знаков в форме.

Поперечное сечение металлической арматуры (включая и отверстие в арматуре) должно быть меньше сечения пластмассы. Арматуру следует закреплять в форме, как правило, в одной половине, по возможности в нижней ее части. Варианты закрепления арматуры в пластмассовых деталях приведены на рис. 1.19. Для надежного удержания и предотвращения проворачивания арматуры вокруг оси или вырыва ее из изделия применяются буксы, штифты, втулки, накатка наружной поверхности запрессовываемой части арматуры и кольцевые канавки. Накатка может быть прямой и сетчатой (крест-накрест). При накатке необходимо подрезать посадочный буртик или не доводить ее на 1,5–2 мм до торца, так как края арматуры во время обработки несколько приподнимаются.

Высота накатки, рифлений или насечки может быть рассчитана из условия, что наиболее опасными являются контактные напряжения (допустимые значения этих напряжений для пластмасс – 3–8 МПа). Следует напомнить, что арматуру удерживает сила трения между соприкасающимися поверхностями, возникающая как следствие температурных напряжений; стремление снизить эти напряжения приводит к ослаблению связи арматуры с пластмассой, которую и усиливают неровностями поверхности соприкосновения.

Для предотвращения затекания массы на арматуру и в гнезда круглые гладкие буксы и втулки могут иметь сквозные отверстия, которые, даже если в них попадает пластмасса, легко зачищаются. Используются также специальные резьбовые буксы.

Штампованная листовая арматура малоустойчива по отношению к давлению массы в форме, поэтому желательно так ее располагать, чтобы поток расплавленной массы на своем пути встречал ребро арматуры.

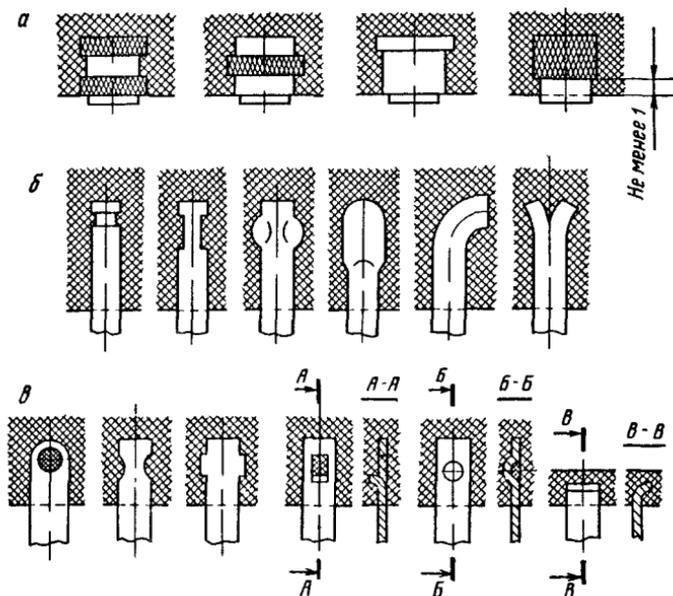


Рис. 1.19. Варианты закрепления арматуры в пластмассовых деталях:  
 а — круглой; б — проволочной; в — лепестковой

Точность изготовления арматуры должна соответствовать ее конструкции и условиям фиксации в форме. Наибольшие требования по точности предъявляются к штампованной листовой и сквозной арматуре. В первом случае это объясняется тем, что под плоскую арматуру необходимо изготовить в форме соответствующие пазы и окна, во втором случае — тем, что точность изготовления размеров изделий из пластмасс по высоте непосредственно зависит от точности изготовления открытой арматуры, т. е. выходящей на поверхность изделия. Если арматура будет иметь большую, чем предусмотрено, высоту, она расплывется, меньшую — она будет заливаться пластмассой. Рекомендуется эти размеры арматуры выполнять по квалитетам  $IT9 \div 10$ .

В случае необходимости запрессовка крупных металлических вставок (например, в деталях электрических машин) при небольшой толщине слоя пластмассы вокруг опрессовываемой арматуры (от 35 до 50% от диаметра арматуры) целесообразно применять метод соединения арматуры с изделием сразу после извлечения его из формы. Этим исключаются трудности, связанные с закреплением или фиксацией громоздкой арматуры в форме и т. д. При конструировании таких изделий размеры отверстий под запрессовку арматуры следует назначать с учетом усадки пластмассы, размеров вставок и необходимого натяга. Первоначально натяг создается за счет усадки пластмассы при остывании изделия со вставленной в него арматурой. Кроме этого натяга для мелких металлических вставок требуется дополнитель-

ный — около 0,025–0,050 мм, а для крупных — примерно 50% от величины усадки.

Пластмассовые изделия с металлической арматурой необходимо рассчитывать на прочность, определяя растягивающие и сжимающие напряжения в стенке изделия (это можно выполнять с учетом или без учета релаксации напряжений в пластмассе; расчетные формулы учитывают также тип арматуры — втулочный или стержневой).

**Накатка и рифление** (а также надписи) — осуществляются в процессе формования и на наружных поверхностях изделий из пластмасс. Часто накатка и рифление применяются в декоративных целях. На поверхности изделий накатки, рифления и надписи необходимо располагать так, чтобы извлечение изделий из форм не требовало применения разъемных частей (знаков, вставок).

Рассмотрим некоторые особенности конструирования изделий из слоистых пластмасс.

**Конструкции изделий из слоистых пластмасс** отличаются анизотропией механических и других свойств. Следовательно, при эксплуатации они должны нагружаться главным образом в направлении их максимальной прочности. Прочность некоторых слоистых пластмасс сравнима с прочностью конструкционных сталей, но модуль упругости их значительно ниже. Это необходимо учитывать в первую очередь при конструировании изделий, от которых требуется достаточная жесткость.

Следует также учитывать, что гибкие конструкции из слоистых пластмасс могут терять свою устойчивость значительно раньше, чем будет исчерпана прочность материала. Поэтому при проектировании конструктивных элементов, работающих на изгиб, особо важно предусмотреть, чтобы направление приложения нагрузки соответствовало тому направлению, в котором модуль упругости материала имеет максимальное значение.

Концентрация напряжений в элементах конструкций из слоистых пластиков опасна, так как резерв пластичности этих материалов, как правило, очень мал и обнаруживается при растяжении в направлении, близком к  $45^\circ$  относительно осей упругой симметрии, в других же направлениях такого резерва практически не существует.

Опасность влияния концентрации напряжений на прочность изделий из слоистых пластиков усиливается неизбежными дефектами структуры материала.

Значительное увеличение концентрации напряжений в элементах конструкций может возникнуть при резком увеличении числа слоев армирующих материалов; этого можно избежать путем постепенного уменьшения длины этих слоев. Указанный прием часто используют в клеевых соединениях, при армировании углов, создании водонепроницаемых соединений — примеры см. на рис. 1.20.

**Постановка размеров на чертеже пластмассового изделия** является важным этапом проектирования, создания технологичного изделия.

Характерные примеры правильной постановки размеров приведены

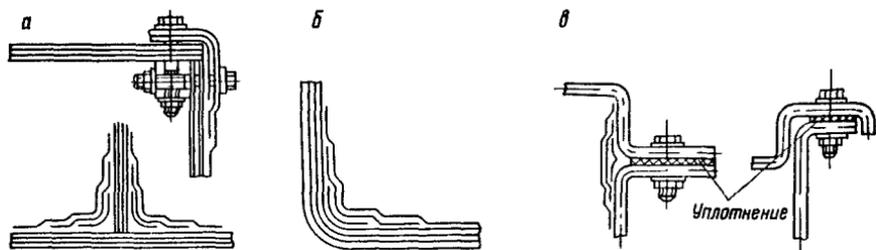


Рис. 1.20. Примеры конструирования изделий из слоистых пластмасс:  
 а — соединение перпендикулярных друг другу стенок; б — образование угла; в — формирование неразъемного (слева) и разъемного (справа) соединений частей изделия

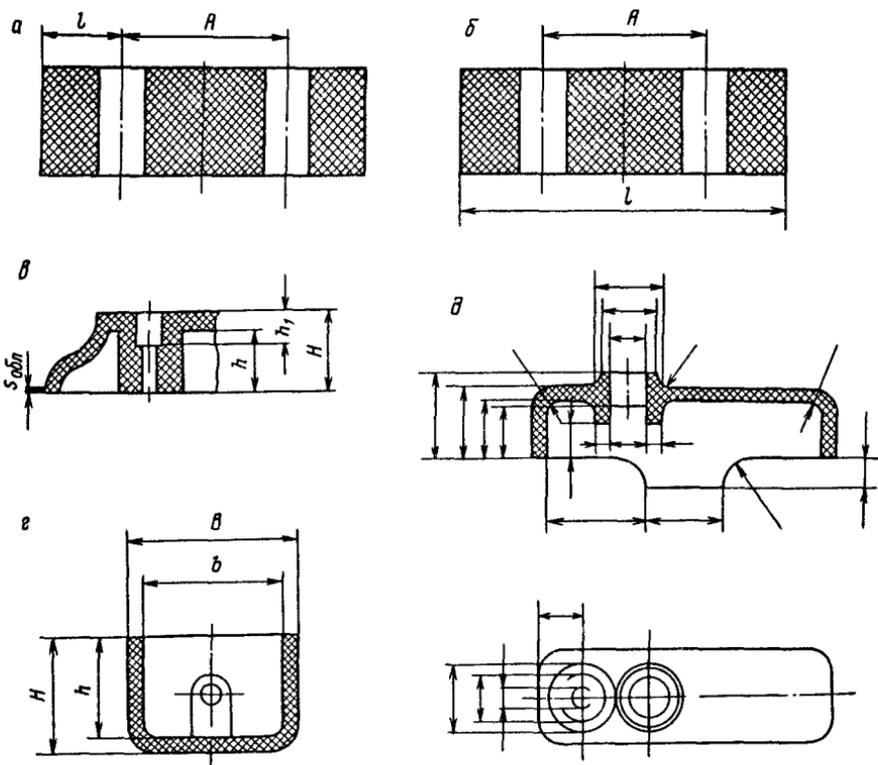


Рис. 1.21. Примеры правильной простановки размеров на чертежах пластмассовых деталей. Пояснения в тексте

на рис. 1.21. Например, для случая механической обработки изделия, когда к точности расположения его отверстий относительно оси симметрии не предъявляют особых требований, целесообразно назначать размеры  $l$  и  $A$  с максимально возможными широкими допусками (рис. 1.21, а).

При формировании симметричного изделия, особенно в том случае, когда контур его оформляют в матрице, а отверстия – знаками пуансона, размер  $l$  обычно не проставляют, так как его трудно технологически обеспечить и проконтролировать (рис. 1.21, б).

В тех случаях, когда одни размеры изделия оформляют пуансоном, а другие матрицей, целесообразно отступить от принципа единства баз и наносить размеры с разных сторон. Это полностью соответствует правилам простановки размеров на чертежах деталей формы. Колебания толщины облоя  $s_{\text{обл}}$  при формировании искажают только один размер  $H$  высоты изделия (рис. 1.21, в). Этот размер рекомендуется контролировать на всех изделиях.

При конструировании изделий типа кожухов, получаемых прессованием, можно не указывать толщину стенки. Это не относится к тем размерам, которые оформляются одной частью формы, например ребрам жесткости (рис. 1.21, г). Однако нанесение размера толщины стенки  $s$  допустимо при конструировании полых изделий сложной конфигурации, когда координирование всех переходов контура по внутренним и наружным размерам может привести к большим колебаниям толщины стенки (рис. 1.21, д).

Габаритный размер изделия не должен включать в себя размеры местных выступов, бобышек, ребер и т. п. Допускается также отсутствие на чертеже габаритного размера, если его простановка не требуется по конструктивным соображениям.

На чертеже изделия с арматурой не следует повторять размеров, заданных на чертежах арматуры.

### *1.2.3. Влияние конструкции изделия на образование остаточных напряжений*

В зависимости от требований эксплуатации уровень качества изделия может реально выражаться различными параметрами – точностью размеров, чистотой поверхности, внешним видом, прочностными показателями и т. д. Однако практически все эти параметры определяются напряженным состоянием материала изделия после его изготовления и изменениями в процессе хранения и испытаний. Таким образом, напряженное состояние материала объективно отражает общий уровень качества изделия. Это состояние характеризуется собственными напряжениями, называемыми также внутренними, или остаточными. Они возникают в тех случаях, когда в поперечном и продольном сечениях тела появляются неравномерные деформации или изменения объема и формы. Собственные напряжения взаимно уравновешиваются – общая равнодействующая и результирующий момент в каждой данной точке имеют нулевые значения.

По характеру происхождения собственные напряжения могут быть подразделены на временные, исчезающие после удаления вызвавшей их причины (например, термические напряжения из-за неравенства температуры в различных частях изделия, исчезающие после выравнивания температур), и остаточные, остающиеся в теле изделия после удаления вызвавших их причин.

Для изделий из пластмасс характерными являются остаточные напряжения первого рода, т. е. такие, которые уравниваются в областях, имеющих размеры одного порядка с размерами тела изделия. Эти напряжения вызываются неравномерным распределением массы; неоднородными силовыми и температурными полями во время образования изделия.

Принципиально любой процесс формования пластмассового изделия приводит к образованию остаточных напряжений. Остаточные напряжения в пластмассовых изделиях классифицируются по видам: ориентационные, термические, диффузионные, напряжения армирования.

Опыт показывает, что остаточные напряжения в ряде случаев играют и положительную роль. Действительно, если остаточные напряжения совпадают по направлению с внешней нагрузкой, их величина должна быть вычтена из величины допустимого напряжения. Если же остаточные напряжения направлены противоположно внешней нагрузке, то величина допустимых напряжений не изменяется, а при снятии остаточных напряжений надежность конструкции будет повышаться.

Ориентационные остаточные напряжения в значительной степени зависят от конструкции изделия, количества и расположения мест впуска расплава в форму или общего направления движения материала. Рис. 1.5 хорошо иллюстрирует это положение. Первой причиной возникновения ориентационных напряжений является течение материала по одному или двум направлениям (одно- или двумерное течение). При этом в направлении потока за счет трения расплава о стенки металлической формы, а также от внутреннего трения между слоями возникает разность скоростей потока по сечению. Напряжения сдвига вызывают деформацию макромолекул и их ориентацию, которая фиксируется при застывании расплава.

Если происходит двумерное течение, поток расплава расширяется перпендикулярно направлению его движения. Пример такого течения — заполнение формы диска от литника, расположенного по центру. Фронт потока в любой момент заполнения формы представляет собой дугу с центром у литника. Расширение расплава происходит неравномерно по сечению. После смачивания стенки формы расплав около нее начинает охлаждаться и застывать, в то время как новые порции расплава будут передвигаться по застывшему слою и одновременно расширяться. Это приводит к возникновению сдвиговых напряжений в направлении, перпендикулярном основному направлению течения потока. Возникает двухосная ориентация материала в теле изделия, причем доминирующей оказывается продольная ориентация. Следовательно, второй причиной, обуславливающей остаточный характер

ориентационных напряжений, является быстрое охлаждение (при литье под давлением, экструзии) и затвердевание материала после формования.

Наиболее отчетливо возникновение ориентационных напряжений проявляется при литье под давлением термопластов типа полистирола, полиметилметакрилата и т. п. Было установлено, что у поверхности исследуемых образцов ориентация молекулярных структур выражена наиболее ярко, затем она снижается по направлению к центру поперечного сечения. В центре всегда наблюдается незначительная ориентация, материал здесь может быть признан изотропным. Это объясняется протеканием при медленном застывании расплава релаксационных явлений, обусловленных броуновским движением частиц материала. Подобная ориентация наблюдается и в тех конструкциях, которые обеспечивают расплаву достаточно короткий путь течения. При более длинном пути потока ориентационные явления существенно усложняются.

Наибольшее напряжение сдвига наблюдается у стенки формы. Выделяющееся при этом тепло отводится через стенку формы. Только на определенном расстоянии от стенки тепло уже полностью не отводится, вязкость расплава понижается, и в этой области ориентация материала проявляется меньше.

Величина ориентационных напряжений зависит от двух обстоятельств. Первое — это уже рассмотренные напряжения от „замораживания” ориентированных молекул с образованием неравновесного объема. Второе — напряжения, связанные с изменением конформаций молекул и вызывающие деформацию только части объема материала.

При любом виде течения расплава существуют молекулярные перемещения. Происходит изменение положения молекул (как целой структурной единицы) из-за изменения вязкости вещества, что приводит к созданию термодинамически неравновесной структуры, так как при этом вдоль линии течения будет повернуто больше молекул, чем в случае равновесного распределения энергии теплового движения по объему вещества; при резком охлаждении неравновесное состояние фиксируется по всему сечению изделия. Кроме того, происходит растягивание единичных молекул с увеличением расстояния между их концами, что приводит к уменьшению гибкости молекулярных цепей. Такое термодинамическое состояние также „замораживается”.

Переход объема полимера в равновесное состояние определяется температурными условиями. При нагревании отформованного изделия в интервале между температурами стеклования и текучести материала для каждого значения температуры за определенный промежуток времени нагревания объем (деформация) восстанавливается на определенную величину. Это чисто релаксационный процесс и его скорость (время релаксации) представляется экспоненциальной функцией температуры нагревания:  $T = Ae^{\alpha \Delta t}$ , где  $T$  — температура нагревания изделия;  $A$  и  $\alpha$  — постоянные, зависящие от материала и условий формования;  $\Delta t$  — усадка после нагревания при температуре  $T$ .

Параметр  $A$  с физической точки зрения является температурой отпуска ориентационных остаточных напряжений. Количественной мерой напряжений при условии полной релаксации является величина  $\Delta l$ , зная которую, можно определить остаточные напряжения по кривой растяжения данного материала.

Термические остаточные напряжения возникают в теле изделия из-за того, что изменение объема массы (или линейных размеров) в связи с изменением температуры не могут происходить свободно. Охлаждение пластмассового изделия в процессе формования (литье под давлением) или после извлечения из формы (прессование) сопровождается термоударом. Значительное различие в величинах коэффициентов линейного термического расширения материала формы и изделия приводит к существенным объемным изменениям. Образование твердой наружной оболочки раньше, чем полностью затвердеет вся масса по сечению изделия, в свою очередь, препятствует тому, чтобы изменения объема протекали свободно, без затруднений. В результате, как правило, внутренняя часть изделия оказывается растянутой, а наружная — сжатой. Сжимающие напряжения у поверхности вызывают коробление изделия, образование утяжин и т. п. Растягивающие термические напряжения приводят к возникновению усадочных раковин, пустот.

Диффузионные остаточные напряжения возникают при поглощении или потере влаги полимерным материалом. Они обуславливаются разностью коэффициентов линейного термического расширения соседних слоев материала, в которых концентрации жидкости различны вдоль какой-либо линейной координаты. Поскольку одновременно следует считаться с явлением миграции влаги внутри тела изделия, можно ожидать возникновения дополнительных остаточных напряжений при миграции жидкостей в течение всего периода до насыщения, а для замкнутых систем — и после насыщения. Для количественного определения диффузионных остаточных напряжений необходимо знать функцию распределения концентрации жидкости по линейной координате, а также коэффициенты диффузии материала.

Диффузия влаги в изделиях из пресс-порошков описывается функцией распределения на границе „полимерный материал — жидкость (пары)“ при всесторонней диффузии:

$$\Delta P_{\tau} = \Delta P(1 - e^{-\alpha\tau}),$$

где  $\Delta P_{\tau}$  — приращение массы изделия по истечении времени  $\tau$ ;  $\Delta P$  — предельное приращение массы;  $\alpha$  — эмпирическая постоянная, зависящая от коэффициента диффузии;  $\tau$  — время, в течение которого наблюдается диффузия влаги.

Коэффициент диффузии (диффузионный коэффициент линейного расширения) может определяться по следующему эмпирическому уравнению:

$$\Delta P' = 0,2L,$$

где  $\Delta P'$  — разность массы изделия (образца) до и после действия жидкости;  $L$  — линейный размер изделия (образца).

Остаточные напряжения армирования также обуславливаются в основном разностью коэффициентов линейного термического расширения металлической (как правило) арматуры и пластмассы.

В реальных условиях из-за сложности раздельного установления и анализа причин и результатов проявления остаточных напряжений в конкретном пластмассовом изделии необходимо оценивать суммарный эффект. При этом практика подтверждает доминирующее влияние факторов формы и размеров изделия. Косвенно это проявляется, например, в различной величине усадочной деформации разнообразных изделий, к тому же неравномерной в разных направлениях для одного и того же изделия (усадочная деформация изделия отличается от усадки материала, определяемой с целью сравнения технологических свойств, возможностей, при проведении арбитражного контроля — подробнее см. разд.1.2.4).

#### *1.2.4. Точность и взаимозаменяемость изделий*

**Взаимозаменяемость. Эксплуатационные требования и возможности.** Требования, предъявляемые к точности изделий из пластмасс, являются одними из самых главных, определяющих для проектирования формообразующих деталей, формирующего инструмента в целом. Понятие „точность” здесь отнесено только к размерным параметрам изделия.

**Функциональная точность** изделий устанавливается, исходя из условий их эксплуатации; она должна сохраняться в заданных пределах, т. е. функциональных допусках, в течение всего периода работы изделия.

Перед проектированием механизмов, машин, приборов прежде всего устанавливают функциональные требования к ним (мощность, производительность, точность и т. д.). Эти функциональные требования определяют конструкцию изделия в целом, а также отдельных его сопряжений. Разрабатывая конструкцию какого-либо сопряжения, необходимо не только определить материал изделий, рассчитать их размеры, установить необходимость механической и термической обработки, но и правильно выбрать посадки и допуски для сопрягаемых размеров изделий.

Установленный функциональный допуск посадки  $T_{\phi(n)}$  должен обеспечить требуемую надежность и долговечность данного сопряжения. Затем  $T_{\phi(n)}$  разделяют на две части: одну используют для компенсации погрешностей непосредственно в процессе сборки — допуск  $T_{сб(n)}$ , а другую — на создание запаса точности:

$$T_{\phi(n)} = T_{сб(n)} + T_{з.т. (п)}$$

Гарантированный запас точности подвижных сопряжений или кинематических пар является эксплуатационным допуском зазора. Он должен определяться, исходя из допустимого изменения выходных эксплуатационных параметров, обеспечения надежности и долговечности сопряжения, узла.

Гарантированный запас точности неподвижных сопряжений является эксплуатационным допуском натяга и должен определяться, исходя из возможного увеличения рабочих нагрузок, скоростей, ускорений, повышения рабочей температуры, изменения размеров с течением времени и т. д.

Необходимо, чтобы в начале эксплуатации неподвижного сопряжения (при наибольшем действительном натяге) была обеспечена механическая прочность соединяемых изделий, а в конце установленного срока его эксплуатации (при наименьшем действительном натяге) — надежность восприятия без разъединения сопряжения.

Установленный конструктором допуск  $T_{сб(п)}$ , в свою очередь, разделяется на две части: одна — для охватываемой поверхности  $T_{сб(в)}$ , а другая — для охватывающей  $T_{сб(а)}$ .

При делении допуска на две части необходимо учитывать технологические особенности изготавливаемых изделий.

Назначенные конструктором допуски  $T_{сб(в)}$  и  $T_{сб(а)}$ , называемые поэтому конструктивными —  $T_{к(в)}$  и  $T_{к(а)}$ , должны ограничивать все погрешности, которые могут быть у изделий, поступающих на сборку

$$T_k \geq \Delta_{\Sigma} = \Delta_{\tau} + \Delta_{ук} + \Delta_x + \Delta_{кон},$$

где  $\Delta_{\tau}$  — суммарная технологическая погрешность, возникающая в процессе изготовления изделий из пластмасс;  $\Delta_{ук}$  — погрешность за счет технологических уклонов, которая определяется из соотношения  $\Delta_{ук} = 2Htg\alpha$  (см. рис. 1.13);  $\Delta_x$  — погрешность, возникающая при хранении изделий до их сборки и начала эксплуатации;  $\Delta_{кон}$  — погрешность, возникающая при контроле размеров (метрологические погрешности).

Задача выбора конструкторских допусков, обеспечивающих взаимозаменяемость изделий, относится к проблеме применения изделий из пластмасс; на основании метода прецедентов (однотипные варианты) или аналогий (подобные варианты), после проведения необходимых функциональных расчетов, этот выбор окончательно проводят по

Таблица 1.1. Поля допусков валов/отверстий — изделий из

| Квалитет | Основные |         |         |         |       |       |         |              |
|----------|----------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|--------------|
|          | a/A      | в/B     | с/C     | d/D     | e/E   | f/F   | h/H     | js/JS        |
| 8        | —        | —       | c8/—    | d8/D8   | e8/E8 | f8/F8 | h8/H8   | js8*/JS8*    |
| 9        | —        | —       | —       | d9/D9   | e9/E9 | f9/F9 | h9/H9   | js9*/JS9*    |
| 10       | —        | —       | —       | d10/D10 | —     | —     | h10/H10 | js10*/JS10*  |
| 11       | a11/A11  | b11/B11 | c11/C11 | d11/D11 | —     | —     | h11/H11 | js11*/JS11** |
| 12       | —        | b12/B12 | —       | —       | —     | —     | h12/H12 | js12*/JS12*  |

\* Поля допусков, не рекомендуемые для посадок.

\*\* Поля допусков, не предусмотренные ГОСТ 25347—82.

Примечание. В квалитетах 13—18 (включительно) предусмотрены только поля типа h/H и js\*/JS\*.

ГОСТ 25349-88 (СТ СЭВ 179-87) „Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков деталей из пластмасс”. Стандарт устанавливает поля допусков и предельных отклонений для гладких сопрягаемых и несопрягаемых элементов изделий с номинальными размерами от 1 до 3150 мм; этот стандарт базируется на основополагающих стандартах единой системы допусков и посадок (ГОСТ 25347-82, 25346-82), частично их дополняя; указанные в нем поля допусков относятся к размерам изделий при температуре 20 °С и относительной влажности окружающего воздуха 50%. В табл. 1.1 приведены поля допусков „валов” и „отверстий” — изделий из пластмасс (в диапазоне размеров до 500 мм), которые должны назначаться по ГОСТ 25349-88 — в зависимости от требований эксплуатационной точности, в табл. 1.2 — классификация эксплуатационных и сборочных требований к размерам изделий из пластмасс. Подробнее о назначении конструкторских допусков см. [4].

Для сопрягаемых размеров в гладких цилиндрических сопряжениях поля допусков располагают в соответствии со знаками отклонений, установленных для выбранной посадки.

Для несопрягаемых размеров поля допусков должны располагаться „в тело” или симметрично (в последнем случае они равны половине величины допуска и проставляются со знаками  $\pm$ ).

Взаимозаменяемость специальных соединений изделий из пластмасс (шпоночных, шлицевых) и передач (зубчатых, червячных) обеспечивают путем использования действующих общих норм [4], выбирая из них подходящие — с учетом свойств пластмасс. Например, из-за теплового расширения пластмассового элемента шпоночного соединения оно может оказаться неподвижным даже при применении посадки, гарантирующей наиболее подвижное соединение по втулке в металлических шпоночных соединениях.

пластмасс для номинальных размеров до 500 мм по ГОСТ 25349-88

| отклонения |     |             |             |             |               |               |               |
|------------|-----|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| k/N        | u/U | x/X         | y/Y         | z/Z         | za/ZA         | zb/ZB         | zc/ZC         |
| k8/N8      | —   | x8/—        | —           | z8/—        | —             | —             | —             |
| k9**/N9    | —   | —           | —           | —           | —             | —             | —             |
| k10**/N10* | —   | x10**/X10** | y10**/Y10** | z10**/Z10** | za10**/ZA10** | zb10**/ZB10** | zc10**/ZC10** |
| k11**/N11* | —   | —           | —           | —           | —             | —             | zc11**/ZC11** |
| —          | —   | —           | —           | —           | —             | —             | —             |

Таблица 1.2. Классификация эксплуатационных и сборочных требований к размерам изделий из пластмасс

| Типы размеров                            | Характерные особенности   | Требования, предъявляемые к точности изготовления (калительы)                                  | Примеры   |
|--|---|--|---|
| Сопрягаемые ответственного назначения    | Определенная посадка и определенные эксплуатационные показатели | Высокие (IT8+10)   | Сопряжения типа вал — отверстие, в подшипниках скольжения и т.д.  |
| Несопрягаемые ответственного назначения  | Определенные эксплуатационные показатели                        | Высокие (IT10—13)  | Размеры пера пропеллера и других деталей специального назначения  |
| Сопрягаемые неотвественного назначения   | Определенная посадка  | Невысокие в зависимости от конкретных условий (IT14)   | Посадочные места некоторых крышек и корпусов  |
| Несопрягаемые неотвественного назначения | —   | Невысокие, в соответствии с экономически целесообразной точностью изготовления (IT15 и грубее) | Несопрягаемые размеры, а также размеры элементов, подвергающихся дополнительной обработке методами со снятием стружки |

Эксплуатационные требования и взаимозаменяемость зубчатых передач обеспечиваются степенями точности и нормами гарантированного бокового зазора между неработающими профилями зубьев. Степени точности изготовления зубчатой передачи назначаются в зависимости от режима ее работы с учетом технологических возможностей изготовления передачи с заданной степенью точности. Величины бокового зазора характеризуют вид сопряжений зубьев передачи и назначаются независимо от степени точности ее изготовления с тем, чтобы обеспечить нормальные условия сборки и работы передачи. Учитывая возможные области применения пластмассовых зубчатых передач, можно рекомендовать нормы точности, соответствующие 8–10 степеням.

При выборе величины бокового зазора необходимо учитывать специфические особенности пластмасс как конструкционных материалов, в частности, малую жесткость и высокие коэффициенты линейного расширения пластмасс в сравнении с металлами. Вследствие малой жесткости пластмасс прогибы зубьев (перемещение точки приложения нормального усилия) могут быть столь значительными, что их необходимо учитывать при выборе величины бокового зазора. Величины боковых зазоров в пластмассовых передачах при прочих равных условиях следует назначать большими, чем в металлических передачах. Их следует по-возможности обеспечивать за счет регулировки расстояний между осями рабочих валов. Увеличение бокового зазора в передаче всеми остальными способами осуществляется за

счет утонения зуба, что отрицательно отражается на его прочности. Отмеченное относится и к назначению допусков и посадок червячных передач с пластмассовыми элементами.

**Технологическая точность. Технологические допуски размерных параметров гладких элементов изделий.** Отдельные составляющие общей погрешности  $\Delta_{\Sigma}$  (см. выше) в ряде случаев могут не учитываться (т. е. они не „проявляются“): это относится к погрешности от технологического уклона (поскольку последние не всегда и не на все поверхности изделия назначаются) и к погрешности, возникающей при хранении изделий (например, для размеров несопрягаемых неотвешенного назначения и в других случаях).

Суммарная технологическая погрешность  $\Delta_T$  зависит от большого числа погрешностей, прежде всего – колебания усадки и колебаний технологических параметров процесса формования, приводящих к изменению самой усадки и ее рассеянию; неточности изготовления и износа формообразующих деталей, колебаний параметров окружающей среды и т. д. Точность тех элементов изделия, формование которых связано с точностью взаимного положения формующих деталей в сомкнутом состоянии, зависит от дополнительной погрешности – толщины облоя (т. е. излишков массы, затекающей в вязкотекучем состоянии в зазоры между перемещающимися при смыкании – размыкании формообразующими деталями), погрешности установки формующих знаков и др. Суммарную технологическую погрешность  $\Delta_T$  определяют, учитывая в каждом конкретном варианте характер влияния погрешностей (случайный или систематический), применяя известное правило:  $\Delta_T = \Sigma \Delta_{\text{сист}} + \sqrt{\Sigma \Delta_{\text{случ}}^2}$ . Следует отметить, что характер влияния составляющей погрешности может меняться, например систематическая погрешность от неточности изготовления размеров формующих деталей в одногнездной форме переходит в ряд случайных – для многогнездной формы (размеры гнезд невозможно выполнить абсолютно одинаковыми).

Итак, при изготовлении изделий из пластмасс в замкнутых формах (прежде всего при прессовании и литье под давлением) различные элементы изделий оказываются неодинаковой точности (хотя все они получаются одновременно).

Суммарная технологическая погрешность  $\Delta_T$  может быть нормирована (с позиций технико-экономической достижимой точности, на базе существующего технологического уровня). Для этого введено понятие технологического допуска  $T \geq \Delta_T$ , т. е. допуска, определяемого пределами рассеяния размерных параметров изделий при их изготовлении. Если неравенство не может быть обеспечено только формованием, то возможно использовать размерную разбраковку изделий, другие мероприятия, включая механическую обработку изделий; тогда суммарная технологическая погрешность получает новое значение –  $\Delta'_T$ , и потребуются, чтобы  $T \geq \Delta'_T < \Delta_T$ . В табл. 1.3 показаны схемы методов, применяемых для обеспечения заданной точности размеров изделий, уменьшения суммарной технологической погрешности

Т а б л и ц а 1.3. Методы обеспечения заданной точности размеров изделий

| Существующая общая погрешность $\Delta_{\Sigma}$  |  | $\Delta_{ук}$            | $T$           | $\Delta_{кон}$ | $\Delta_x$ |  |
|---|--|--------------------------|---------------|----------------|------------|--|
| Заданная точность (конструкторский допуск $T_k$ ) |  | $T_k$                    |               |                |            |  |
| Методы обеспечения заданной точности              | конструкционные, технологические, метрологические и организационно-технические | $\Delta_{ук}$            | $T'_t$        | $\Delta_{кон}$ | $\Delta_x$ |  |
|   | механическая доработка   | $T_d$                    |               | $\Delta_{кон}$ | $\Delta_x$ |  |
|   | организационно-метрологические   | отбраковка перед сборкой | $\Delta_{ук}$ | $T'_t$         |            |  |
|   |  | селективная сборка       | $\Delta_{ук}$ | $T_1$<br>$T_2$ |            |  |

Примечания.  $\Delta_{ук}$  — погрешность от технологического уклона;  $T$  — существующий технологический допуск;  $T_d$  — технологический допуск на механическую доработку;  $T'_t$  — технологический допуск после применения конструкционных, технологических и метрологических мероприятий;  $T''_t$  — технологический допуск с использованием отбраковки перед сборкой;  $T_1, T_2$  — групповые технологические допуски при селективной сборке;  $\Delta_{кон}$  — погрешность контроля размеров изделий;  $\Delta_x$  — погрешность, возникающая при хранении изделий.

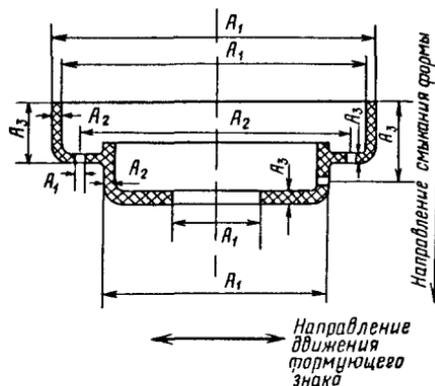
и, следовательно, уменьшения технологического допуска. При этом можно принять, что  $\Delta_x = (0,10 \div 0,25)T$ .

Технологические допуски предназначаются: для оценки точности формирования изделий из пластмасс; для установления допусков на межоперационные размеры и расчета припусков на отдельные элементы заготовок, подвергающихся механической обработке; для расчета формообразующих деталей, их исполнительных размеров (см. разд. 2.2.4).

На рис. 1.22 указаны типы размеров изделий из пластмасс, изготавливаемых в замкнутых формах (прессованием, литьем под давлением).

Наиболее высокую точность приобретают размеры  $A_1$ , определяемые размерами формующих элементов (матрицы, пуансона, знака), но не зависящие от взаимного расположения последних. По размерам  $A_1$  предпочтительно собирать изделия друг с другом, т. е. образовывать сопряжения. К размерам типа  $A_1$  относятся диаметры отверстий и валов. Наименее точными являются размеры  $A_3$ , определяемые взаимным расположением формующих деталей в направлении смыкания формы, зависящие от облоя. Размеры  $A_2$  занимают промежуточное положение, они определяются взаимным расположением формующих элементов в направлении, перпендикулярном смыканию формы (например, толщина боковых стенок изделий). Следовательно, и технологические допуски, назначаемые на размеры разных типов, должны отличаться друг от друга. С целью большей унификации

Рис. 1.22. Типы размеров изделий из пластмасс, изготавливаемых в замкнутых формах прессованием и литьем под давлением



введены не три, а две градации типов размеров  $A_1$  и  $A_2$  (объединенные  $A_2$  и  $A_3$ ).

Для выбора технологических допусков размеров изделий из пластмасс принят один универсальный критерий — колебание усадки  $\Delta S$ , поскольку именно погрешность от колебания усадки в той или иной степени влияет на точность любого типа размера изделия (см. далее методику установления этого критерия).

Из теории допусков и посадок известно, что величина допуска  $T = ai$ , где  $i$  — единица, а  $a$  — число единиц допуска. Экспериментами установлено, что за единицу технологического допуска размеров изделий из пластмасс  $i_T$  должно быть принято выражение:  $i_T = (0,025L + 0,6)$  мм, где  $L$  — номинальный размер изделия (для элемента типа  $A_1$ ). Число единиц допуска, определяющее уровень точности, по аналогии с известными системами допусков изменяется по пятому ряду предпочтительных чисел, принимая значения: 25, 40, 64, 100, 160, 250, 400, 640 (коэффициент указанного ряда  $R = 1,6$ ). Соответственно этому ряду сгруппированы промышленные марки пластмасс — по величине колебания усадки, происходящей при их переработке. Крайние члены ряда значений колебаний усадки, приведенные в табл. 1.4, установлены на основании анализа производственных данных и специальных исследований.

Обоснованная возможность использования квалитетов при нормировании технологических допусков (для этого численные значения допусков по квалитетам для металлов округляют с точностью до 0,01 мм) обеспечивает надежную преемственность норм точности в Единой системе допусков и посадок. Значения усадок и колебания усадок промышленных марок пластмасс — см. табл. 2.6.

Выбор технологических допусков размеров по табл. 1.4 предполагает гибкую возможность (в зависимости от конкретных условий, приводящих к изменению колебания усадки) устанавливать квалитеты для нормальной и повышенной точности (нормальная достигается в обычных производственных условиях, повышенная — при проведении специальных технологических мероприятий, как правило, повышающих трудоемкость и себестоимость изделий, например при высоком уровне входного контроля сырья, применении одnogнездных форм и др.).

Данные табл. 1.4 относятся к пластмассовым изделиям простой

Т а б л и ц а 1.4. Технологические допуски размеров изделий из пластмасс  
(кавалитеты размеров)

| Номинальные<br>размеры<br>(тип А <sub>1</sub> ,<br>рис. 1.21), мм | Колесания усадки $\Delta S$ , % |                     |                     |                     |                     |                     |                    |          |
|---|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|
|   | До 0,06                         | Св. 0,06<br>до 0,10 | Св. 0,10<br>до 0,16 | Св. 0,16<br>до 0,25 | Св. 0,25<br>до 0,40 | Св. 0,40<br>до 0,60 | Св. 0,60<br>до 1,0 | Св. 1,00 |
|   | Квалитеты                       |                     |                     |                     |                     |                     |                    |          |
| От 1 до 3   | 8                               | 9                   | 10                  | 11                  | 12                  | 13                  | 14                 | 15       |
| Св. 3 до 30   | 8                               | 9                   | 10                  | 11                  | 12                  | 13                  | 14                 | 15       |
| Св. 30 до 120   | 9                               | 10                  | 11                  | 12                  | 13                  | 14                  | 15                 | 16       |
| Св. 120 до 250  | 10                              | 11                  | 12                  | 13                  | 14                  | 15                  | 16                 | 17       |
| Св. 250 до 500  | 11                              | 12                  | 13                  | 14                  | 15                  | 16                  | 17                 | 18       |

| Номинальные<br>размеры<br>(тип А <sub>2</sub> и А <sub>3</sub> ,<br>рис. 1.21), мм | Колесания усадки $\Delta S$ , % |                     |                     |                     |                     |                     |                    |          |
|--|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------|
|  | До 0,06                         | Св. 0,06<br>до 0,10 | Св. 0,10<br>до 0,16 | Св. 0,16<br>до 0,25 | Св. 0,25<br>до 0,40 | Св. 0,40<br>до 0,60 | Св. 0,60<br>до 1,0 | Св. 1,00 |
|  | Квалитеты                       |                     |                     |                     |                     |                     |                    |          |
| От 1 до 3  | 9                               | 10                  | 11                  | 12                  | 13                  | 14                  | 15                 | 16       |
| Св. 3 до 30  | 10                              | 11                  | 12                  | 13                  | 14                  | 15                  | 16                 | 17       |
| Св. 30 до 120  | 10                              | 11                  | 12                  | 13                  | 14                  | 15                  | 16                 | 17       |
| Св. 120 до 250   | 11                              | 12                  | 13                  | 14                  | 15                  | 16                  | 17                 | 18       |
| Св. 250 до 500   | 12                              | 13                  | 14                  | 15                  | 16                  | 17                  | 18                 | —        |

геометрической формы, изготовленным в современных условиях массового производства.

Усложнение конфигурации изделия требует (при прочих равных условиях) назначения квалитета на один грубее. К простым изделиям условно относят: прямоугольные и круглые неармированные, типа плат и прокладок с габаритными размерами до 30 мм и отношением высоты к длине не более 1:10, с разностенностью не более 2:1 при прямом прессовании и не более 2,5:1 при литьевом прессовании и литье под давлением; цилиндрические типы втулок неармированные и с соосно расположенной цилиндрической арматурой; коробчатого типа (колпаки, кожухи), у которых отношение диаметра к высоте не более 1:2, габаритные размеры до 50 мм и толщина стенки не более 5 мм.

С увеличением габаритных размеров изделий точность их понижается. Это связано с деформацией при извлечении из формы, а также с увеличивающейся неравномерностью охлаждения изделия.

Поля технологических допусков размеров изделий располагают на чертежах (межоперационных или конструкторских, если  $T_k = T$ ) следующим образом: односторонне „в тело” — для размеров элементов изделий, оформляемых в одной части формы, при этом для охватывающих поверхностей (типа отверстий) поле допуска располагается „в плюс”, а для охватываемых поверхностей (типа валов) поле допуска — „в минус” от номинального размера; симметрично — для размеров элементов изделий, зависящих от подвижных частей формы; односторонне в плюс — для размеров элементов изделий, оформляемых в двух и более частях формы вдоль направления замыкания формы. При

наличии технологических уклонов на отдельных поверхностях изделий их направление должно совпадать с направлением поля допуска „в тело” (см. разд. 1.2.2).

Технологические допуски размеров изделий из пластмасс, выбираемые по табл. 1.4, относятся к линейным (диаметральным) размерам. Допуски угловых размеров имеют три группы: первая — для отверстий или выступов, формируемых одной частью формы; вторая — для отверстий и других элементов изделий, формируемых двумя и более частями формы, или при постановке резьбовых втулок; третья — в основном для несопрягаемых размеров изделий. Принято, что погрешности формы изделия и погрешности взаимного расположения его поверхностей и осей „укладываются” в величину технологического допуска размера. Однако во многих случаях такие погрешности оказываются либо большими, либо особо функционально важными, и их требуется назначать специальной нормой, выбираемой из действующих стандартов, где отмечается специфика материалов изделия [4].

Обычно при постановке размеров по схеме, приведенной на рис. 1.23, а, расчет допусков на межосевые размеры ведется по формуле  $T=0,7s$ , где  $T$  — допускаемые отклонения на размеры  $L$  и  $L_1$ ;  $s$  — зазор, равный разности диаметров отверстия и крепежной детали.

Изготовление пластмассовых изделий с одинаковыми допусками различных по номинальной величине размеров невозможно, поэтому назначение допусков на межосевые размеры имеет свои особенности. Номограмма на рис. 1.23, б позволяет назначать на межосевые размеры отверстий, расположенных по прямым линиям, неравные допуски, обеспечивающие взаимозаменяемость изделий. Например, при зазоре  $s=0,85$  мм равные допуски на размеры  $L$  и  $L_1$ , согласно номограмме,

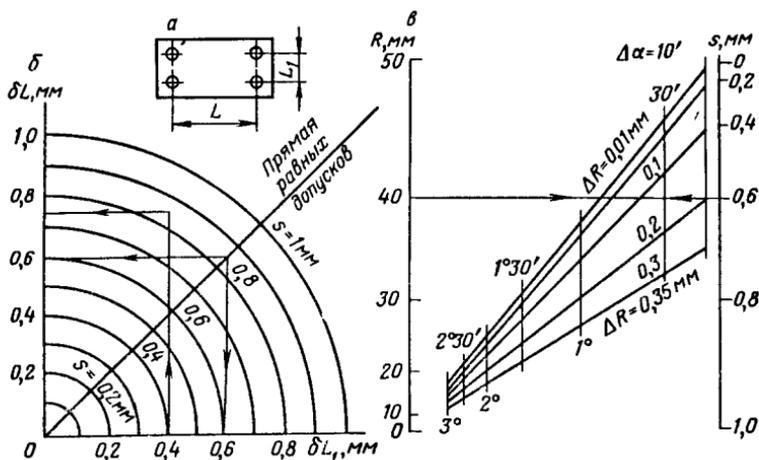


Рис. 1.23. Схема постановки межосевых размеров пластмассового изделия (а); номограммы для определения допусков на межосевые размеры (б) и допусков отверстий, расположенных по окружности (в)

равны  $\pm 0,6$  мм. Если увеличить допуск на размер  $L$  до  $\pm 0,75$  мм, то по номограмме определим, что при условии обеспечения взаимозаменяемости изделий допуск на размер  $L_1$  необходимо назначить равным  $\pm 0,4$  мм. Номограмма для определяемых допусков для отверстий, расположенных по окружности, представлена на рис. 1.23, в.

Во всех случаях назначения допусковых отклонений от правильной геометрической формы изделий на взаимное расположение поверхностей и осей соотношения между конструкторскими требованиями и технологическими возможностями должны быть дополнены условием  $T_{кф} \geq \Delta_{\Sigma ф}$  (где индекс „ф” указывает на неотносящийся к размеру изделия любой допуск или допускаемое отклонение).

Выше была отмечена возможность изменения  $\Delta_T$  (соответственно  $T$ ) путем применения механической обработки. Обработка изделий из пластмасс производится при зачистке их от облоя; при необходимости изготовления сложной конфигурации изделия, формование которого по разным причинам затруднительно и неэкономично (изготовление экспериментальных образцов-изделий и др.); при необходимости повышения точности размеров изделий после формования перед сборкой (два первых случая, как правило, также связаны с достижением определенной точности размеров обрабатываемых элементов изделий).

В табл. 1.5 приведены данные о достижимых качествах размеров пластмассовых изделий, обработанных резанием.

В указанных в таблице пределах более точный качество относится к повышенной точности изготовления, он также достижим в условиях единичного производства.

Более грубый качество характеризует нормальную точность изготовления в условиях серийного и массового производства. Во всех случаях более грубый качество следует выбирать для больших размеров (св. 180 мм).

Оценку точности обработки цилиндрических поверхностей при  $l/d > 2$  (где  $l$  и  $d$  — соответственно длина и диаметр обработки) и плоских поверхностей при  $l/b > 2$  (где  $l$  и  $b$  — соответственно длина и ширина обрабатываемой поверхности) следует производить по более грубому, чем указано в табл. 1.5, качеству.

Контроль изделий из пластмасс после окончательного их формования (формования или обработки) должен производиться после выдержки, необходимой для релаксации внутренних напряжений материала и стабилизации размеров. Время выдержки изделий после изготовления до начала контроля, если оно не оговорено особо, должно быть не менее 16 ч — для качеств до IT12. Из производственного опыта следует, что время выдержки изделий после изготовления до начала контроля должна составлять 12 ч — для качеств IT12–IT13, 6 ч — для качеств IT14–IT15, 3 ч — для качеств грубее IT15 (эти данные в большей степени относятся к формованию изделий).

Выбор технологических допусков, а затем — подбор стандартных

Таблица 1.5. Технологические допуски размеров изделий из пластмасс при механической обработке (качества размеров)

| Квалитеты      |                      |                               | Вид обработки                                 | Примеры обрабатываемых поверхностей  |
|----------------|----------------------|-------------------------------|---|--------------------------------------|
| реактопласты   | аморфные термопласты | кристаллизующиеся термопласты |   |                                      |
| 6,7            | 7,8                  | 8,9                           | Шлифование чистовое                           | Наружные цилиндрические              |
| 7,8            | 8,9                  | 9,10                          | Шлифование чистовое<br>Развертывание чистовое | Плоские отверстия<br>Отверстия       |
| 8,9            | 9,10                 | 10,11                         | Обточка чистовая                              | Наружные цилиндрические              |
| 9,10           | 10,11                | 11,12                         | Сверление чистовое                            | Отверстия                            |
|                |                      |                               | Шлифование черновое                           | Наружные цилиндрические и плоские    |
|                |                      |                               | Зенкование<br>Фрезерование чистовое           | Отверстия<br>Плоские                 |
| 10,11<br>11,12 | 11,12<br>12,13       | 12,13<br>13,14                | Сверление<br>Обточка черновая                 | Отверстия<br>Наружные цилиндрические |
|                |                      |                               | Фрезерование черновое                         | Плоские                              |

Примечания: 1. При размерах больше 180 мм следует выбирать допуски на один квалитет грубее. 2. Для цилиндрических поверхностей с отношением длины к диаметру  $> 2$ , а также для плоских поверхностей с отношением длины к ширине  $> 2$  следует выбирать допуски на один квалитет точнее.

посадок по квалитетам (в зависимости от значений  $\Delta S$ , типов размеров и номинальных их величин) может быть выполнен на ЭВМ. Например, разработано программное средство (ПС), предназначенное для автоматизации следующих основных функций: хранения и поддержания данных о свойствах наиболее распространенных материалов для формования изделий; назначения допуска несопрягаемого размера; назначения допуска сопрягаемого (посадочного) размера; расчет исполнительных размеров формирующих элементов (см. разд. 2.4.4).

Область действия ПС: номинальные размеры от 1 до 3150 мм (ГОСТ 25349-88); точность задания размеров ограничивается 0,01 мм; требование к допуску размера - не выше, чем IT8.

ПС предоставляет возможность анализа воздействия на сохранение заданных допусков: теплового расширения или усадки материала на сохранение заданных размеров; последующей обработки (способами, которые приводят к изменению зависящего от материала размера, например термообработки, кондиционирования и др.); различий в усадке материалов собираемых деталей.

Работа с ПС ведется с помощью „меню“. ПС реализована на ПЭВМ IBM PC/AT со стандартным набором терминальных устройств на языке Turbo Basic.

**Методика установления значений усадки и колебания усадки пластмасс при формировании изделий.** Первоначально выбор качеств размеров пластмассовых изделий производят по критерию  $\Delta S$  материала; в справочниках приводятся значения усадки  $S$ , установленные на стандартных образцах в соответствии с ГОСТ 18616–80 (СТ СЭВ 890–78) „Пластмассы. Метод определения усадки“. Колебание усадки  $\Delta S$  принимают как разброс значений  $S$ , т. е.  $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$ .

Рассмотрим подробнее содержание этих понятий (рис. 1.24).

Технологическая усадка—это абсолютное или относительное уменьшение размеров изделия по сравнению с соответствующими размерами оформляющей полости формы, происходящее ко времени охлаждения извлеченного из формы изделия до температуры окружающей среды. В технической литературе, на производстве часто опускают определение „технологическая“, но именно эту усадку имеют в виду.

Кинетика технологической (т. е. связанной с переработкой) усадки описывается экспоненциальной зависимостью:

$$\Delta L_i = \Delta L_{0i}(1 - e^{-\gamma\tau}); L_i = L_{0i} - \Delta L_i,$$

где  $\Delta L_i$  — отклонение размера;  $\Delta L_{0i}$  — коэффициент пропорциональности;  $L_i$  — измененный номинальный размер изделия;  $L_{0i}$  — первоначальное номинальное значение размера;  $\tau$  — продолжительность процесса;  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий физические свойства материала.

Если сравнивают размеры горячей формы и полностью остывшего изделия, то получают действительную линейную технологическую усадку  $S_d$ , а если сравнивают размеры формы и изделий при  $20 \pm 2$  °С, то получают удобную для практики расчетную линейную технологическую усадку  $S$ . Учет технологической усадки, как отмечалось, необходим при конструировании формирующего инструмента (для расчета исполнительных размеров форм) и изделий (для оценки достижимой точности изготовления по колебанию усадки); определение технологической усадки проводят для сравнительной оценки технологических свойств разных типов, марок и партий полимерных материалов при контрольных, приемочных и арбитражных испытаниях.

Эксплуатационная усадка—это абсолютное или относительное уменьшение размеров по сравнению с первоначальными, происходящее в результате воздействия соответствующих внешних факторов (температуры, среды и т. д.) в течение определенного времени работы изделия (частный случай—длительное хранение изделия). Кинетика эксплуатационной усадки (в общем случае—закономерности размерных изменений изделий) описывается в зависимости от действующих доминирующих процессов по линейному ( $\Delta L_i = \Delta L_{0i}\tau$  для теплового расширения, размерного износа), параболическому ( $\Delta L_i = \Delta L_{0i}\tau^2$ — для водопоглощения), экспоненциальному (для различных процессов, связанных со старением) законам.

Учет эксплуатационной усадки необходим для сравнительной оценки работоспособности изделий (при определении величины

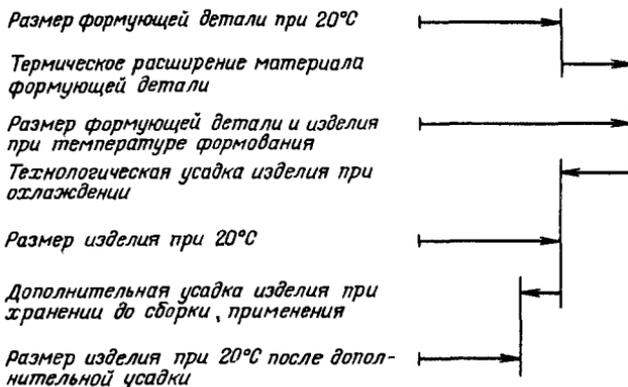


Рис. 1.24. Схема образования размера пластмассового изделия с учетом усадки

компенсации зазора или натяга соответственно в подвижном или неподвижном соединении деталей), для предпочтительного выбора пластмассы в качестве конструкционного материала (при заданных требованиях к точности и прочности деталей).

Усадочные изменения, происходящие при длительном хранении, устанавливают по так называемой дополнительной усадке (абсолютное или относительное изменение размеров перед и после термообработки при заданных температуре и времени).

Стандартные образцы, как метрологическая мера, позволяют получить сравнительные данные, традиционно считающиеся усадкой материала. На изделиях наблюдают усадочную деформацию, которая проявляется в каждом случае специфически, зависит от остаточных напряжений, действующих в изделии, и, как правило, отличается от усадки материала. На изделиях можно выделить участки свободно или затрудненно усаживающиеся. Усадочная деформация (или усадка) изделия, а также колебания его усадки требуются для решения конкретных инженерных задач по повышению прочности и точности изделий.

Взаимосвязь технологической усадки и точности размеров подробно рассмотрена в разд. 2.4.4.

Технологическая усадка по существу связана со структурными превращениями, происходящими с пластмассой при формовании изделий. В свою очередь, структурные превращения зависят от процессов в замкнутой полости формы, приводящих к изменению объема материала. Для термопластов это физические процессы, описываемые, например, уравнением состояния вида:

$$(p + \pi)(v_0 - b) = RT,$$

где  $p$  — внешнее давление;  $v_0$  — удельный объем образца;  $\pi$ ,  $b$  — константы;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Это уравнение является преобразованным уравнением Ван-дер-Ваальса. Спенсер и Джилмор показали возможность его применения для описания поведения высокомолекулярных полимеров, предполагая, что полимерный материал однороден, отличается гомогенной внутренней структурой, при которой объем изменяется только в результате изменения температуры и давления, никакого изменения объема вследствие других внутренних физических или химических процессов не должно быть. Средняя усадка  $S$  при отмеченных условиях будет равна

$$\bar{s} = 1 - \sqrt[3]{Y}; \quad Y = Mv_0(p + \pi) / [RT + Mb(p + \pi)],$$

где  $v_0$  — удельный объем полимера при комнатной температуре и атмосферном давлении;  $M$  — молекулярная масса.

Исходными данными для определения значений констант уравнения состояния являются сжимаемость как функция от давления  $\kappa = f'(p)$ ; объем как функция от температуры  $v_0 = f''(T)$ , а также плотность  $\rho = f(p, T)$  или  $v_0 = \psi(p, T)$ .

Константа  $b$  отражает физическое состояние полимера и в значительной мере определяется давлением и температурой. Константа  $\pi$  связана с внутренним давлением, вызываемым силами притяжения, действующими между молекулами, и зависит от условий измерения; это существенный недостаток, мешающий применению уравнения состояния.

Значения констант ниже и выше температуры перехода значительно отличаются друг от друга. Для расчета объемных изменений полимеров нужно знать соответствующие интервалы температуры разных морфологических состояний.

Уравнение состояния не учитывает таких характерных свойств полимерных материалов, как объемная вязкость, способность к ориентации, релаксации и, главное, влияние фактора времени на изменение объема и размеров отливок. Оно учитывает только объемное или среднее линейное изменение массы. Но в литевых изделиях усадка в значительной степени зависит от направления течения расплава, а также от характерных параметров процесса литья под давлением.

Для реактопластов усадка зависит от типа связующего и наполнителя (состав, консистенция), их соотношения в композиции, а также других ингредиентов; от условий предварительной подготовки материала к формованию и режимов формования. Усадка связана с процессами, происходящими в замкнутом объеме литьевой камеры (цилиндра) и в форме; в литьевой камере — одновременным расплавлением и сближением частиц „рыхлого” расплава и уменьшением пористости, а затем выдавливанием (и ориентацией) расплава по литниковым каналам в формующую полость; в форме — пластической деформацией частиц сжатием (уплотнением) расплава в монолитную массу, выделением при этом летучих; отверждение (под действием температуры и давления) связующего, сопровождающимся уменьшением его

объема и дополнительным выделением паров воды и газов (так называемая химическая, или релаксационная, усадка).

Значительные объемные изменения реактопластов происходят за короткий период (несколько секунд) размыкания формы и извлечения изделия: после снятия давления (при условии, что оно действует на массу, пока форма сомкнута) проявляется „память” материала как реакция на сжатие по линии приложения давления и ориентацию частиц наполнителя. Кроме того, в этот момент изделие испытывает термоудар (разница температур около 150–180 °С) и начинается неравномерное охлаждение. Отмеченные причины вызывают анизотропию усадки реактопластов.

Итак, определение усадочных характеристик имеет важное самостоятельное значение: 1) при конструировании и изготовлении пластмассовых изделий, когда решается вопрос об их точности, для чего важно установить, кроме абсолютной величины, еще и колебание значений усадки; 2) при конструировании формующего инструмента, когда усадка материала компенсируется определенным увеличением размера формующих элементов относительно соответствующих размеров изделия; 3) при оценке прочности пластмассовых изделий, поскольку величина усадки характеризует внутренние усадочные напряжения, возникающие во время формования, и вызывающие трещины, разрывы, коробление; 4) при оценке эксплуатационных качеств пластмасс, когда решается вопрос о величине компенсации зазора (натяга) в сопряжении вследствие размерной нестабильности изделий, для чего важно установить на образцах, кроме величины усадки при формовании, являющейся первичной, значение дополнительной усадки, возникающей в определенных эксплуатационных условиях; 5) при выборе пластмассы в качестве конструкционного материала, когда предъявляются определенные требования к точности и прочности изделий, для чего производится сравнительная оценка величины и колебания усадки; 6) при проведении контрольных, приемочных и арбитражных испытаний полимерных материалов.

**Точность и взаимозаменяемость резьбовых соединений пластмассовых изделий.** Резьба для изделий из пластмасс может иметь принципиально любой профиль; в производстве наиболее широко распространены метрические резьбы. Эти резьбы для диаметров от 1 до 180 мм регламентированы ГОСТ 11709–81 „Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая для деталей из пластмасс”, в котором нормируются профиль, основные размеры, допуски, предельные отклонения и обозначения резьбы.

Номинальный профиль метрической резьбы на изделия из пластмасс по ГОСТ 9150–81 может быть получен как формованием, так и резанием. При массовом и крупносерийном производстве формование (прессование, литье под давлением) наиболее экономично. Изготовление резьбы на изделии из пластмасс резанием целесообразно для изделий из листовых материалов и прутков, в единичном производстве, при выполнении ремонтных работ, в резьбах с размерами диамет-

ром до 3 мм для того, чтобы не применять на производстве резьбовых знаков в формах, для обеспечения высокой точности (6-й, 7-й степеней) при больших и нормальных длинах свинчивания. Резьба в этом случае или нарезается полностью, или „калибруется” после формования ее литьем или прессованием. Наиболее целесообразно изготавливать резанием внутреннюю резьбу с применением метчиков.

Диаметры и шаги резьб деталей из пластмасс принимаются по ГОСТ 8724–81 (СТ СЭВ 181–75), но при этом не допускается применять для пластмассовых изделий резьбы с шагами 0,5; 0,75; 1 мм для диаметров свыше 16, 18 и 36 мм соответственно; не допускается также применение мелких шагов для диаметров менее 4 мм. Основные размеры резьб с крупными и мелкими шагами для изделий из пластмасс не отличаются от стандартных и принимаются по ГОСТ 9150–81 (СТ СЭВ 182–75). Основные положения системы допусков, обозначения полей допусков, числовые значения допусков и основных отклонений, длины свинчивания и форма впадины резьбы принимаются по ГОСТ 16093–70 (СТ СЭВ 640–77), как и поля допусков металлических деталей, сопрягаемых с пластмассовыми. Однако для диаметров от 3 до 8 мм допускается применение особо крупных шагов, причем в равной степени в парах металл–пластмасса и пластмасса–пластмасса, т. е. особо крупные шаги выполняют и в резьбе металлических деталей резьбового соединения.

Поля допусков устанавливают в зависимости от выбранного класса точности резьбы. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к точности резьбового соединения, поля допусков резьб болтов и гаек установлены в трех классах точности: среднем, грубом и очень грубом. Кроме того, следует учитывать длину свинчивания резьбы: короткую  $S$ , нормальную  $N$  и длинную  $L$  (ГОСТ 16093–81). Длина свинчивания для резьбовых деталей из пластмасс с особо крупными шагами равна: при  $p=1$  мм и номинальных диаметрах св. 2,8 до 5,6 мм  $S < 3$  мм;  $N > 3–9$  мм;  $L > 9$  мм; при шаге 1,5 мм и тех же номинальных диаметрах  $S < 4,6$  мм;  $N > 4,6 + 14$  мм;  $L > 14$  мм.

Допуски диаметров резьб, если нет особых оговорок, относятся к наибольшему значению нормальной длины свинчивания или ко всей длине резьбы, если она меньше наибольшей нормальной длины свинчивания.

Поля допусков класса точности „средний” предназначены для резьбовых изделий с мелким шагом и малым диаметром, к которым предъявляются высокие требования соосности соединяемых изделий, отсутствия эксцентриситетов, герметичности при отсутствии ощутимой затяжки и при использовании специальных паст для подвижного соединения.

Поля допусков класса точности „грубый” рекомендуются для сильно нагруженных резьбовых соединений. В этих соединениях не рекомендуется сопрягать изделия из хрупких и упругопластичных материалов, так как прочность соединений при этом снижается в 3–5 раз.

Поля допусков класса точности „очень грубый” предназначаются для слабонагруженных резьбовых соединений изделий из пластмасс и соединений, в которых одно изделие – металлическое. Соединения типа „металл – пластмасса” будут иметь большую прочность, чем соединения типа „пластмасса – пластмасса”.

Классы точности резьбы как конструкторские категории связаны со степенями точности изготовления резьб – от 6-й до 9-й включительно, причем 6-я степень точности является основной, допуск ее является резьбовой единицей.

Предельные отклонения полей допусков резьб в общем соответствуют ГОСТ 16093–81, кроме не указанных там случаев, а именно полей  $9h3h$ ,  $10h8h$ ,  $9g8g$  и полей допусков резьб с особо крупными шагами. Допуск среднего диаметра является суммарным и ограничивает сумму отклонений среднего диаметра, шага и половины угла профиля.

Структурная формула для допуска среднего диаметра резьбы болта имеет вид:

$$Td_2 \geq \Delta d_2 + \Delta d_{2\text{изг}} + \Delta_{\text{изн}} + \Delta p + \Delta_{p,s} + \Delta_{p,\Delta s} + \Delta_{\alpha/2}$$

где  $\Delta d_2$  – погрешность вследствие рассеяния размеров среднего диаметра резьбы и из-за колебания усадки;  $\Delta d_{2\text{изг}}$  – погрешность изготовления среднего диаметра резьбы формы;  $\Delta_{\text{изн}}$  – погрешность вследствие износа резьбы формы;  $\Delta p$  – погрешность среднего диаметра резьбы, учитывающая погрешность изготовления шага резьбы формы;  $\Delta_{p,s}$ ,  $\Delta_{p,\Delta s}$  – погрешности среднего диаметра резьбы, учитывающие соответственно усадку и колебание усадки шага резьбы на всей длине свинчивания;  $\Delta_{\alpha/2}$  – погрешность среднего диаметра резьбы, учитывающая неточность половины угла профиля [так же записывается формула для  $Td_2$  пластмассовой гайки (см. рис. 2.17)].

Составляющая допуска  $\Delta p$  зависит от точности изготовления резьбы формы, которая, как правило, бывает высокой; значения  $\Delta p$  находятся в пределах  $\pm 0,01$  мм.

Составляющая допуска  $\Delta_{p,s}$  зависит не только от величины усадки, но и от ее колебания, а также от конструкции формы, которая может быть изготовлена как с увеличением размеров на размер средней усадки (с скорректированным шагом), так и без увеличения (с номинальным шагом, особенно для резьбовых колец). Различают два вида погрешностей, возникающих вследствие усадки: погрешность  $\Delta_{p,s}$  среднего диаметра резьбы, вызванную усадкой шага резьбы на длине свинчивания.

$$\Delta_{p,s} = nPS_{\text{max}}$$

где  $n$  и  $P$  – число ниток и шаг резьбы соответственно;  $S_{\text{max}}$  – максимальная расчетная усадка материала, %;

погрешность  $\Delta_{p,\Delta s}$  среднего диаметра резьбы вследствие колебания усадки материала  $\Delta S$  по шагу резьбы пластмассового изделия на длине свинчивания

$$\Delta_{p,\Delta s} = nP\Delta S.$$

Погрешности  $\Delta d_2$ ,  $\Delta d_{2\text{изг}}$  и  $\Delta_{\text{изн}}$  квадратично суммируются, и для определения этой суммарной погрешности  $\Delta_{\Sigma}$  можно использовать аналогичную для гладких размеров пластмассовых изделий методику.

| Шаг резьбы $S, \text{мм}$ | Номинальный диаметр резьбы $d, \text{мм}$ | Колебания усадки $\Delta S, \%$                  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|---|--|--|--|------------|--|--|-------------|--|--|-------------|--|--|-------------|--|--|----------|--|--|---|-------------------|--|---|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                           |   | $\leq 0,1$                                       |  |  | $0,1-0,16$ |  |  | $0,16-0,25$ |  |  | $0,25-0,40$ |  |  | $0,40-0,60$ |  |  | $> 0,60$ |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   | Достижимая степень точности при числе витков $n$ |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   | 4  |  |  | 8          |  |  | 16          |  |  | 4           |  |  | 8           |  |  | 16       |  |  | 4 |                   |  | 8 |  |  | 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,7                       | 2,8 - 4,2                                 | [Hatched pattern]                                |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 2,8 - 4,2                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,75                      | 4,2 - 5,6                                 | [Hatched pattern]                                |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 5,6 - 8,4                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 8,4 - 11,2                                |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 11,2 - 16,8                               |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 16,8 - 22,4                               |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,8                       | 2,8 - 4,2                                 | [Hatched pattern]                                |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 4,2 - 5,6                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,0                       | 2,8 - 4,2                                 | [Hatched pattern]                                |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 4,2 - 5,6                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 5,6 - 8,4                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 8,4 - 11,2                                |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 11,2 - 16,8                               |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 16,8 - 22,4                               |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,25                      | 22,4 - 33,8                               | [Hatched pattern]                                |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 33,8 - 45                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 5,6 - 8,4                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 8,4 - 11,2                                |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1,5                       | 11,2 - 16,8                               | [Hatched pattern]                                |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 16,8 - 22,4                               |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 22,4 - 33,8                               |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 33,8 - 45                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 45 - 67,5                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 67,5 - 90                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 90 - 135                                  |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           | 135 - 180                                 |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   | [Hatched pattern] |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                           |   |  |  |  |            |  |  |             |  |  |             |  |  |             |  |  |          |  |  |   |                   |  |   |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Степень точности резьбы:

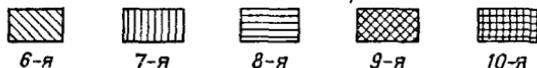


Рис. 1.25. Точность резьбы болтов, достигаемая формированием пластмасс (заштрихованы зоны достижения обозначенных степеней точности)

Верхнее отклонение наружного диаметра гайки и нижнее отклонение внутреннего диаметра по ГОСТ 11709-81 не устанавливаются, хотя косвенно нижнее отклонение ограничивается формой впадины по ГОСТ 16093-81.

При образовании резьбового соединения ГОСТ 11709–81 предусматривает два типа посадок: скользящих и с гарантированным зазором. Например, для болта посадка получается либо в системе отверстия с основными отклонениями H/g, либо в системе вала с основными отклонениями G/h (H и G – поля допусков гайки). По ГОСТ 11709–81 в посадках допускаются любые сочетания полей допусков наружной и внутренней резьб, но предпочтительно одного класса точности.

Точность резьбы формируемых изделий (прессованием, литьем под давлением) оценивается степенями точности в зависимости от значений  $\Delta S$  (сгруппированных так же, как в табл. 1.4), длин свинчивания и номинальных диаметров резьбы. На рис. 1.25 приведены в качестве примера степени точности болтов (т. е. наружной резьбы), формируемых из пластмасс, при разных условиях достижения этих степеней. Они ограничены значениями шагов от 0,7 до 1,5 мм (более полные сведения для шагов 1,75; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6 мм, а также для пластмассовых гаек (см. [4] к гл. 1), причем при условии изготовления в формах со скорректированными на величину средней усадки шагами. При изготовлении резьбы в формах с нескорректированными шагами указанные степени точности могут быть достигнуты, если длины свинчивания будут уменьшены до допустимого значения  $n' = n \Delta S / (2S_{\max})$ . Длина свинчивания в любом случае должна быть такой, чтобы прочность витков была равна прочности стенок пластмассового изделия.

**Точность изготовления изделий из стеклопластиков** зависит от метода формования. Например, при контактном формовании технологически совмещены два процесса – получение определенной стеклопластиковой структуры, т. е. получение конструкционного материала, а также самого изделия с заданной точностью и качеством поверхности. Каждый из этих процессов является самостоятельным источником производственных погрешностей, которые соответственно можно разделить на две категории: структурные погрешности и дефекты; геометрические погрешности.

Геометрические погрешности складываются из погрешностей геометрической формы (плоскостности, овальности и их взаимного расположения, непараллельности, несоосности, эксцентricности и т. п.), погрешностей размеров, шероховатости. Структурные погрешности – это погрешности армирования (выражающиеся, например, в анизотропии геометрических параметров), погрешности текстуры (например, монослойность, т. е. отсутствие прослоек связующего) и погрешности микроструктуры (связанные с однородностью и дисперсностью распределения арматуры, наличием расслоений, газовых включений, пор и т. п.).

Точность геометрических форм и размеров после извлечения изделия из формы изменяется под действием структурных напряжений в стенках, что обусловлено неоднородностью натяжения стеклоарматуры при формовании изделия.

**Точность изготовления изделий из листовых пластмасс** способами объемного формования определяется технологическими особенностями, вызывающими анизотропию свойств, в том числе плотности, усадки, точности.

Точность толщины детали в значительной мере определяет степень вытяжки.

Для изделий, изготавливаемых объемным формованием из листа, можно записать уравнение для определения суммарной размерной погрешности:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\tau} + \Delta_{\text{заг}} + \Delta_{\text{х}} + \Delta_{\text{кон}},$$

где  $\Delta_{\text{заг}}$  — погрешность первоначальной толщины листа — заготовки.

В свою очередь, технологическая погрешность  $\Delta_{\tau}$  включает в себя: погрешность  $\Delta_{\text{изг.ф.}}$ , возникающую за счет неточности изготовления оформляющих деталь элементов формы; погрешность  $\Delta_{\text{экспл.ф.}}$ , возникающую за счет неточности эксплуатации формы (неплотное прилегание и пр.); погрешность  $\Delta_{\text{охл.}}$ , возникающую в процессе охлаждения изделия, причем  $\Delta_{\text{охл.}} = f(\Delta_{\tau}, \Delta_{\gamma}, \Delta_{\text{в}})$  (здесь  $\Delta_{\tau}$  — погрешность, возникающая из-за неравномерности разогрева листа;  $\Delta_{\gamma}$  — погрешность из-за различия в скорости вытяжки;  $\Delta_{\text{в}}$  — погрешность, возникающая как следствие влияния технологической операции вытяжки) и другие погрешности  $\Delta_{\text{др.}}$ .

Учитывая природу погрешностей, можно записать:

$$\Delta_{\tau} = \Delta_{\text{изг.ф.}} + \Delta_{\text{экспл.ф.}} + (\Delta_{\text{охл.}}^2 + \Delta_{\text{кон}}^2 + \Delta_{\text{др.}}^2)^{1/2}.$$

К общим рекомендациям по повышению точности изделий, изготавливаемых методами объемного формования из листа, относятся следующие: повышение стабильности и равномерности разогрева листа с учетом расположения мест его утонения при формовании; максимальный учет требований технологии при конструировании изделий и формы для его изготовления (наличие углов уклона, скругления, достаточной опорной поверхности при закреплении листа и т. д.); подбор листовых заготовок с минимальным колебанием размеров по толщине и т. д.

**Точность изделий, получаемых экструзией**, зависит от неоднородности сырья; нестабильности технологических параметров экструзии; изменения условий калибрования и охлаждения экструдата; отклонений в нормальной работе основного оборудования, вспомогательных и тянущих устройств; погрешности методов и средств контроля.

Эти факторы вызывают характерные для экструзионных изделий погрешности: от разбухания  $\Delta_{\text{р.}}$ ; от температурной усадки материала  $\Delta_{\text{т.у.}}$ ; от структурной усадки материала  $\Delta_{\text{с.у.}}$ ; от релаксации внутренних напряжений  $\Delta_{\tau}$ ; от колебания степени вытяжки  $\Delta_{\text{в}}$ .

Таким образом, можно записать:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\Sigma \text{инстр}} + (\Delta_{\text{р.}}^2 + \Delta_{\text{т.у.}}^2 + \Delta_{\text{с.у.}}^2 + \Delta_{\text{т}}^2 + \Delta_{\text{в}}^2)^{1/2},$$

$$\Delta_{\Sigma \text{инстр}} = (\Delta_{\text{изг}}^2 + \Delta_{\text{з}}^2 + \Delta_{\text{изн}}^2 + \Delta_{\text{кон}}^2)^{1/2},$$

где  $\Delta_{\text{изг}}$  – погрешность, возникающая из-за неточности изготовления формующего и калибрующего инструментов;  $\Delta_3$  – погрешность, возникающая за счет эксцентричной установки дорна и мундштука;  $\Delta_{\text{изн}}$  – погрешность от износа формующего и калибрующего инструментов;  $\Delta_{\text{кон}}$  – погрешность методов контроля экструдата.

Перечисленные общие зависимости для  $\Delta_{\Sigma}$  при оценке точности различных изделий должны конкретизироваться. Прежде всего необходимо устанавливать вид связи суммарной погрешности основного размера экструдата (диаметра, толщины и т. д.) с номинальным его значением.

## ГЛАВА 2

### ФОРМЫ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ

#### 2.1. Назначение, устройство и принцип действия форм для прессования

В формах для прессования (пресс-формах) получают изделия массой от нескольких граммов до 5–10 килограммов, простой и сложной конфигурации, с металлической арматурой, мало- и крупногабаритные, плоские и объемные, т.е. очень разнообразные.

Пресс-формы должны обеспечить: перевод массы в вязкотекучее состояние; деформирование массы и придание ей требуемой конфигурации (соответствующей полости, образующейся в замкнутой форме); фиксацию этой конфигурации, т.е. изделия; извлечение, удаление отпрессованного изделия из рабочей зоны.

Конструкции пресс-форм также весьма разнообразны, они отражают особенности и требования, предъявляемые к изделиям, но при этом каждая пресс-форма должна выполнить свое назначение *надежно* и *максимально долго* (сообразуясь с программой выпуска конкретного изделия), *производительно* (т.е. при минимально возможном технологическом цикле прессования конкретного изделия, при максимальном прессосъеме – количестве пресс-материала, перерабатываемого в течение месяца, года и отнесенное к 10 кН эффективного усилия пресса, на котором установлена данная пресс-форма), *качественно* (с такими разбросами прочностных, точностных и других параметров качества у всей партии отпрессованных изделий, которые были бы в пределах заданных соответствующих допусков).

В пресс-формах изготавливают изделия практически из всех видов реактопластов, резиновых смесей, сравнительно редко – из термопластов. В последнем случае для фиксации конфигурации и затвердевания изделия формы охлаждают. Во всех других случаях пресс-формы только нагревают, и деформирование массы, отверждение расплава реактопласта (или вулканизация резиновой смеси) в полости формы происходит под воздействием высокой температуры, причем к тепловым потокам от внешних источников тепла добавляется небольшое

количество теплоты экзотермических химических реакций, происходящих в терморезистивных полимерных материалах при их превращениях. Отверждение, создание твердой, жесткой, неплавкой, необратимой структуры материала во всем объеме изделия окончательно фиксирует его конфигурацию, позволяет извлекать изделие без повреждений.

Наиболее распространены и чаще всего вновь проектируются пресс-формы для изделий из реактопластов – порошкообразных и волоконистых. Особенности реакции отверждения реактопластов и процессов, протекающих в полости пресс-формы, рассмотрены в работе [1], а типовые схемы и технология прессования – в работах [5, 6].

Глубина, или степень протекания реакции (степень отверждения) прямо определяет комплекс технологических свойств расплава (его эффективную вязкость, удельный объем), а также выходные характеристики отвержденного изделия, причем эти характеристики при фиксированных температуре, давлении, интенсивности деформирования расплава являются однозначной функцией степени отверждения. Следовательно, конструкция пресс-формы должна обеспечить по возможности одинаковую степень отверждения материала в объеме изделия, тогда будут минимальными градиенты напряжений (термических, усадочных), неоднородность, разброс качественных параметров. Для этого требуется создать и эффективно поддерживать достаточно однородное температурное поле в формирующей полости на стадиях ее заполнения и уплотнения; во всем объеме изделия – во время стадии выдержки на отверждение (в пресс-формах перерабатывают реактопласты при температурах от 130 до 180–190 °С – в основном в зависимости от химических особенностей полимерных связующих).

Давление, которое передается на прессуемый материал, затрачивается на уплотнение дозы его в полости формы или в специальной загрузочной камере (а если эта доза – таблетка, то и на ее раздавливание); на преодоление сопротивления растеканию расплава по полости формы или в загрузочной камере и полости формы; на обеспечение необходимой степени уплотнения расплава в целиком заполненной полости, из которой удалены летучие, пары влаги. На стадии выдержки на отверждение давление должно быть максимально возможным. В зависимости от вида пресс-материала, метода прессования, температурных параметров давление прессования реактопластов в пресс-формах может быть от 15 до 200 МПа; в пресс-формах прямого прессования пресс-порошков – 15–50 МПа; то же для волоконитов – 40–70 МПа; в пресс-формах для литьевого прессования – 150–200 МПа, поскольку в значительной мере давление затрачивается на преодоление сопротивления течению расплава в литниковых каналах.

Временные параметры процесса прессования, которые должны быть обеспечены нормальной работой пресс-формы, назначают на основании: технологических свойств пресс-материала (удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности, плотность); температур

размягчения, предварительного нагрева, расплава, интенсивного его отверждения, стенки пресс-формы; конфигурации и толщины стенки прессуемого изделия.

Время стадий заполнения полости пресс-формы и уплотнения в ней расплава аналитически оценить трудно (много переменных факторов – материальных, технологических и конструктивных); в большинстве случаев оно составляет 3–5 с.

Время выдержки под давлением, в течение которого расплав продолжает нагреваться от стенок пресс-формы до температуры интенсивного отверждения массы, упрощенно оценивается произведением „условного” времени отверждения одного миллиметра толщины изделия на половину всей толщины (если осуществляется двухсторонняя передача тепла от стенок к материалу). Это „условное” время определяют экспериментально, его можно корректировать по результатам пластометрических испытаний материалов.

Все временные параметры зависят от присущей конкретному пресс-материалу продолжительности вязкотекучего состояния  $t_{\text{втс}}$ , причем важно, чтобы  $t_{\text{втс}} > t_{\text{пн}} + t_1$ , где  $t_{\text{пн}}$  – время предварительного нагрева прессуемой дозы (возможно, и вне пресс-формы);  $t_1$  – суммарное время, необходимое для загрузки дозы (таблетки, навески порошка или волокнита) в пресс-форму, а также собственно формования (включая смыкание пресс-формы с учетом продолжительности подпрессовок). Как видно, временные параметры во многом зависят от конструктивных возможностей пресс-форм. Температура же прессования уточняется при условии обязательного выполнения приведенного выше неравенства.

Выбор метода прессования реактопластов и, следовательно, типа пресс-формы, зависит в равной степени от прессуемого материала, конструкции изделия. Последнее влияет на степень сложности конструкции пресс-формы, на характер и число плоскостей ее разъема (плоскостей, по которым пресс-форма раскрывается для удаления из полости отпрессованного изделия).

Сложность изделия, использование в конструкции металлической арматуры, наличие поднутрений также влияет на характер расположения и число плоскостей разъема формы. Например, изделия, показанные на рис. 2.1, а, изготавливаются в сравнительно простой пресс-форме прямого прессования с одной горизонтальной плоскостью разъема; на рис. 2.1, б – требуют для своего изготовления обязательно две плоскости разъема – горизонтальную и вертикальную и, естественно, это вызывает усложнение пресс-формы (используются клиновые обоймы-щеки или другие приспособления); на рис. 2.1, в – относительно сложны, но малогабаритны, имеют сплошную проходную металлическую арматуру, их изготавливают пресс-литьем.

На рис. 2.2 показана типичная пресс-форма для прямого (компрессионного) прессования одного простого плоского изделия. В прессовании участвуют: пуансон 6, матрица 5, контактные выталкиватели 22. Все остальные детали обеспечивают работу пресс-формы, установлен-

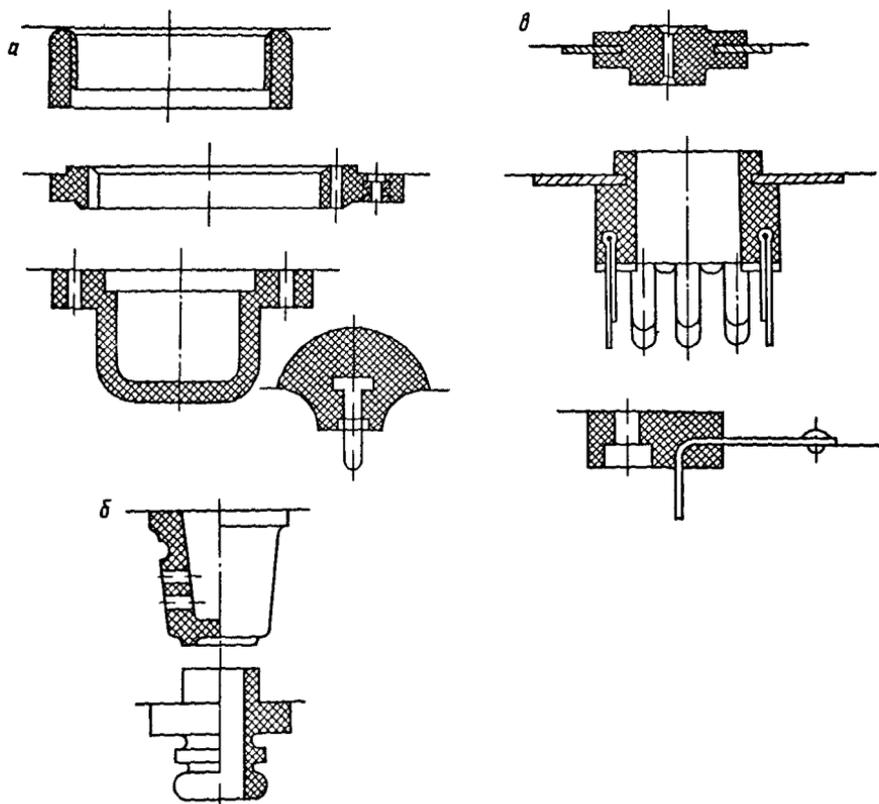


Рис. 2.1. Эскизы типовых изделий, получаемых в пресс-формах:

*а* — с одной горизонтальной плоскостью разреза (прямое прессование); *б* — с одной горизонтальной и одной вертикальной плоскостями разреза (прямое прессование); *в* — с одной горизонтальной плоскостью разреза, сложных, насыщенных металлической арматурой (пресс-литье)

ной на прессе постоянно, стационарно, на все время выполнения заданной планом программы изделий.

Деталими 2, 4, 7–9 верхняя и нижняя полуформы закрепляются к плитам пресса. Детали 1, 11, 13, 14 и 19 скрепляют отдельные узлы или детали друг с другом, а 16, 17, 23 и 27 — центрируют подвижные части пресс-формы. В деталях 3 и 10 осуществляется монтаж нагревательных элементов, а в 15 и 18 — монтаж основных формирующих деталей 5, 6, 22. Деталь 20 предохраняет нагревательные элементы от повреждения. Детали 21 создают пространство для размещения блока выталкивателей. Детали 12 обеспечивают контакт двух полуформ при их смыкании (это своеобразный компенсатор размерной цепи, определяющей взаимное положение основных формирующих деталей по вертикали). Детали 24–26 обеспечивают монтаж блока выталкивателей, деталь 28 соединяет блок выталкивателей с нижним выталкивающим гидроци-

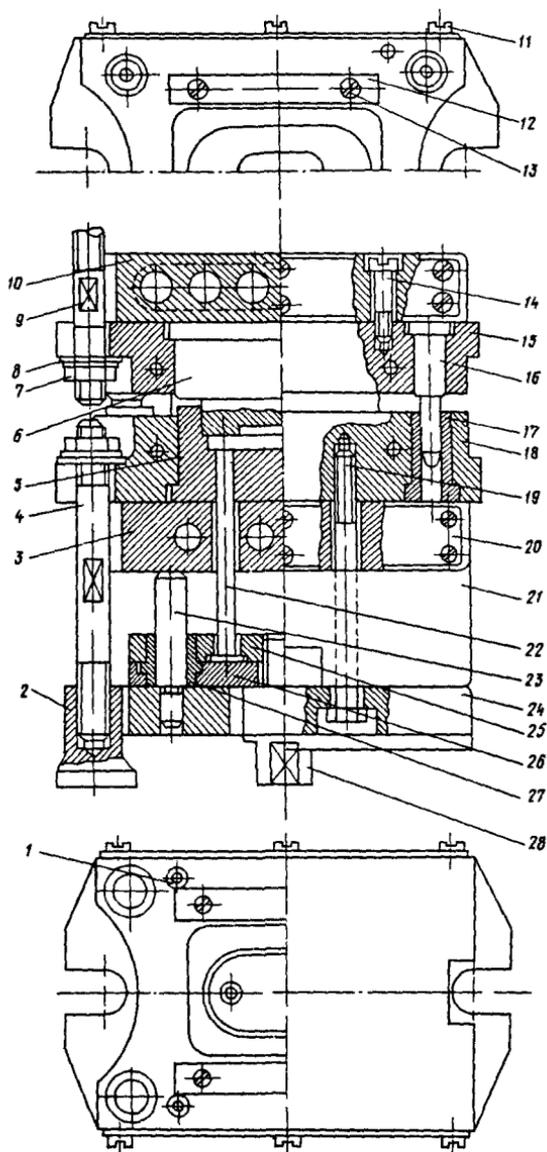
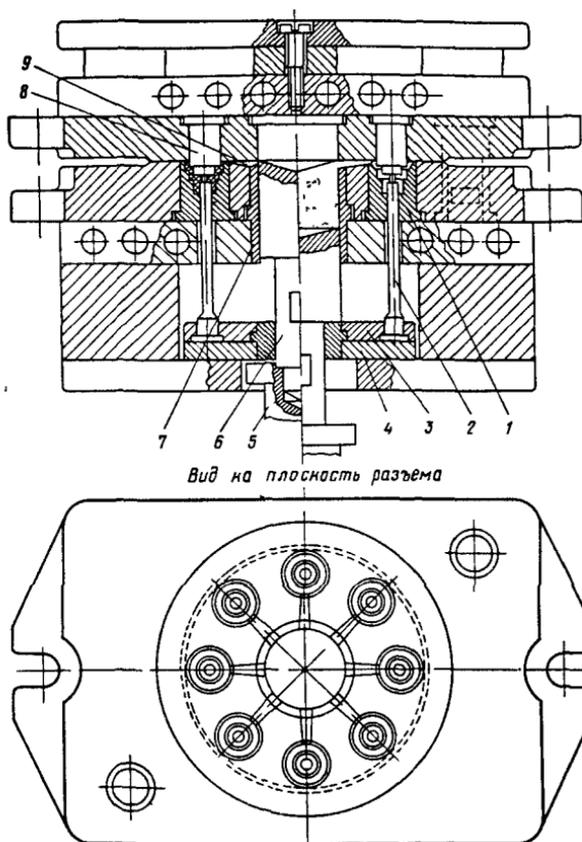


Рис. 2.2. Типичная конструкция стационарной пресс-формы (без теплоизолирующих плит):

1 — штифт; 2 — сухарь; 3 — средняя плита обогрева; 4 и 9 — шпильки; 5 — матрица; 6 — пуансон; гайка; 8 — шайба; 10 — верхняя плита обогрева; 11, 13, 14 и 19 — винты; 12 — упорная планка; 1. пуансонодержатель; 16 и 23 — направляющие колонки; 17 и 27 — втулки; 18 — держатель обоймы; 20 — планка; 21 — опорный брус; 22 — выталкиватель; 24 — нижняя плита; 25 — верхняя плита блс выталкивателей; 26 — нижняя плита блока выталкивателей; 28 — хвостовик



Вид на плоскость разреза

Рис. 2.3. Типичная конструкция стационарной литейной пресс-формы (на гидропресс с двумя рабочими давлениями):

1 — матрица; 2 — выталкиватель; 3 — верхняя плита блока выталкивателей; 4 — нижняя плита блока выталкивателей; 5 — хвостовик; 6 — плунжер; 7 — загрузочная камера; 8 — пуансон; 9 — литниковый канал

линдром пресса. Наименования перечисленных деталей указаны в подписи под рис. 2.2.

В раскрытом состоянии верхняя полуформа поднята, выталкиватели 22 находятся в крайнем нижнем состоянии. Полость пресс-формы загружают доз. пресс-материала, а затем верхнюю полуформу смыкают с нижней. После цикла прессования верхнюю полуформу поднимают, пуансон 6 выходит из полости, а изделие остается в ней. Затем через хвостовик 28 поднимают блок выталкивателей до упора плиты 25 с плитой обогрева 3; при этом выталкиватели поднимают изделие, и его удаляют из рабочей зоны (здесь — специальным приспособлением, вилкой). Далее нижний плунжер с хвостовиком опускается, перемещая блок выталкивателей в его исходное положение.

На рис. 2.3 приведена типичная конструкция пресс-формы для литьевого прессования. Изделие формуется в полости между матрицей 1, пуансоном 8 и выталкивателем 2 со знаком, оформляющим центральное отверстие в изделии. Смыкание верхней полуформы с нижней осуществляется с помощью верхнего гидроцилиндра через верхнюю траверсу пресса. До смыкания дозу материала загружают в загрузочную камеру 7, а после смыкания плунжер 6, соединенный с нижним гидроцилиндром, передавливает расплав по литниковым каналам в формирующие полости — их шесть (см. рис. 2.3, слева от оси). По окончании технологического цикла и раскрытия пресс-формы хвостовик 5 своей утолщенной частью поднимает блок выталкивателей (плиты 3, 4 и выталкиватели 2), изделия готовы к удалению из рабочей зоны с помощью вилок.

Одно из основных направлений совершенствования конструкции пресс-форм, рационального их использования, повышения уровня нормализации и стандартизации — это разработка универсальных блоков, в которых заменяют только формирующие детали, соединенные в пакете, оставляя все остальные детали без изменения (конечно, в пределах технических возможностей прессов, на которые эти блоки — пресс-формы устанавливают).

На рис. 2.4 приведена типичная конструкция универсального блока для прямого прессования. Он состоит из верхней и нижней частей, закрепляемых стационарно соответственно на верхней и нижней плитах гидравлического пресса. Центрирование частей осуществляют с помощью направляющих колонок 1. Для крепления сменных пакетов на верхней и нижней частях блока имеются быстродействующие захваты 2 и 3. Соответствующие части сменных пакетов зажимаются с помощью клиньев, перемещаемых за счет вращения специальных винтов.

Пакеты устанавливают на две опорные плиты 4, являющиеся одновременно и нижними плитами обогрева блока. Выталкивающая система закрепляется в блоке захватами 5, зажимаемыми раздвижными клиньями 6.

Движение выталкивающей системы блока происходит по колонкам 7, которые одновременно служат опорой для плит 4. Пакет, устанавливаемый на блок, состоит из плиты пуансона 8, обоймы матрицы 9, плиты обогрева 10, плиты толкателей 11, соединительных и направляющих деталей.

После установки и закрепления на блоке сменного пакета вся система работает как индивидуальная непереналаживаемая оснастка. Такой принцип конструирования дает преимущества не только в малосерийных, опытных производствах, но и там, где изготавливают большие партии изделий, поскольку один блок может заменить несколько стационарных форм, а пакет устанавливают на все время прессования плановой партии изделий. Существующие конструкции блоков для прямого и литьевого прессования изделий из пресс-пошковых нормализованы; также нормализованы и заготовки — пакеты

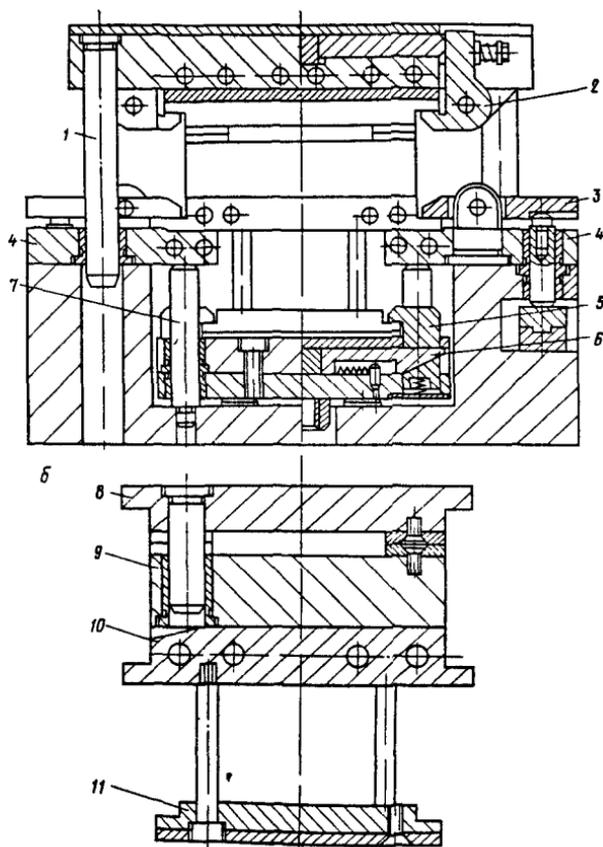


Рис. 2.4. Типичная конструкция блока для прямого прессования (а) и заготовки — пакета к нему (б):

1 — направляющая колонка; 2, 3 — прихваты для крепления сменных пакетов; 4 — опорные плиты; 5 — прихват для закрепления выталкивающей системы; 6 — раздвижные клинья; 7 — колонка; 8 — плита пуансона; 9 — обойма матрицы; 10 — плита обогрева; 11 — плита толкателей

формообразующих деталей для этих блоков (блоки для литья под давлением — см. разд. 3.1). Нормализация конструкций базируется на обоснованном конструктивно-технологическом группировании пластмассовых изделий, учитывающем их массу, габариты, степень сложности (наличие отверстий, арматуры, поднутрений и т.д.).

Из рис. 2.2–2.4 видно, что пресс-формы состоят из двух половин и представляют собой в целом как бы „слоеные” конструкции, в центре которых расположены замкнутые (в рабочем положении) загрузочные камеры и формующие полости, с обеих сторон „прикрытые” плитами с нагревательными элементами; затем — „слой” деталей разного назначения — опорных плит, брусьев, монтажных и крепежных элементов и снизу, как правило, — выталкиватели, связанные хвостовиком с

выталкивающим гидроцилиндром пресса; наконец, „слой” теплоизолирующих плит. В пресс-формах для пресс-литья появляется особая группа деталей, образующая литниковые каналы, связывающие загрузочные камеры с формующими полостями. Конструкции усложняются, если изделие требует оформления резьбы: поднутрений снаружи или изнутри, если пресс-форма должна быть многополостной, многогнездной и т.д. Все подобные усложнения должны быть выполнены в центральной, рабочей зоне, так как они связаны с конкретными изменениями объема, конфигурации, поверхности изделия.

Таким образом, можно выделить следующие функциональные системы пресс-форм: система оформляющих пластмассовое изделие деталей; система термостатирования, точнее – обогрева; литниковая система (в пресс-формах для литьевого прессования); система удаления, выталкивания изделий из пресс-формы; система центрирования отдельных деталей и полуформ; перемещения подвижных знаков относительно неподвижно закрепленных полуформ; размещения, установки и закрепления полуформ; система связи с сопряженными манипуляторами – роботами загрузки материала, извлечения и удаления отпрессованного изделия. Поясним на рис. 2.5 расположение и конструктивные особенности функциональных систем пресс-формы.

Система оформляющих деталей включает в себя пуансон 7 и составную матрицу 11, 13. Часть полости матрицы, расположенной непосредственно над прессуемым изделием 12, называется загрузочной камерой (з. к.).

Система выталкивания включает в себя выталкивающие шпильки 17, а также верхний 18 и нижний 19 фланцы с толкателем 23, передающие шпилькам движение от плунжера выталкивающего гидроцилиндра пресса. Толкатель 23 соединяется с плунжером резьбовым хвостовиком.

Система обогрева состоит из цилиндрических стержневых электронагревателей, вставляемых в отверстия 2, 14, выполненные в деталях 5 и 15, непосредственно контактирующих с матрицей и пуансоном (отверстия, выполненные также в обоймах матрицы 10 и пуансона 6, в плоскость разреза не попали).

Система центрирования, обеспечивающая взаимное положение пуансона и матрицы непосредственно перед входом их в контакт при смыкании формы, состоит из четырех комплектов направляющих колонок 26 и втулок 27.

В систему размещения, установки и закрепления полуформ входят верхняя 8 и нижняя 9 опорные планки. Первая из них укреплена на верхней полуформе (пуансона), вторая – на нижней полуформе (матрицы). При смыкании формы планки входят в контакт, фиксируя тем самым глубину захода пуансона в полость матрицы. Назначение прочих деталей этой системы – во-первых, объединить в единое целое все указанные функциональные детали формы и придать ей конструктивную определенность, во-вторых, обеспечить крепеж формы на подвижной 1 и неподвижной 22 плитах пресса. К этим деталям отно-

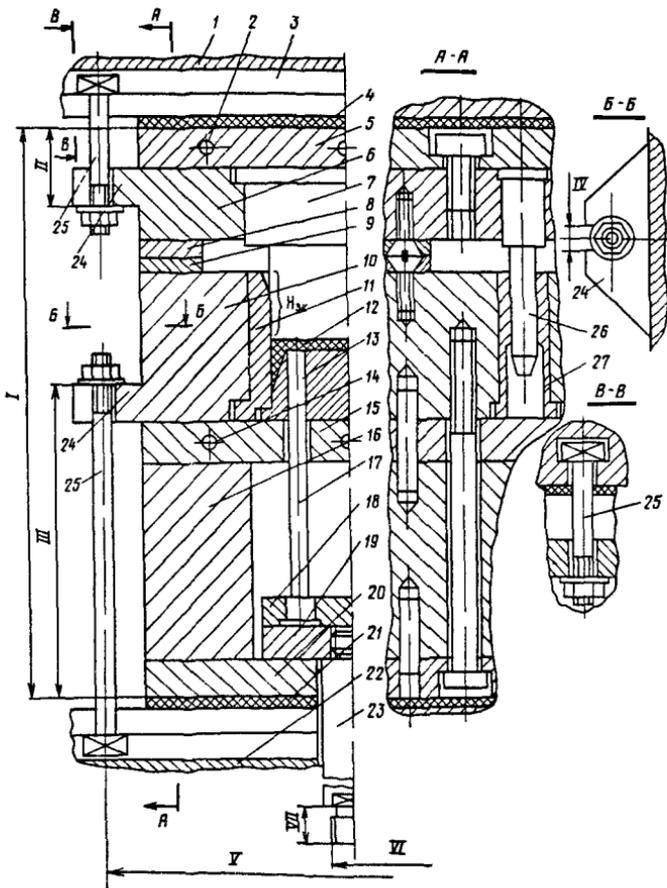


Рис. 2.5. Расположение и конструктивные особенности функциональных систем пресс-формы:

1 — подвижная плита пресса; 2, 14 — отверстия для электронагревателей; 3 — Т-образный паз плиты пресса; 4, 21 — теплоизолирующие прокладки; 5, 15, 20 — опорные плиты; 6 — обойма пуансона; 7 — пуансон; 8 — верхняя опорная планка; 9 — нижняя опорная планка; 10 — обойма матрицы; 11, 13 — составная матрица; 12 — изделие; 16 — брус; 17 — выталкивающая шпилька; 18 — верхний фланец; 19 — нижний фланец; 22 — неподвижная плита пресса; 23 — толкатель; 24 — проушина; 25 — болт; 26 — направляющая коблонка; 27 — втулка

сятся обойма пуансона 6 и обойма матрицы 10, а также опорные плиты 5, 15, 20 и брус 16.

Обоймы имеют проушины 24 для крепления полуформ к плитам пресса. Крепление выполняется болтами 25 с квадратной головкой, которая заводится в Т-образный паз 3 плиты пресса (см. также разрез В-В). Пресс-форма теплоизолируется от плит пресса прокладками 4 и 21, выполняемыми, как правило, из асбеста.

В общем все детали, из которых состоит пресс-форма, можно услов-

но разделить на две группы: 1) технологического назначения, непосредственно соприкасающиеся с прессуемым пластическим материалом и участвующие в той или иной степени в формировании изделий; 2) конструктивного назначения, осуществляющие взаимную фиксацию деталей пресс-формы, обогрев, связь ее с прессом, обеспечивающие монтаж, и т.д.

К деталям технологического назначения относятся: матрицы, пуансоны; детали литниковой системы и узла загрузки пресс-материала, служащие резервуаром для загружаемого пресс-материала и передающие его в формирующую полость (литниковые плиты, рассекатели, загрузочные камеры и т.д.); детали выталкивающей системы, установки и преобразования направления рабочего движения (например, из вертикального в горизонтальное) – клинья, гребенки, шибера и т.д.

В настоящее время практически все детали конструктивного назначения, кроме непосредственно соприкасающихся с прессуемой массой, нормализованы или стандартизованы. Каждая из деталей пресс-форм может быть одно- или многофункциональна, т.е. участвовать в работе одной или нескольких функциональных систем.

Подобное представление одной конструкции как комплекса функциональных систем полезно при овладении навыками проектирования на первый взгляд простых, но особо ответственных объектов, рабочих зон формования (подробнее такое представление выполнено применительно к более сложным конструктивно формам для литья под давлением в гл. 3).

Таблица 2.1. Классификация форм для прессования изделий из пластмасс

| Классификационный признак             | Краткая характеристика  |  |
|---------------------------------------|---|--|
|                                       | формы   | изделия  |
| Связь с оборудованием (гидропрессами) | Съемные формы, снимаются для извлечения изделия, загрузки материала | Изделия различной конфигурации с пониженными требованиями к качеству, точности, малотиражные                                 |
|                                       | Стационарные формы. Универсальные блоки                             | Изделия различной конфигурации и размеров с повышенными требованиями к качеству, точности                                    |
| Метод изготовления изделий            | Формы для прямого прессования – пресс-формы                         | Изделия плоскостные монолитные без арматуры или малоармированные, равностенные; точность изготовления сравнительно невысокая |
|                                       | Формы для пресс-литья – литьевые пресс-формы                        | Изделия сложной конфигурации, сильно армированные, равностенные; точность изготовления сравнительно высокая                  |

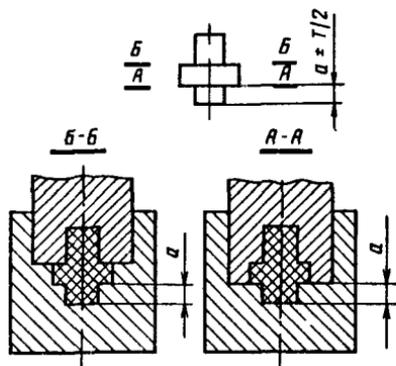
| Классификационный признак                          | Краткая характеристика  |   |
|--|---|---|
|  | формы   | изделия   |
| Степень автоматизации                              | Пресс-формы, оснащенные датчиками технологической информации, работающие в режиме АСУТП   | Изделия прецизионные, относительно простые  |
|  | Пресс-формы автоматического действия, работающие на прессах-автоматах, роторных линиях и т.д.<br>Пресс-формы, работающие на прессах-полуавтоматах<br>Пресс-формы с сопряженными манипуляторами-роботами | Изделия простые, безарматурные, точность изготовления повышенная<br><br>Изделия различной конфигурации, с арматурой или без нее; требования к качеству, точности нормальные |
| Число оформляющих поло-стей (гнезд)                | Одногнездные  | Изделия больших размеров очень сложной конфигурации   |
|  | Многогнездные (два и более)   | Изделия, изготавливаемые в массовом и крупносерийном производствах  |
| Число и характер плоскостей разреза (см. рис. 2.1) | С одной горизонтальной плоскостью, параллельной направлению усиления замыкания пресс-формы  | Различные изделия из пластмасс; точность изготовления размеров, пересекающих плоскости разрезов, невысокая  |
|  | То же с двумя горизонтальными плоскостями   |   |
|  | С одной, двумя или несколькими вертикальными плоскостями, перпендикулярными направлению усиления замыкания пресс-формы  |   |
|  | С комбинированным (горизонтальным и вертикальным) разрезом; пластинчатые (галетные)   |   |

В табл. 2.1 приведена укрупненная классификация пресс-форм. Она может быть развита, если классификационные признаки дополнять особенностями функциональных систем (см. последующие разделы данной главы). Здесь поясним на примере важность последнего классификационного признака.

Выбор плоскости разреза пресс-формы зависит от конфигурации изделия и требуемой точности отдельных ее размеров. На рис. 2.6 показаны горизонтальные плоскости разреза по направлению хода плунжера пресса.

На первый взгляд, плоскостью разреза пресс-формы может быть как плоскость А-А, так и плоскость Б-Б. Однако размер „а” ограничен 76

Рис. 2.6. К выбору варианта расположения плоскости разреза формы при прессовании детали. Пояснения в тексте



допуском  $\pm T/2$ , и при разрезе по А-А колебания размера зависят от толщины облоя, а по Б-Б- только от усадки материала и точности изготовления матрицы.

Правильный выбор расположения плоскости разреза в пресс-форме исключает или уменьшает механическую доработку, улучшает внешний вид изделия. Известны и применяются пресс-формы безоблойного прессования, в которых облой отделяется при разрезе пресс-формы.

## 2.2. Исходные данные для проектирования

Проектирование формы вообще (и пресс-формы в том числе) должно начинаться с составления, или получения технического задания. Это задание (при проектировании промышленной конструкции) составляется в соответствии с ГОСТ 15.001-73 „Разработка и постановка продукции на производство”.

Исходными данными являются: чертёж изделия и технические требования к изготовлению и эксплуатации изделия (желательно – и чертёж узла, куда входит изделие); тип производства (массовое, серийное, опытное и т.д.); программа выпуска изделия (всего и годовая); тип оборудования, конкретная его модель, мощность и другие технические параметры, включая нестационарные характеристики вспомогательного оборудования; типы, модели и технические характеристики нагревателей, систем термостатирования; чертежи блоков (если таковые целесообразно применять); сведения о сырье (для реактопластов, например, важно указать вид загружаемого сырья – порошок, жгуты, таблетки), технологические его свойства.

Перед проектированием пресс-формы целесообразно уточнить возможности разных методов прессования: в пресс-формах для прямого прессования можно получить изделия из любого реактопласта любой конфигурации и габаритов. Исключение составляют изделия, имеющие сквозную (выступающую из изделия с двух сторон) арматуру, которая под действием давления формования может деформироваться. Этим способом нельзя также получить изделия со сквозными отверстиями малого диаметра (до 3 мм).

Литьевым прессованием получают изделия из реактопластов с хорошей текучестью. Применяют его для получения изделий повышенной точности в направлении разреза, а также изделий, которые не могут быть получены прямым прессованием.

Выявив по чертежу изделия, для которого проектируется форма, наличие элементов, требующих в форме дополнительных плоскостей разреза, можно составить эскиз формы с указанием этих плоскостей разреза (дополнительной поверхности разреза требуют также изделия, которые содержат конструктивные элементы, исключающие возможность свободного удаления данного изделия из формирующей полости формы в случае, если бы в ней была только одна поверхность разреза).

Исходные данные для проектирования пресс-форм могут являться необходимыми, но не достаточно полными для достижения оптимальных решений, которые во многом и часто зависят от опыта, интуиции конструктора.

В гл. 3 приведена (применительно к формам для литья под давлением) дополнительная информация относительно исходных данных для проектирования.

### 2.3. Взаимодействие формы с прессом

Пресс-форма работает совместно с гидравлическим прессом, т.е. с машиной периодического действия. Закономерность такой циклической работы отражает предельно неплотная циклограмма. Время цикла включает: две паузы, связанные с остановкой ползуна пресса в верхнем положении (пресс-форма разомкнута, загрузочная камера с формирующей полостью заполняется дозой материала) и в нижнем положении (пресс-форма сомкнута, происходит отверждение массы, формование изделия); холостой ход ползуна вниз и вверх и собственно рабочий ход исполнительного механизма (плунжера), когда осуществляется непосредственное воздействие на обрабатываемый материал. Система удаления, выталкивания изделия из пресс-формы начинает действовать после того, как прошла некоторая часть времени холостого хода вверх (пресс-форма полностью раскрыта, пуансон выведен из зоны формования). Механизм (манипулятор) съема изделий свой рабочий ход может начать во время паузы системы выталкивания, после ее рабочего хода. Механизм (манипулятор) загрузки материала, установки знаков и арматуры (если требуется) может начать работу после полного освобождения формирующего гнезда. Таково кинематическое взаимодействие пресс-формы с прессом.

Схема геометрического взаимодействия представлена на рис. 2.7.

К паспортным техническим характеристикам пресса относят максимальный ход подвижной плиты  $S$  и плунжера цилиндра выталкивания  $L$ , максимальное расстояние между плитами  $H$ , а также номинальное усилие пресса  $F_H$ . С ними должны быть согласованы минимально необходимый ход разреза формы  $S$ , ход системы выталкивания  $l$ , высота формы в сомкнутом состоянии  $h$  и технологически обоснованная величина усилия прессования  $F_{пр}$ .

Пресс может осуществить полное смыкание формы и развить в ней необходимое давление, если будет соблюдено соотношение (см. рис. 2.7):  $H_{min} < h$ ;  $H_{min} = H - S$ . Фактический ход подвижной плиты при

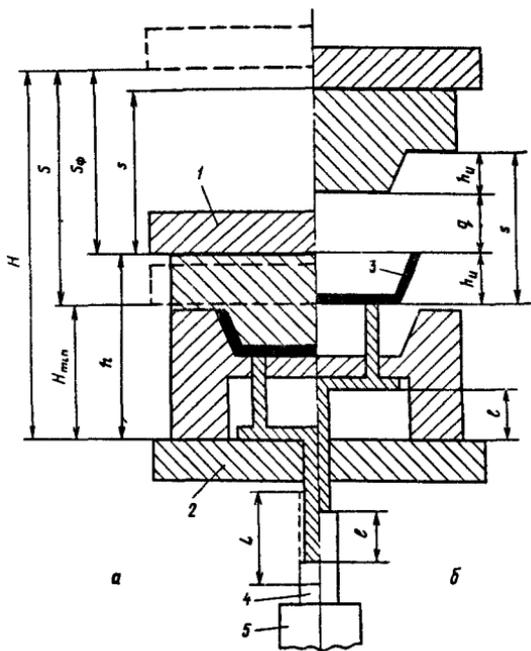


Рис. 2.7. Схема взаимодействия пресс-формы с прессом:

*a* — сомкнутые полуформы; *б* — разомкнутые полуформы; 1 — подвижная плита пресса; 2 — неподвижная плита пресса; 3 — изделие; 4 — плунжер; 5 — гидроцилиндр блока выталкивания (штриховыми линиями показаны крайние положения плиты 1 и плунжера 4)

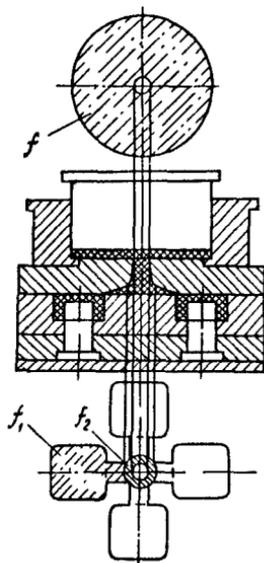
данной высоте формы равен  $S_{\phi} = H - h$ ; минимально необходимый ход  $s$  для нормального извлечения изделия из пресс-формы составляет  $s = 2h_u + q$  (где  $q$  — дополнительное расстояние для безопасного удаления изделия вручную, равное 150–200 мм). Следовательно,  $s_{\phi} \geq s$ , или  $H - h \geq 2h_u + q$ . Кроме того, должно быть  $L \geq l$ ;  $F_H > F_{пр}$ .

Правильный выбор типоразмера крепежных болтов 25 (см. рис. 2.5) может быть сделан, если на чертеже пресс-формы указаны размеры II–IV. Соответствие места проушины формы 24 расположению T-образных пазов на плитах пресса определяется размером V. Возможность сопряжения с плунжером зависит от размеров VI, VII (см. рис. 2.5).

**Расчет гнездности пресс-формы для прямого прессования.** Проектировать многогнездную пресс-форму целесообразно в следующих случаях: при количестве поверхностей разреза больше двух; для изделий, имеющих много арматуры, резьбовые знаки, боковые вкладыши или знаки; для изделий сложной конфигурации (нерационально увеличиваются габариты формы).

Если перечисленных ограничений нет, то гнездность определяют, устанавливая соотношение номинального усилия (мощности) того конкретного гидравлического пресса, на который проектируется

Рис. 2.8. Схема к расчету числа гнезд в пресс-формах для литьевого прессования



пресс-форма, и усилия прессования  $F_{пр}: n = F_n / F_{пр} = F_n / (k p_0 f)$ , где  $p_0$  — давление прессования (примерно равно: для фенопластов — 30–40 МПа, для волокнита — 40–50 МПа, аминопластов — 25–30 МПа, текстолита и стеклопластиков — 40–70 МПа);  $f$  — площадь прессования, м<sup>2</sup>;  $k$  — коэффициент, учитывающий неизбежные потери давления на трение в уплотнительных и других устройствах и равный 1,2.

Площадь прессования определяется по-разному для разных типов загрузочных камер и формирующих гнезд (открытых, полузакрытых и закрытых — см. разд. 2.2.2); это площадь проекции изделия на плоскость, перпендикулярную направлению прессования, для открытых и закрытых

пресс-форм или площадь проекции загрузочной камеры в полузакрытых пресс-формах, которая обычно на 20–40% больше площади проекции изделия. Учет коэффициента  $k$  фактически приводит к более точной оценке эффективного усилия  $F_3$ , развиваемого прессом:  $F_3 = F_n - F_{тр} - G_{пр}$ , где  $F_{тр}$  — потери на трение в уплотнительных и других устройствах;  $G_{пр}$  — масса подвижных деталей прессы.

Величину удельного давления прессования  $p_0$  для конкретной пресс-формы и прессы можно проверить по экспериментально установленному манометрическому давлению  $p_m$  в гидроцилиндре прессы:  $p_0 = (p_m k_{пр} f_{плж}) / f_{з.к}$ , где  $k_{пр}$  — коэффициент полезного действия прессы ( $k_{пр} < 1$ );  $f_{плж}$  — площадь поперечного сечения плунжера прессы;  $f_{з.к}$  — площадь горизонтальной проекции загрузочной камеры пресс-формы.

По установленному числу гнезд можно вычислить эффективное усилие выталкивания изделия  $F_{выт.з} = p_{адг} f_6$ , где  $p_{адг}$  — адгезионная прочность связи отвержденного реактопласта с металлической стенкой пресс-формы (около 0,1–0,4 МПа для фенопластов);  $f_6$  — боковая поверхность полости (матрицы).

**Расчет гнездности пресс-форм для литьевого прессования.** В пресс-форме для литьевого прессования усилие, действующее на материал в загрузочной камере, площадь проекции которой на горизонтальную плоскость равна  $f$  (рис. 2.8), стремится сомкнуть форму. Усилие, действующее на площадь проекции полости (изделия)  $f_1$  и площадь проекции литниковой системы  $f_2$ , стремится разомкнуть форму. Если давление на материал в литьевой камере и в формирующей

полости равны, то условие неразмыкания формы будет следующим:

$$f \geq nf_1 + f_2, \text{ или } n \leq (f - f_2)/f_1.$$

При конструировании пресс-формы для литьевого прессования известны параметры  $F_{\text{н}}$ ,  $\rho_0$ ,  $f_1$  (при выбранном рабочем положении изделия в формующей полости). Поэтому рассчитывая гнездность таких пресс-форм, сначала принимают  $f_2 = 0$ , полученное значение  $n$  округляют в меньшую сторону, затем конструируют литниковую систему и проверяют приведенное выше соотношение для  $n$ ; если оно (соотношение) не выполняется, то увеличивают площадь  $f$ .

**Оценка гнездности пресс-форм по экономико-технологическим параметрам.** Для этого сравнивают фактический фонд рабочего времени (например, за месяц) и технологически обусловленное время выполнения задания по выпуску конкретной детали в проектируемой пресс-форме, а именно:  $n = (\tau^1 \delta z k_{\text{ср}}) / C$ . Здесь  $\tau^1$  – время выдержки изделия в пресс-форме в расчете на 1 мм толщины изделия, мин;  $\delta$  – половина наибольшей толщины прессуемого изделия, мм;  $z$  – месячное задание по выпуску изделий, шт.;  $C$  – месячный фонд рабочего времени, мин;  $k_{\text{ср}}$  – коэффициент, зависящий от типа конструкции пресс-формы (съемная или стационарная) и наличия арматуры в изделии: съемная, полустационарная – 1,3 (без арматуры); 1,8 (до 3 единиц арматуры); 2,5 (более 3 единиц арматур); стационарная – 1,1 (без арматуры); 1,2 (до 3 единиц арматуры); 1,5 (более 3 единиц арматур).

**Технико-экономическая оптимизация гнездности пресс-форм.** С экономической точки зрения оптимальная гнездность должна обеспечивать наименьшую себестоимость изготовления пластмассовых изделий. Общая стоимость планируемой программы изделий складывается из стоимости материала для изготовления изделий ( $C_1$ ), электроэнергии ( $C_2$ ), оснастки ( $C_3$ ), оборудования ( $C_4$ ), масла и вспомогательных материалов для работы оборудования ( $C_5$ ), производственных площадей ( $C_6$ ), заработной платы обслуживающего персонала ( $C_7$ ), амортизационных и прочих расходов ( $C_8$ ).

Себестоимость прессованных изделий помимо постоянных затрат на материал и амортизацию оборудования зависит от двух переменных величин: заработной платы прессовщика (с увеличением гнездности падает) и себестоимости пресс-формы (с увеличением гнездности возрастает). Учитывая отмеченные выше положения, была получена зависимость для  $n_{\text{опт}} = [(C_{\text{пр}} \Pi) / (K_1 K_2 C_{\text{ф}})]^{1/2}$ , где  $C_{\text{пр}}$  – себестоимость прессования с накладными расходами;  $C_{\text{ф}}$  – себестоимость одного гнезда пресс-формы;  $\Pi$  – программа выпуска изделий;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий снижение себестоимости прессования с увеличением числа гнезд ( $K_1 = 0,6$ );  $K_2$  – коэффициент, учитывающий себестоимость пресс-формы с увеличением числа гнезд ( $K_2 = 0,75$ ). По аналогии с технико-экономической оптимизацией гнездности пресс-форм поступают и при расчете гнездности других типов формующего инструмента, например форм для литья под давлением (см. разд. 3.3.2, где приведена и некоторая дополнительная информация, полезная также для пресс-форм).

## 2.4. Система оформляющих деталей пресс-форм

### 2.4.1. Основные конструктивные особенности

Оформляющие детали не нормализуются, но есть ряд проверенных опытом правил и требований, предъявляемых к их конструкции.

Матрицы, в которых образуется, как правило, формирующая плоскость – наиболее ответственные детали пресс-формы. В большинстве пресс-форм матрицы является сочетанием двух элементов – собственно матрицы и загрузочной камеры. Конструкционно они могут быть выполнены как одно целое или составными, причем в последнем случае загрузочная камера и матрица являются неразъемной конструкцией; изготовление цельной матрицы не всегда технологически оправдано и для облегчения обработки иногда приходится делать матрицу составной; наружные очертания матрицы обычно имеют цилиндрическую или прямоугольную форму; придавать матрицам другую форму нецелесообразно, так как это увеличит трудоемкость их изготовления; на рис. 2.9 приведены эскизы типичных составных матриц.

Пуансоны применяют для передачи давления на пресс-массу. При прямом прессовании они оформляют наружные и внутренние поверхности детали (рис. 2.10).

Пуансоны, как и матрицы, могут выполняться сборными. Особое внимание должно уделяться фиксации пуансона – шпонками, штифтами, винтами.

Правильное сопряжение пуансона с загрузочной камерой или с матрицей достигается при надлежащем зазоре между ними: величина его зависит от диаметра или сечения пуансона, но его минимальное значение равно 0,02–0,03 мм на сторону; этому требованию отвечают посадки на рис. 2.10.

Для уменьшения трения верхняя часть загрузочной камеры делается с уклоном 15–20° на сторону; высота уклона равна половине высоты загрузочной камеры.

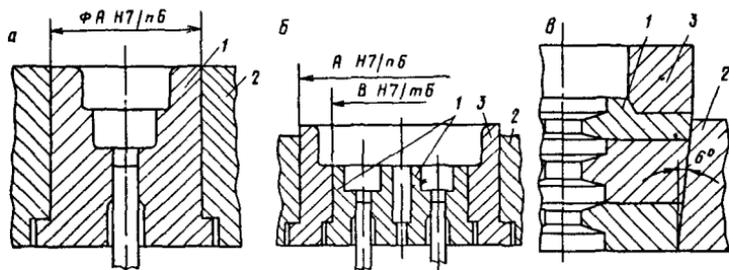


Рис. 2.9. Эскизы составных матриц:

а – конструкция, выполненная в сборе с индивидуальной загрузочной камерой; б – составная конструкция с формирующими вставками (чаще – при прямом прессовании волокнистых пресс-материалов); в – составная «галетного» типа с накладкой загрузочной камерой; 1 – вставная формирующая матрица; 2 – обойма; 3 – загрузочная камера

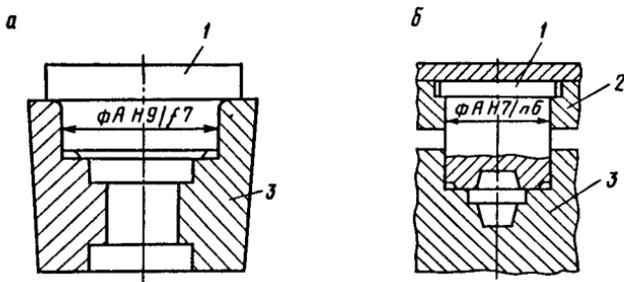


Рис. 2.10. Эскизы пуансонов:

а — цельного; б — составного; 1 — пуансон; 2 — обойма пуансона (пуансонодержатель); 3 — матрица с загрузочной камерой

Поскольку с увеличением площади проекции загрузочных камер в значительной степени увеличивается и необходимое усилие прессования: размеры камер в пресс-формах полузакрытого типа не должны превышать более чем на 10–12 мм размеры формующей полости, а полезная площадь прессования не должна быть меньше 60–65% всей площади загрузочной камеры.

Формующие знаки (рис. 2.11) образуют в прессуемом изделии гладкие отверстия, „окна” — квадратные, шестигранные и т.д. Они могут быть неподвижными и подвижными, в последнем случае — это знаки-выталкиватели (рис. 2.11, з).

Вставки (вкладыши) образуют различные углубления и отверстия асимметричной конфигурации.

Как при неподвижном, так и при подвижном соединениях формующих знаков и вкладышей высота посадочной части отверстия детали, в которой производится установка знаков, должна быть меньше, чем

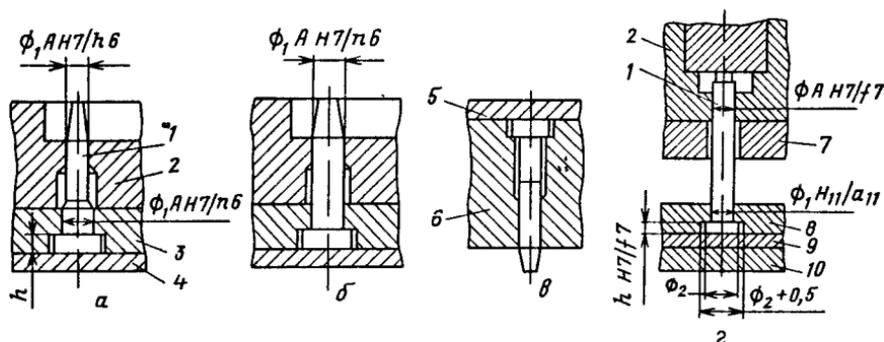


Рис. 2.11. Конструкции формующих знаков:

а — в — неподвижных (а —  $\phi_1 < 4$  мм, б —  $\phi_1 > 4$  мм, в — знак проходит только через одну деталь пресс-формы); з — подвижных; 1 — знак; 2 — матрица; 3 — знакодержатель; 4 — плита нижняя; 5 — плита верхняя; 6 — пуансон; 7 — плита обогрева; 8 — плита выталкивателей; 9 — прокладка; 10 — плита хвостовика

общая высота. В неподвижные соединения это делается с целью облегчения изготовления и доводки после термообработки гладких круглых и фасонных отверстий в матрице и пуансоне. В подвижных соединениях, помимо того, меньшая высота посадочной части необходима для уменьшения площади трения сопрягаемых элементов.

Независимо от конфигурации рабочей части формующего знака, хвостовик или стержень, утолщенная часть или буртик для крепления делается круглой формы, что облегчает их изготовление.

В подвижных формующих знаках диаметр утолщенной части, вставляемой в держатель, должен быть на 0,5–1 мм больше, чем диаметр рабочей части. Посадка в сопряжении знак – держатель в стационарных пресс-формах, имеющих постоянную связь матрицы с формующими знаками, делается подвижной, что компенсирует возможную неточность расположения отверстий в матрице и держателе.

Некоторые затруднения представляет формирование отверстий различных сечений, расположенных перпендикулярно направлению прессования. В съемных пресс-формах выдвижение или вывертывание формующих знаков для такого рода отверстий осуществляется вручную. В стационарных пресс-формах перемещение знаков механизировано (см. разд. 2.7.2).

Резьбовые формующие знаки либо непосредственно оформляют резьбу (внутреннюю или наружную) в изделиях, либо с их помощью запрессовывается в изделия металлическая арматура (знак после извлечения изделия свинчивается). Резьбовые знаки-стержни (для внутренней резьбы) и знаки-кольца (для наружной резьбы) могут быть верхними и нижними. Кольца, как правило, устанавливаются в нижней части пресс-формы (см. рис. 2.12).

При установке в нижней части пресс-формы резьбовые знаки имеют цилиндрический стержень, который входит в соответствующее отверстие в матрице. В зависимости от конструкции пресс-формы эти знаки

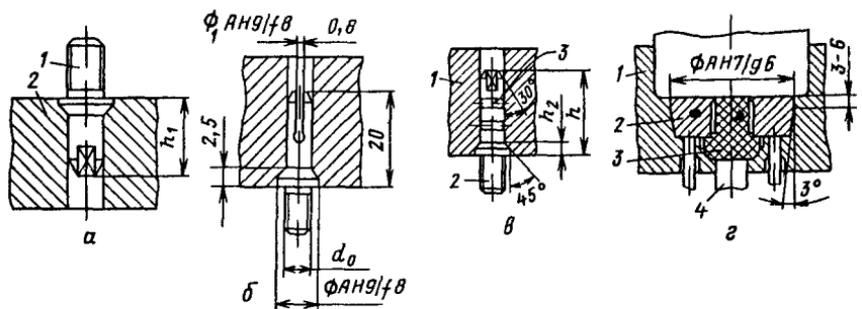


Рис. 2.12. Конструкции резьбовых знаков:

а – стержень, устанавливаемый в нижней части пресс-формы (1 – знак, 2 – матрица); б – стержень, устанавливаемый в верхней части пресс-формы для формирования резьбы до 6 мм; в – то же для формирования резьбы свыше 6 мм (1 – пуансон, 2 – знак, 3 – пружинное кольцо); г – резьбовое кольцо (1 – матрица, 2 – кольцо, 3 – изделие, 4 – выталкиватель)

могут иметь специальный буртик для фиксации и удержания в рабочем положении. Иногда они торцом могут опираться на нижнюю плиту пресс-формы. Верхние резьбовые знаки большей частью делаются с буртиком, удерживающим их в определенном положении относительно плоскости пуансона и перекрывающим отверстие под хвостовик, что предотвращает затекание пресс-материала в посадочное отверстие.

Резьбовые знаки с цанговым креплением, весьма эффективные в эксплуатации, могут быть использованы непосредственно для формирования резьбы или для запрессовки в изделия резьбовой арматуры с диаметром резьбы от 1,7 до 30–36 мм. Несмотря на необходимость дополнительного изготовления цанг, этот тип крепления упрощает производство резьбовых знаков, а также обеспечивает более длительную эксплуатацию пресс-формы.

#### 2.4.2. Оформляющие гнезда и загрузочные камеры (конструктивные типы и расчет)

По конструктивному типу оформляющие гнезда пресс-формы разделяют (рис. 2.13) на открытые (в которых полость – гнездо является одновременно и загрузочной камерой); закрытые, или поршневые (в которых полость – гнездо как бы продолжает загрузочную камеру; в плане их размеры совпадают); полузакрытые, или с перетеканием (у которых имеется специальная отжимная кромка, рант на стыке пуансона и матрицы). Классификация пресс-форм по конструктивному типу оформляющих гнезд приведена в табл. 2.2.

Тип гнезда определяет характер направления облоя на поверхности изделия. Предпочтение следует отдавать вертикально направляемому облою – его легче обрабатывать. Для удаления газов из оформляющего гнезда предусматривают специальные каналы; их образуют, снимая лыски (не менее трех) на боковой поверхности пуансона, если последний представляет собой тело вращения, или за счет разности радиусов закруглений обоймы и пуансона.

Конфигурация и размеры оформляющих полостей зависят от пресуемых изделий, а конфигурация и размеры загрузочных камер в плане – еще и от гнездности пресс-форм.

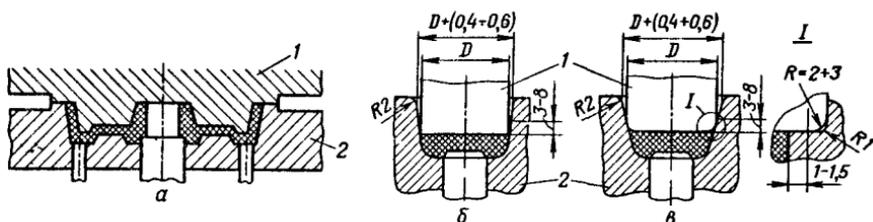


Рис. 2.13. Конструктивные типы оформляющих гнезд пресс-форм:

а – открытые; б – закрытые (поршневые); в – полузакрытые (с перетеканием); 1 – пуансон; 2 – матрица

Объем загрузочной камеры должен быть достаточным для того, чтобы вместить необходимое количество пресс-материала, оставляя свободным пространство высотой 8–10 мм для направления пуансона. Высота загрузочной камеры  $H$  зависит от конструктивного типа оформляющего гнезда; числа формирующих полостей (для полузакрытых пресс-форм с общей загрузочной камерой); плотности пресс-материала и состояния его при загрузке (нетаблетированный, таблетированный); объема формирующей полости, участвующей в размещении пресс-материала (нетаблетированного, таблетированного); коэффициента заполнения камеры (для таблеток).

Расчетные формулы для определения высоты загрузочной камеры  $H$  применительно к схемам, приведенным на рис. 2.14, даны в табл. 2.3.

Объем загрузочной камеры для пресс-форм литьевого прессования можно ориентировочно рассчитывать по формуле варианта  $a$  (табл. 2.3), но принимать  $G$ , равной суммарной массе изделия и литников.

Применяемые при пресс-литье накладные (универсальные) камеры должны обеспечивать плотное смыкание пресс-формы и не допускать вытекания пресс-материала из-под камеры или в местах соединения

Таблица 2.2. Классификация пресс-форм по конструктивному типу оформляющих гнезд

| Тип гнезда пресс-формы  | Характеристика изделий  |
|---|---|
| Открытый (пресс-формы прямого прессования без загрузочной камеры)   | Изделия небольшой толщины, разных размеров, простой конфигурации, невысокой точности  |
| Полузакрытый (пресс-формы прямого прессования с загрузочной камерой и опорной поверхностью между пуансоном и матрицей (наиболее распространенный тип пресс-форм)) | Изделия из порошкообразных и волокнистых пластмасс малой текучести, различной конфигурации, повышенной точности               |
| Полузакрытый обратного типа (пресс-формы прямого прессования, прессующие детали в перевернутом состоянии)   | Изделия полые с небольшой конусностью внутренних поверхностей или с арматурой, устанавливаемой в матрице, повышенной точности |
| Закрытый (пресс-формы прямого прессования с загрузочной камерой, являющейся продолжением формирующей полости)   | Изделия из любых пресс-материалов (в том числе волокнистых) малой текучести, точность изготовления высокая                    |
| Закрытый (пресс-формы прямого прессования со встречными пуансонами)   | Изделия сложной конфигурации из слоистых и волокнистых пресс-материалов малой текучести; точность изготовления высокая        |
| Пресс-форма для прямого прессования и пресс-литья на угловых гидропрессах   | Изделия с поднутрениями по наружной поверхности   |
| Пресс-формы для пресс-литья с загрузочной камерой, расположенной в нижней части пресс-формы   | Изделия с двусторонней арматурой, разностенные и т.д.   |

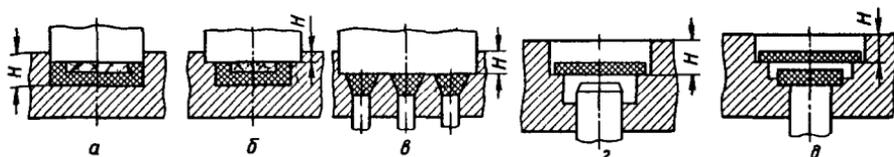


Рис. 2.14. Схемы оформляющих гнезд и загрузочных камер:

а — открытая; б — полузакрытая одногнездная; в — полузакрытая многогнездная; г, д — закрытая; а — в — загрузка пресс-порошком, г и д — таблетками

частей пресс-формы. Для этого площадь проекции загрузочного пространства накладной камеры  $f_{з.к}$  должна быть на 15–20% больше суммарной площади  $f_{\Sigma}$  оформляющих гнезд пресс-формы:

$$f_{з.к} = (1,15 \div 1,20) f_{\Sigma}.$$

Площадь отверстия в накладной камере, через которое материал поступает в полость пресс-формы, рекомендуется принимать равной половине площади загрузочной камеры.

Таблица 2.3. Расчетные формулы для определения высоты загрузочной камеры  $H$

| Вариант оформляющего гнезда (схемы см. на рис. 2.14) | $H$ , мм  | Условные обозначения  |
|--|---|---|
| а  | $[G/(\rho f_{з.к})] + (0,005 + 0,01)$                     | $G$ — масса материала; $\rho$ — плотность пресс-материала; $V$ — объем гнезда ниже плоскости I-I; $n$ — число гнезд; $f_{з.к}$ — площадь сечения загрузочной камеры; $f_{т.з.к}$ — площадь проекции на плоскость разреза пресс-формы таблетки, помещенной в загрузочную камеру; $f_{т}$ — то же, но помещенной в гнездо; $h_{т}$ — высота таблетки, помещенной в гнездо |
| б  | $[G/\rho - V]/f_{з.к} + (0,005 + 0,01)$                   |   |
| в  | $[n(G/\rho - V)]/f_{з.к} + (0,005 + 0,01)$                |   |
| г  | $[G_{т}/(\rho f_{т})] + (0,005 + 0,01)$                   |   |
| д  | $[(G_{т}/\rho) - f_{т.з.к} h_{т}]/f_{т} + (0,005 + 0,01)$ |   |

Высота накладной камеры определяется по приведенным выше формулам для загрузочных камер пресс-формы, но из-за конического дна берется поправка + (10 ÷ 15) мм.

#### 2.4.3. Расчеты оформляющих деталей на прочность и жесткость

Расчеты выполняются лишь для наиболее ответственных деталей пресс-форм, подверженных действию значительного по величине внутреннего давления, которое развивается при прессовании пластмасс в оформляющей полости. В табл. 2.4 приведены типовые объекты таких расчетов (кстати, характерные и для форм литья под давлением

ем), там отмечен характер воспринимаемой нагрузки, возможные рассчитываемые параметры, условные расчетные схемы, изученные в курсе сопротивления материалов.

В самом общем виде методика расчетов состоит из следующих этапов.

1. Выбор расчетных режимов, а именно: наибольшее усилие пресования; темп работы; оптимальные и предельные температуры длительной работы (т.е. все режимы, при которых можно ожидать появления наибольших статических и динамических напряжений в деталях).

2. Выявление распределенных или сосредоточенных нагрузок и мест их действия в пресс-форме.

3. Выбор условных расчетных схем, т.е. представление реальных деталей пресс-формы условными – стержнями, балками, пластинками, оболочками и т.д.

4. Определение действующих напряжений, а именно: в детали или ее отдельном элементе – от каждого вида нагрузок при нормальной рабочей и максимальной (возможной при эксплуатации) температурах; в точках с экстремальными напряжениями.

Таблица 2.4. Типовые объекты расчета оформляющих деталей на прочность и жесткость

| Деталь                 | Нагрузка   | Возможные рассчитываемые параметры  | Условная расчетная схема   |
|------------------------|--|---|--|
| Матрица круглая        | Внутреннее давление  | Тангенциальные и радиальные напряжения на внутренней поверхности (по формуле Гадолина – Лямэ), эквивалентное напряжение (по четвертой теории прочности); допускаемая толщина стенки матрицы | Толстостенный цилиндр, нагруженный равномерно распределенным давлением по внутренней поверхности             |
| Матрица прямо-угольная | Внутреннее давление  | Напряжения изгиба в середине длинной стороны; допускаемая толщина стенки матрицы  | Балка с заделанными концами при действии равномерно распределенной нагрузки                                  |
| Обойма матриц          | Растяжение из-за деформации нагруженных внутренним давлением матриц, которые запрессованы в обоймы | Напряжения (те же, что для матрицы – круглой или прямоугольной соответственно), деформации стенок матрицы, величина натяга в сопряжении   | Скрепленный толстостенный цилиндр, нагруженный равномерно распределенным давлением по внутренней поверхности |

| Деталь  | Нагрузка  | Возможные рассчитываемые параметры   | Условная расчетная схема                           |
|---|---|--|--|
| Плита нагревательная нижняя   | Усилие прессования, действующее через пуансон и прессуемый материал на плиту до смыкания опорных планок           | Напряжения изгиба, прогиб плиты  | Балка, опертая на концах и нагруженная по середине |
| Опорная планка  | Усилие прессования  | Напряжения сжатия по толщине; по площади контакта  |  |
| Выталкиватели   | Усилие выталкивающих гидравлических цилиндров. Усилие обратного хода плиты машины, используемого для выталкивания | Расчетные усилия на выталкиватели, допустимая величина площади поперечного сечения выталкивателя | Консольная балка                                   |
| Крепежные болты   | Усилие обратного хода пресса  | Расчетные усилия на болты, допустимая величина площади поперечного сечения болта                 | Одноосно растянутый стержень                       |
| Крепежные болты (в формах, установленных на горизонтальных машинах) | Поперечная нагрузка, вызывающая смещение полуформ   | Расчет затяжки болтов, минимальное число болтов  | Одноосно растянутый стержень                       |

5. Определение суммарных напряжений (основываясь на применении принципа суперпозиции) и расчетных напряжений  $\sigma_{расч}$  (на основе соответствующей теории прочности).

6. Определение допускаемых напряжений  $[\sigma]$ , для чего необходимо знать температурный интервал работы пресс-формы  $\Delta T$ , а также физико-механические характеристики материала рассчитываемой детали ( $\sigma_e$ ,  $\sigma_{eсж}$ ,  $E$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$  в интервале  $\Delta T$ ). В итоге должно быть для каждой из рассчитываемых деталей:  $\sigma_{расч} \leq [\sigma]$ .

7. Определение термической стойкости (при необходимости, если особо значительны градиенты температур или изделие тонкостенное, с резкими переходами толщин).

8. Определение деформаций, причем в итоге должно быть, чтобы прогибы  $f$  и углы поворота  $\varphi$  обеспечивали условия требуемой жесткости деталей:

$$f \leq [f]; \quad \varphi_{max} = [\varphi].$$

Во многих случаях, например в плитах, определяющим параметром для работоспособности детали и формы в целом являются деформации, возникающие при эксплуатации рассчитываемых объектов.

9. Анализ расчетов, в результате которого устанавливают оптимальные размеры детали пресс-формы.

Практически подобную полную схему расчета деталей пресс-форм в огромном большинстве случаев не реализуют, а выполняют очень упрощенные оценки. Например, в круглой цельной матрице определяют толщину ее стенок по формулам:

$$\delta = 0,5 d \{ [(\sigma_e + 0,4p_0)/(\sigma_e - 1,3p_0)]^{1/2} - 1 \} \text{ или } \delta = 0,5d(p_0/\sigma_e)(h/H).$$

Вторая формула – для весьма ориентировочной оценки. Условные обозначения размеров – см. рис. 2.15;  $p_0$  – давление прессования (см. с. 80),  $\sigma_e$  – допускаемое напряжение на растяжение. Если оценивается толщина обоймы матрицы со сквозным отверстием при  $h = H$ , то  $\delta = 0,5d(p_0/\sigma_e)$ .

Величина допускаемого напряжения  $\sigma_e$  зависит от применяемой стали, а также от величины коэффициента запаса прочности. При четырехкратном запасе прочности, желательном для обойм, матриц, загрузочных камер пресс-форм, величина допускаемого напряжения для легированной стали может достигать 200 МПа.

В практике конструирования пресс-форм встречаются случаи, когда внутренний и наружный диаметры обойм загрузочных камер и матриц определяются конструктивно. Это вызывает необходимость проверки указанных деталей на прочность, что можно сделать по формуле

$$p_0(R^2 + r^2)/(R^2 - r^2) \leq \sigma_e,$$

где  $R$  – радиус наружного контура обоймы;  $r$  – внутренний радиус обоймы.

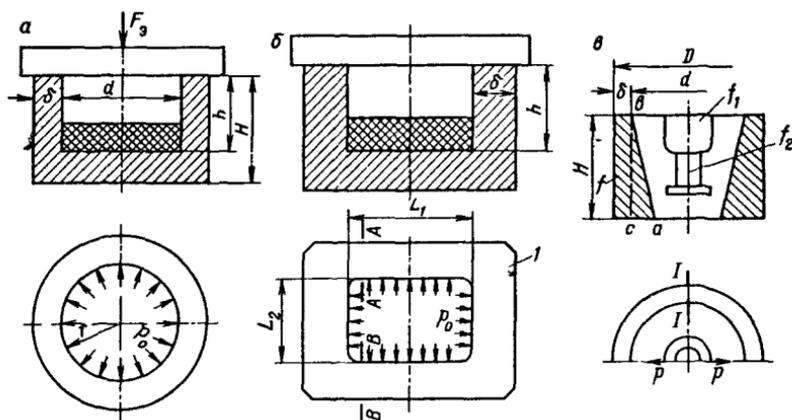


Рис. 2.15. Схемы действия сил на стенки матрицы (к расчету на прочность):

а – круглая матрица, б – прямоугольная, в – клиновидная

Один из характерных конструктивных вариантов – две жесткие полуматрицы, вставленные в круглую клиновую обойму (рис. 2.15, в). Здесь проверяется на прочность конструкция по сечению  $I-I$ , совпадающему с плоскостью разреза клиньев. Благодаря большой жесткости полуматриц давление, действующее на них, передается как распределенная нагрузка  $p_0$  на площадь внутренней поверхности полости. Усилие  $F$ , разрывающее обойму, равно  $F = 0,5 p_0 \Sigma f_i$ , где  $\Sigma f_i = f_1 + f_2$ .

Расчетную площадь сечения обоймы  $f$  можно принять равной  $f = H(D - d)/2 = H\delta$  (уменьшение площади на площадь треугольника  $abc$  приближает расчет к реальным условиям, так как в верхней, наиболее тонкой части обоймы значение  $F$  наибольшее). Тогда условие прочности, выраженное через толщину стенки обоймы, будет иметь вид:

$$\delta = p_0 \Sigma f_i / (H\sigma_e).$$

Стенки матриц или обойм прямоугольной формы проверяются в опасных сечениях  $A - A$  или  $B - B$  (см. рис. 2.15, б) по формуле

$$0,5F_2/f + M/W \leq \sigma_e,$$

где  $F_2$  – растягивающее усилие в стенках  $I$ ;  $f$  – площадь сечения стенки  $I$ ;  $M$  – изгибающий момент;  $W$  – момент сопротивления сечения стенки.

Растягивающее усилие  $F_2$  определяется по формуле  $F_2 = p_0 h L_2$  (размеры – см. рис. 2.15, б).

Площадь сечения стенки подсчитывают по формуле  $f = H\delta$ , где  $H$  – высота стенки матрицы или обоймы.

Изгибающий момент  $M$  определяют по формуле  $M = F_1 L_1 / 12$ , где  $F_1 = p_0 L_1 h$  – поперечное усилие от давления  $p_0$ , действующее на стенку  $I$ .

Момент сопротивления  $W$  сечения стенки вычисляется по формуле  $W = H\delta^3 / 6$ .

Приведенный расчет прямоугольных матриц и обойм является упрощенным, поскольку такая конструкция фактически представляет собой статически неопределенную систему.

#### 2.4.4. Расчет исполнительных размеров оформляющих деталей

Все элементы оформляющих деталей, которые соприкасаются с расплавом и участвуют непосредственно в формовании (прессовании) соответствующих им элементов пластмассового изделия, должны быть исполнены так, чтобы заданные параметры качества, точность размеров изделия (во всей программе выпуска) были безусловно обеспечены, несмотря на усадку и колебание усадки материала (проявляющиеся при формовании изделия), неточность изготовления и износ деталей формы во время ее эксплуатации. Поэтому при проектировании всех оформляющих деталей, в период разработки их рабочих чертежей, рассчитывают такие исполнительные размеры, компенсируя в их величинах возможные (перечисленные выше) колебания и изменения.

Установленные в результате расчета исполнительные размеры элементов оформляющих деталей становятся по существу новыми номинальными размерами. Именно эти размеры (со своими допусками – по выбранным квалитетам) указывают на чертежах.

Между номинальным размером изделия  $N_{и}$  и исполнительным размером оформляющей детали  $N_{ф}$ , равно как и между их допусками соответственно  $T_{и}$  и  $T_{ф}$ , существует, естественно, тесная связь. Покажем ее на простейшем примере, когда поля допусков размеров расположены симметрично по отношению к размерам, а именно:  $N_{и} \pm T_{и}$  и  $N_{ф} \pm T_{ф}$ . При таких условиях наибольший размер изделия  $N_{и} + T_{и}$  может получаться, если размер оформляющей детали будет максимальным  $N_{ф} + T_{ф}$ , а усадка перерабатываемого материала – минимальной  $S_{\min}$ . С другой стороны, размер детали  $N_{и} - T_{и}$  может быть получен в том случае, если формуемый материал имеет максимальную усадку  $S_{\max}$ , а оформляемая деталь выполнена по размеру  $N_{ф} - T_{ф}$ . Итак, получаем систему:

$$\begin{aligned}(N_{ф} + T_{ф}) - (N_{ф} + T_{ф})S_{\min} &= N_{и} + T_{и}; \\ (N_{ф} - T_{ф}) - (N_{ф} - T_{ф})S_{\max} &= N_{и} - T_{и}.\end{aligned}$$

Исходя из того, что  $T_{ф}S_{\min}$  и  $T_{ф}S_{\max}$  пренебрежимо малы по сравнению с  $N_{ф}S_{\min}$  и  $N_{ф}S_{\max}$ , система упрощается:

$$\begin{aligned}N_{ф} + T_{ф} - N_{ф}S_{\min} &= N_{и} + T_{и}; \\ N_{ф} - T_{ф} - N_{ф}S_{\max} &= N_{и} - T_{и}.\end{aligned}$$

Суммируя и вводя среднюю усадку, получаем уравнение, связывающее размеры оформляющей детали и изделия со средней усадкой  $\bar{S}$ :

$$N_{ф}(1 - \bar{S}) = N_{и}.$$

Если решить приведенную систему относительно допусков, то получается соотношение:

$$\begin{aligned}T_{ф} &= T_{и} - N_{ф}(S_{\max} - S_{\min})/2 = T_{и} - N_{ф}\Delta S/2; \\ T_{и} &= T_{ф} + N_{ф}\Delta S/2; \quad \Delta S = S_{\max} - S_{\min}.\end{aligned}$$

При предельных расположениях допусков, когда они направлены „в тело” деталей (для пуансона, „вала”, – в минус; для матрицы, „отверстия”, – в плюс; соответственно для „отверстия” в изделии, оформляемого пуансоном, – в плюс; для пластмассового „вала”, формуемого в матрице, – в минус) получаем:  $T_{и} = T_{ф} + N_{ф}\Delta S$ . Соотношения между  $N_{ф}$  и  $N_{и}$  в этих случаях, естественно, более громоздкие, чем при симметричном варианте.

Допуски на размеры пластмассовых изделий конструктором могут быть поставлены по-разному, в зависимости от реальных требований эксплуатации изделия, его назначения. Однако для облегчения расчетов исполнительных размеров оформляющих деталей важно „преобразовать” допуски (изменив их за счет изменения номинального размера изделия) так, чтобы они были расположены предельно в „тело”.

Рассмотрим примеры. Пластмассовое изделие – вал (т.е. охватываемый в пресс-форме элемент) имеет размер  $[A]^{+0,20}_{+0,05}$  мм. "Преобразование" заключается в том, чтобы размер и величину допуска изменить:  $[A + 0,2]^{+0,20}_{-0,15}$  мм; при этом предельные размеры вала остаются такими же, какими они первоначально были заданы. Пластмассовое изделие – отверстие (т.е. охватываемый в пресс-форме элемент) имеет размер  $[A]^{+0,05}_{+0,20}$  мм. Здесь "преобразование" может быть выполнено следующим образом:  $[A + 0,05]^{+0,15}_{+0,20}$  мм. Допуски межосевых размеров, представляемые симметрично, не "преобразовываются".

Приступая к расчету исполнительных размеров оформляющих деталей, уточним дополнительно обозначения:  $T_{\text{изн.ф}}$  – допуск на износ элементов оформляющих деталей; индексы  $\text{min}$ ,  $\text{max}$ ,  $g$  – представленные у соответствующих величин, указывают на максимальное, минимальное и действительное значения этих величин; индексы  $m$ ,  $p$  относятся к матрице (отверстию) и пуансону (валу); индексы  $v$ ,  $o$  относятся к пластмассовому валу и отверстию в пластмассовом изделии; черта над величиной означает ее среднее значение. Напомним также, что  $T_{\text{ф}}$  и  $T_{\text{и}}$  назначаются конструкторами формирующего инструмента и пластмассового изделия по квалитетам, причем помимо приведенного выше соотношения допусков можно пользоваться данными табл. 2.5, отражающей опыт промышленности; числовые значения – в стандартах и справочниках. За отправную точку расчета может быть принят любой из размеров элемента изделия: наибольший, наименьший, средний.

На рис. 2.16 показано преимущество расчета, ориентированного на средний размер элемента изделия. Такой расчет наиболее полно отвечает требованиям массового, крупносерийного производства, задавая выпуск прецизионных изделий, так как средний размер – фактически это выборочное среднее  $\bar{X}$  распределения размеров (в

Таблица 2.5. Выбор квалитетов размеров оформляющих деталей

| Квалитет размеров изделий из пластмасс    | Поля допусков по квалитетам размеров гладких элементов оформляющих деталей |          |   |
|---|--|----------|---|
|   | пуансона   | матрицы  | межосевых расстояний между формирующими знаками |
| IT10                                      | h6–h8  | H6–H8    | $\pm 0,5$ (IT6–IT8)                             |
| IT11                                      | h7–h9  | H7–H9    | $\pm 1/2$ (IT7–IT9)                             |
| IT12                                      | h8–h10   | H8–H10   | $\pm$ (IT8–IT10)                                |
| IT13                                      | h9–h11   | H9–H11   | $\pm$ (IT9–IT11)                                |
| IT14→IT17                                 | h10–h12  | H10–H12  | $\pm$ (IT10–IT12)                               |
| Степень точности среднего диаметра резьбы | Поля допусков по квалитетам размеров резьбоформирующих деталей             |          |   |
|   | кольцо   | стержень |   |
| 6 – 7                                     | H7   | H6       |   |
| 8 – 10                                    | H9   | H9       |   |

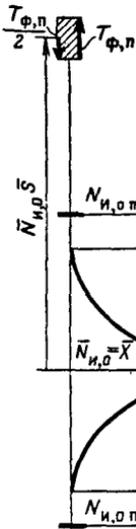


Рис. 2.16. Схема к расчету исполнительного размера оформляющей детали (пуансона или вала)

пределе – математическое ожидание вероятного размера с доверительными границами  $\pm 3\sigma$  в пределах заданного поля допуска). Надежность такой схемы расчета обеспечивается еще и тем, что большинство партий материалов выпускается с показателями коэффициентов усадки, близкими к  $\bar{S}$ .

По мере износа форм при прессовании происходит некоторое изменение положения среднего размера  $\bar{X}$ , что приводит к незначительному смещению поля рассеивания размеров. Принято целесообразным, чтобы  $T_{изн.ф} = T_{Ф}/2$ , поскольку основные формирующие элементы деталей (матрицы, пуансоны, знаки) окончательно обрабатывают по методу

”пробных проходов”, доводкой на высокоточных станках или вручную, когда после допуска  $T_{Ф}$  полностью не используется, а обработка прекращается, лишь только размер элемента попадает в заданное поле допуска, но вблизи соответствующих предельных размеров (наибольшего – для пуансона, или ”вала”; наименьшего – для матрицы, или ”отверстия”); следовательно, резервы поля  $T_{Ф}$  могут быть использованы для компенсации износа.

Итак, можем записать основные расчетные формулы для определения исполнительных размеров гладких элементов оформляющих деталей (в пластмассовых изделиях размеры, не зависящие от облоя, т.е. оформляемые только пуансоном или только в матрице, одной деталью пресс-формы):

$$N_{Ф, м} = (\bar{N}_{и, в} + \bar{N}_{и, в} \bar{S} - T_{Ф, м}/2) \cdot T_{Ф, м};$$

$$N_{Ф, п} = (\bar{N}_{и, о} + \bar{N}_{и, о} \bar{S} + T_{Ф, п}/2) \cdot T_{Ф, п}.$$

Используем известные соотношения для предельного назначения допусков на размеры изделий:

$$\bar{N}_{и, в} = N_{и, в} - T_{и, в}/2; \bar{N}_{и, о} = N_{и, о} + T_{и, о}/2;$$

$$\bar{S} = S_{max} - \Delta S/2 = S_{min} + \Delta S/2.$$

В табл. 2.6 приведены значения значений усадочных параметров для распространенных пресс-материалов. Основные расчетные формулы могут быть преобразованы так, чтобы их слагаемыми были номинальные размеры пластмассовых изделий и в них входили предельные значения коэффициентов усадки материала. Из этих формул получаем:

$$N_{Ф, м min} = N_{Ф, м}; N_{Ф, м max} = N_{Ф, м} + T_{Ф, м};$$

$$N_{Ф, п max} = N_{Ф, п}; N_{Ф, п min} = N_{Ф, п} - T_{Ф, п}.$$

Таблица 2.6. Усадка и колебание усадки некоторых распространенных пресс-материалов

| Колебания усадки $\Delta S$ , % | Марка материала  | Предельные значения $S_{\min}-S_{\max}$ , %                      | Колебания усадки $\Delta S$ , % | Марка материала   | Предельные значения $S_{\min}-S_{\max}$ , % |
|---------------------------------|--|--|---------------------------------|---|---|
| Св. 0,1 до 0,16                 | Стеклонаполненный фенопласт марок АГ-4В, АГ-4С<br>Аминопласт МФД-1   | 0,15—0,25<br>0,7—0,8   | Св. 0,40—0,60                   | Фенопласты марок 02-010-02, 03-010-02, 04-010-12                      | 0,4—0,8                                     |
| Св. 0,16 до 0,25                | Фенопласты марок У5-301-41<br>Э6-014-30<br>Э5-101-30<br>08-010-72<br>028-210-02<br>Стеклонаполненный фенопласт ДСВ-2Р-2М | 0,1—0,3<br>0,2—0,4<br>0,3—0,5<br>0,5—0,7<br>0,5—0,7<br>0,10—0,30 |                                 | СП 1-342-02,<br>СП 2-342-02,<br>СП 3-342-02<br>Э1-340-02<br>Э2-300-02 | 0,4—0,8<br>0,4—0,8                          |
| Св. 0,25 до 0,40                | Фенопласты марок У1-301-07,<br>Ж2-010-60<br>Э3-340-65,<br>Э3-340-61,<br>Э4-100-30<br>Э11-342-63                          | 0,2—0,5<br>0,4—0,7<br>0,4—0,7                                    |                                 | Э8-361-63<br>Э9-342-73<br>Вх1-090-34,<br>Вх6-342-70                   | 0,4—0,8                                     |
| Св. 0,4 до 0,60                 | Фенопласты марок У2-301-07<br>Вх3-090-14,<br>Вх5-010-73,<br>У4-080-02<br>Аминопласты марок КФА-1, КФА-2<br>МФВ-1, МФВ-2  | 0,2—0,6<br>0,3—0,7<br>0,5—0,8<br>0,6—1,0                         | Св. 0,60 до 1,00                | Ж1-010-40,<br>Ж3-010-62,<br>Ж6-010-60<br>Вх4-080-34                   | 0,2-0,7<br>0,3—0,9                          |

Размеры предельно изношенных матриц и пуансонов оказываются равными

$$N_{\phi, \text{ м изн}} = N_{\phi, \text{ м max}} + T_{\phi, \text{ м}}/2 = N_{\phi, \text{ м}} + 3/2T_{\phi, \text{ м}};$$

$$N_{\phi, \text{ п изн}} = N_{\phi, \text{ п min}} - T_{\phi, \text{ п}}/2 = N_{\phi, \text{ п}} - 3/2T_{\phi, \text{ п}}.$$

Чтобы изготовление пластмассовых изделий осуществлялось без серьезного брака, должны соблюдаться следующие неравенства, решение которых является проверкой правильности расчета исполнительных размеров форм:

для пластмассового изделия-вала в новой матрице

$$N_{\phi, \text{ м min}} - N_{\text{и, в}} S_{\text{max}} > N_{\text{и, в min}};$$

$$N_{\phi, \text{ м max}} - N_{\text{и, в}} S_{\text{min}} < N_{\text{и, в max}};$$

для пластмассового изделия-вала в изношенной матрице

$$N_{\phi, м \min} - N_{и, в S_{\max}} > N_{и, в \min};$$

$$N_{\phi, м \text{ изн}} - N_{и, в S_{\min}} \leq N_{и, в \max};$$

для пластмассового изделия-отверстия при новом пуансоне

$$N_{\phi, п \min} - N_{и, о S_{\max}} > N_{и, о \min};$$

$$N_{\phi, п \max} - N_{и, о S_{\min}} < N_{и, о \max};$$

для пластмассового изделия-отверстия при изношенном пуансоне

$$N_{\phi, п \text{ изн}} - N_{и, о S_{\max}} \geq N_{и, о \min};$$

$$N_{\phi, м \max} - N_{и, о S_{\min}} < N_{и, о \max}.$$

Расчет исполнительных размеров форм даже для простых изделий оказывается достаточно трудоемким и сложным. Поэтому необходимо заранее определять реальность заданных условий, т.е. возможность изготовления пластмассового изделия определенной точности из заданного материала в форме данной конструкции.

Если влияние усадки на изменение размеров изделий (допуск на усадку) выразить величиной  $T_S$  (см. табл. 2.6), а влияние неточности изготовления и износа оформляющих деталей – величиной  $k = f(T_{\phi})$ , то в общем случае заданный допуск размера  $T_{и}$  будет выполнен при соблюдении неравенства вида

$$k \leq T_{и}/T_S; T_S = N_{и} \Delta S.$$

Приведенное неравенство превращается в равенство при некотором наименьшем значении  $T_{и \min}$ ; коэффициент  $k$  получает также наименьшее значение в зависимости от качеств, так как допуск размеров на усадку  $T_S$  при заданных номинальных значениях размеров в материале изделия не изменяется. Следовательно,  $k_{\min} = T_{и \min}/T_S$ .

Наименьшее предельное значение  $T_{и \min}$  определяется из условий, описываемых уравнениями

$$N_{\phi, м \text{ изн}} - N_{и, в S_{\min}} = N_{и, в \max};$$

$$N_{\phi, п \text{ изн}} - N_{и, о S_{\max}} = N_{и, о \max}.$$

После преобразований, учитывая предельное расположение полей допусков, это приводит к следующей простой формуле:

$$T_{и \min} \approx T_S + 2T_{\phi}.$$

При заданных условиях (допуск размера, колебание усадки материала, допуск на изготовление размера форм) неравенство дает определенное решение:  $k^{\partial} = T_{и}^{\partial}/T_S^{\partial}$ .

Таким образом, при конструировании форм, сравнивая значение  $k^{\partial}$  с величиной  $k_{\min}$ , подсчитанной для различных исходных данных, можно убедиться в нереальности ( $k^{\partial} < k_{\min}$ ) или реальности ( $k^{\partial} \geq k_{\min}$ ) задания, и только в последнем случае можно производить расчет

исполнительных размеров форм. При  $k^d > k_{\min}$  заданное поле допуска размера пластмассового изделия используется частично, возникает определенный "запас точности" на изготовление изделия:  $\gamma = k^d - k_{\min}$ .

Величина  $\gamma$  оказывается минимальной, т.е. поле допуска размера используется наиболее полно, при назначении величин допусков по квалитетам (см. гл. 1).

Достоинством предложенной методики расчета исполнительных размеров форм является обеспечение необходимого взаимного расположения полей рассеивания сопрягаемых изделий (вала и отверстия), изготавливаемых в двух (или более) разных формах.

Методика расчета исполнительных размеров оформляющих деталей, как ясно из изложенного, без изменения пригодна не только при проектировании пресс-форм, но и форм для литья под давлением, других типов формующих инструментов — естественно, с учетом специфики в назначении величин  $T_{из}$ ,  $T_{ф}$ ,  $T_{изн. ф}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\Delta S$ .

Основные расчетные формулы для определения  $N_{ф, м}$  и  $N_{ф, п}$  для тех размеров пластмассовых изделий, которые формируются двумя деталями пресс-формы, которые пересекают плоскость разреза ее, т.е. зависят от толщины облоя, должны быть уточнены, поскольку надо вводить в расчет компенсацию этой погрешности: в обеих формулах в скобках добавляется одно слагаемое  $q$  со знаком минус — и для матрицы, и для пуансона. Ориентировочно  $q = 0,10$  для порошкообразного фенопласта с древесным наполнителем;  $q = 0,20$  — то же, но с минеральным наполнителем;  $q = 0,30$  — с мелковолокнистым наполнителем.

Основные расчетные формулы для определения межосевых расстояний приобретают вид:

$$N_{ф, м} = (\bar{N}_{и, в} + \bar{N}_{и, в} \bar{S}) + (T_{ф, м}/2);$$

$$N_{ф, п} = (\bar{N}_{и, о} + \bar{N}_{и, о} \bar{S}) \pm (T_{ф, м}/2).$$

Если требуется обеспечить высокую точность межосевых расстояний, то необходимо учитывать, неподвижным или подвижным знаками формируются отверстия, так как в последнем случае появляются дополнительные погрешности, детальная компенсация которых достаточно сложна. В зависимости от конфигурации и расположения изделия и полости пресс-формы на отдельные элементы изделия не будут влиять износ, колебание облоя; поэтому важно аналитически, а не формально применять расчетные формулы. В отличие от рассмотренного, в стандартном методе (ГОСТ 15947-70) расчета исполнительных размеров оформляющих деталей за базу принимаются предельные размеры изделия и экстремальные значения усадки, а износ компенсируют величиной, равной  $T_{и}$ .

Основные расчетные формулы стандартного метода имеют вид:

$$N_{ф, м} = (N_{и, в \max} + N_{и, в \max} S_{\max} - T_{и, в}) \pm T_{ф, м};$$

$$N_{ф, п} = (N_{и, о \min} + N_{и, о \min} S_{\min} + T_{и, о}) - T_{ф, п} \cdot \sqrt{\quad}$$

Расчетная формула, учитывающая компенсацию облоя  $q$ , имеет вид:

$$N_{\phi} = [N_{и \max} + N_{и \max} \bar{S} - q - (T_{и} + T_{\phi}/2)] \cdot T_{\phi},$$

а для расчета межосевого расстояния

$$N_{\phi} = (N_{и} + N_{\phi} \bar{S}) \pm (T_{\phi}/2).$$

Различия в результатах расчета по разным методикам могут быть заметными. Базирование на предельные размеры изделия приводит к тому, что износ оформляющих деталей не выводит размеров изделий за границы заданных допусков, но само распределение размеров неравномерно смещено по полю допуска к этим предельным границам, что в целом является менее благоприятным, чем при базе – среднем размере.

Результаты расчета исполнительных размеров оформляющих деталей в любом случае необходимо округлять (охватывающие – в сторону увеличения, охватываемые, межосевые, высотные – уменьшения) с кратностью, зависящей от качества и величины номинального размера детали.

Расчет исполнительных размеров резьбообразующих деталей проводят по стандартной методике (ГОСТ 15948–70). Она позволяет корректировать шаг резьбы на величину средней усадки  $\bar{S}$ , а размеры диаметров резьбы определять с учетом максимальной (для резьбовых колец) и минимальной (для резьбовых стержней) усадок перераба-

Таблица 2.7. Формулы для расчета исполнительных размеров резьбоформирующих деталей

| Резьбоформирующие детали | Расчетные формулы   | Пластмассовое резьбовое изделие |
|--------------------------|---|---------------------------------|
| Кольца (рис. 2.17, а)    | $D_k = d + d \cdot 0,01S_{\max} - T_d - es$<br>$D_{2k} = d_2 + d_2 \cdot 0,01S_{\max} - T_{d_2} - es$<br>$D_{1k} = d_1 + d_1 \cdot 0,01S_{\max} - T_{d_1} - es - 0,144p$<br>$p_k = p(1 + 0,01\bar{S})$          | Болт (рис. 2.17, б)             |
| Стержни (рис. 2.17, в)   | $d_{ст} = D + D \cdot 0,01S_{\min} + T_{D_2} + EI$<br>$d_{2ст} = D_2 + D_2 \cdot 0,01S_{\min} + T_{D_2} + EI$<br>$d_{1ст} = D_1 + D_1 \cdot 0,01S_{\min} + T_{D_1} + EI$<br>$p_{ст} = p_k = p(1 + 0,01\bar{S})$ | Гайка (рис. 2.17, г)            |

Примечание. Обозначения в формулах:  $d, d_2, d_1$  – соответственно наружный, средний и внутренний номинальные диаметры резьбы болта;  $D, D_2, D_1$  – соответственно наружный, средний и внутренний номинальные диаметры резьбы гайки;  $p$  – шаг резьбы;  $T_d, T_{d_2}$  – допуски наружного и среднего диаметров резьбы болта;  $T_{D_2}, T_{D_1}$  – допуски среднего и внутреннего диаметров резьбы гайки;  $es$  – верхнее отклонение диаметров резьбы болта;  $EI$  – нижнее отклонение диаметров резьбы гайки.

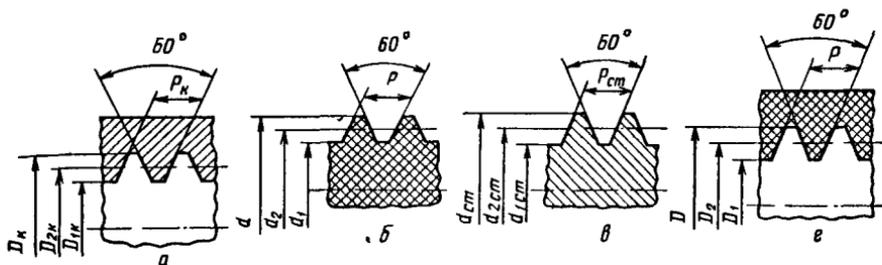


Рис. 2.17.К табл. 2.7

тываемых пластмасс (пресс-материалов – в пресс-формах, термопластов – в формах для литья под давлением).

В табл. 2.7 приведены необходимые схемы, расчетные формулы и условные обозначения. Результаты расчетов, как и для гладких размеров, необходимо округлять до 0,01 мм: диаметры резьбы кольца – в сторону увеличения, а стержня – уменьшения; шаг резьбы резьбообразующих деталей – также до 0,01 мм. Качества размеров резьбообразующих деталей – в зависимости от степеней точности среднего диаметра резьбы изделий – см. табл. 2.5; числовые значения допусков – в стандартах и справочниках.

## 2.5. Литниковые системы пресс-форм литьевого прессования. Конструктивные особенности и расчет

Литниковые системы состоят из нескольких деталей, при соединении которых образуются каналы для течения расплава реактопласта из загрузочной камеры в формующую полость.

Конфигурация и размеры литниковых каналов должны быть такими, чтобы скорость течения пресс-массы была достаточной для быстрого и полного заполнения оформляющей полости пресс-формы, а давление пресс-массы, передаваемое через литниковую систему в оформляющую полость, было достаточным для уплотнения пресс-массы изделия на стадии выдержки под давлением. Важно при выборе системы литниковых каналов для пресс-литья реактопластов учитывать технологические свойства материала, его текучесть и ориентацию наполнителя при впрыске, что оказывает существенное влияние на прочность и точность изделий; эта ориентация происходит поперек направления течения и может стать причиной коробления изделия.

Учет физических особенностей расплава перерабатываемых пресс-литием терморепрессивных пластмасс позволяет сформулировать два основных требования к литниковым системам: они должны иметь минимальную протяженность и минимально допускаемое сечение каналов. Наиболее эффективна прямоугольная форма каналов. На

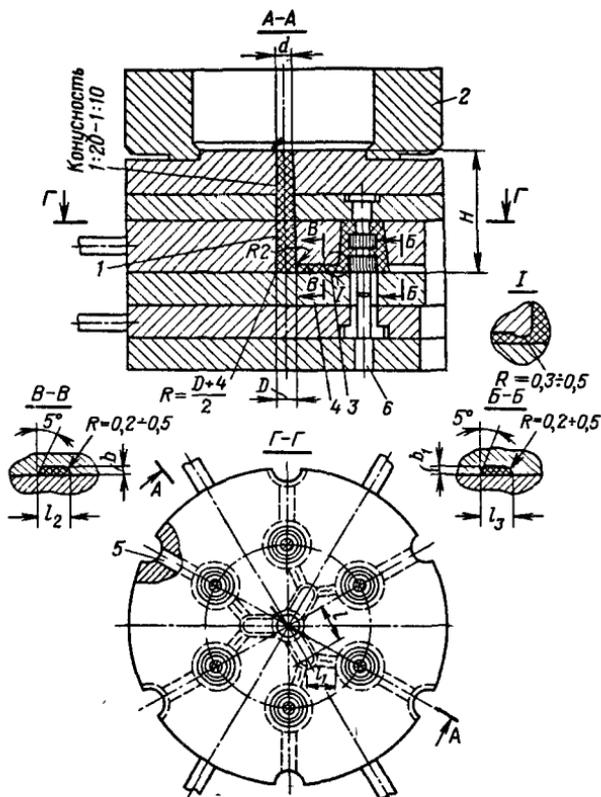


Рис. 2.18. Литниковая система многогнездной пресс-формы:

1 — основной литник; 2 — загрузочная камера; 3 — впускной литник; 4 — разводящий литник; 5 — вентиляционный канал; 6 — выталкиватель

рис. 2.18 приведен один из вариантов конструкции литниковой системы (там же указаны основные элементы системы).

Для расчета поперечного сечения впускного литника можно воспользоваться формулой

$$f_{в,л} = k V_{и} / n_{л},$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от типа наполнителя пресс-материала (для порошков — 0,6; для волокнита — 1);  $V_{и}$  — объем прессуемого изделия (без объема арматуры и полостей);  $n_{л}$  — число впускных литников, питающих формующую полость.

Площадь наименьшего поперечного сечения основного или разводящего каналов должна быть больше или равна площади поперечного сечения впускного канала (или суммы площадей поперечных сечений впускных каналов в многогнездных пресс-формах). Впускные литники следует подводить к наиболее утолщенным элементам формируемого изделия, избегая лобового удара потока пресс-массы в знаки или

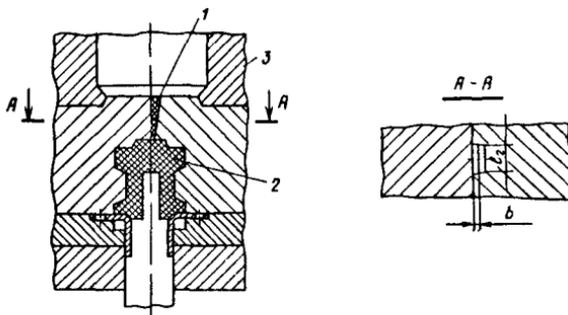


Рис. 2.19. Литниковая система одnogнездной пресс-формы с вертикальной плоскостью разреза:

1 — основной литник; 2 — изделие; 3 — накладная загрузочная камера

арматуру, расположенные вблизи места впуска. Длина литниковых каналов по возможности должна быть минимальной. Длину впускного канала  $l_1$  (см. рис. 2.18) обычно принимают не более 8 мм.

Учитывая возможность преждевременного отверждения пресс-массы, расстояние от нижней плоскости загрузочной камеры до оформляющего гнезда, например расстояние  $(H + l + l_1)$ , не должно превышать 60–80 мм. Диаметр отверстия основного канала  $d$  определяется после установления площади сечения впускных каналов.

При наличии в формующем гнезде большого количества знаков или арматуры, затрудняющих течение пресс-массы, рассчитанную ранее площадь поперечного сечения впускного канала следует увеличить.

В пресс-формах с вертикальной плоскостью разреза разводящие и впускные каналы, как правило, отсутствуют, а формующая полость заполняется только через основной канал (см. рис. 2.19).

Однако оптимальные размеры литниковой системы, обеспечивающие высокое качество прессуемых деталей, возможно устанавливать лишь на основании учета реологических свойств пластмасс. Предварительно необходимо установить или выбрать реологические характеристики реактопластов, кривые течения.

На рис. 2.20 приведены результаты таких исследований. При этом пресс-материалы с длинными волокнистыми наполнителями (такие, как АГ-4, ДСВ-2Р-2М) имеют большую вязкость  $\mu$  и большой показатель степени (соответствующие кривые располагаются в верхней части графика и под большим углом). Полученный обобщенный реологический график можно положить в основу расчета литниковых каналов пресс-форм. Обычно используют для расчетов уравнение степенного закона в виде  $\dot{\gamma} = m t^n$ . Найденные экспериментально методом двух капилляров значения  $m$  равны: для фенопластов с порошкообразным органическим наполнителем 20–22; для фенопластов с минеральным наполнителем 16–18; для пресс-материалов волокнистых 24–26. Когда на входе данного участка литниковой системы сечение или направле-

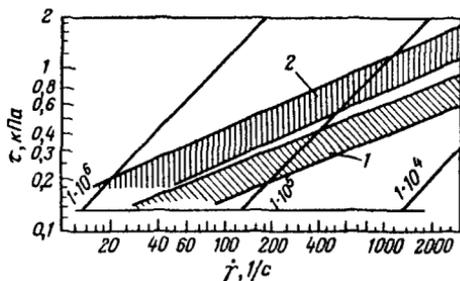


Рис. 2.20. Обобщенный реологический график кривых течения при пресс-литье порошкообразных (1) и волокнистых (2) пресс-материалов ( $\tau$  — напряжение сдвига,  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига); числа у кривых — значения вязкости в Па·с

ние скорости резко не меняется, величину  $m$  можно принять равной нулю.

Для расчета сложную литниковую систему разбивают на участки постоянной геометрической конфигурации, например цилиндрический, конический, щелевой и т.д., а затем находят объемный секундный расход расплава для каждого участка. Зная скорость движения поршня пресса в момент прессования и радиус литьевого потока  $R_{\text{лп}}$ , объемный секундный расход можно рассчитывать по уравнению

$$Q = \nu R_{\text{лп}}^2 / n,$$

где  $\nu$  — скорость движения подвижной плиты пресса в момент прессования;  $n$  — число литников данной постоянной геометрической конфигурации.

По величине  $Q$  находят градиенты скоростей сдвига по участкам (подробнее — см. реологический расчет литниковых систем форм для литья под давлением в гл. 3).

В тех случаях, когда общее расчетное давление больше допустимого (90–100 МПа), производят пересчет длины литникового канала, задавшись определенным давлением или перепадом давления на отдельных участках литниковой системы.

Реологический расчет литниковых систем основывается на ряде существенных допущений. Основное из них — отсутствие пристенного скольжения. Однако из практики известно, что скорости пристенного скольжения при переработке реактопластов достаточно велики. Расход материала через канал определяется с точностью до 5–6% только скоростью пристенного скольжения (объемное течение по существу отсутствует). Таким образом, расчетные формулы (см. гл. 3) дают для литниковых систем пресс-форм только приближенные результаты. В то же время использование их в расчете литниковых систем при литье под давлением термопластов или в гидродинамических расчетах экструзионного формующего оборудования позволяет получить достаточно точные результаты.

Обычно расчет литниковой системы заканчивают определением размеров (площади поперечного сечения  $f_{\text{в. кан}}$ ) вентиляционных

каналов для удаления воздуха из полости формы:

$$f_{в. кан} = 0,05 V_{и}/n_{в. кан}$$

где  $n_{в. кан}$  – конструктивно определяемое число вентиляционных каналов для данной формующей полости.

## 2.6. Система обогрева пресс-форм

### 2.6.1. Назначение, классификация, основные конструктивные особенности

Назначение системы обогрева пресс-форм – создание максимально возможного равномерного температурного поля во всем объеме прессуемого изделия, обеспечение условий для минимально возможной затраты времени на окончательный нагрев и отверждение термореактивного материала в формующей полости, циклическое малоинерционное воспроизведение рациональных температурных условий прессования изделий.

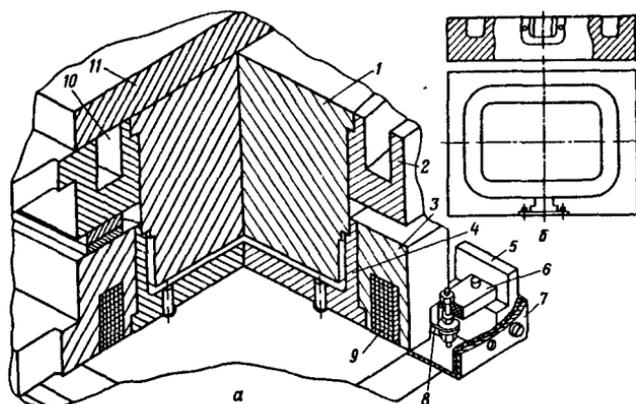
Система обогрева обеспечивает передачу тепла в рабочую зону прессования от внешних источников.

Классификация систем обогрева по характеру источников тепла – паровая, газовая, водяная (горячая вода), электрическая.

Паровой обогрев сейчас очень редко употребляется, но он обеспечивает хорошее равномерное температурное поле в плитах обогрева, в каналы которых под давлением подается насыщенный пар. Газовый обогрев (горелки либо в каналах плит, либо снаружи пресс-формы) уже архаичен. Обогрев горячей водой, протекающей в каналах плит и в матрицах, применяют при прессовании термопластов. В пресс-формах для реактопластов сейчас применяют только системы электрического обогрева.

Классификация систем электрического обогрева: по типу источников – электронагревательные элементы сопротивления, индукторы; по характеру установки источников – снаружи пресс-формы (в виде специальных нагревательных кожухов с электрической спиралью, концы которой подключают к штепсельной колодке; в основном – в съемных пресс-формах), внутри пресс-формы (в плитах обогрева, оформляющих детали – в зависимости от конструктивных возможностей; в основном – в непереналаживаемых стационарных пресс-формах, переналаживаемых блоках).

Классификация электронагревательных элементов сопротивления: спираль (пропускают последовательно через каналы в плитах обогрева, которые затем заполняют изоляционным материалом; концы спирали присоединяют к двум контактными клеммам); плоский нагревательный элемент (монтируют в пазах плит обогрева, прижимают планками, соединяют последовательно); трубчатый нагревательный элемент ТЭН (быстросменный, вставной, не требующий разборки пресс-формы, конструкции марок ТЭН-25Б16/0,32Л36...ТЭН-78Б16/1,6Л36 стандартизованы по ГОСТ 13268–83, они имеют мощность от 0,32 до 1,6 кВт и наружный диаметр 16 мм).



**Рис. 2.21. Пресс-форма с индукционным обогревом:**

**а** — общая схема установки индукторов; **б** — резка плиты обогрева с пазом; 1 — пуансон; 2 — обойма пуансона; 3 — обойма матрицы; 4 — матрица; 5 — стойка; 6 — колодка клеммная; 7 — кожух; 8 — вывод индуктора; 9 — обмотка индуктора; 10 — паз под обмотку индуктора; 11 — крышка

Конструктивные особенности систем электрического обогрева определяются типом источников. Электронагревательные элементы сопротивления располагают в каналах плит. Количество элементов (и каналов) зависит от размеров плит-заготовок и требуемой суммарной мощности электронагревателей. При равных размерах плит-заготовок (они стандартизованы по ГОСТ 15861-70) суммарная мощность электронагревателей в нижней плите обогрева больше, чем в верхней, при равном количестве каналов; единичная мощность электронагревателей, устанавливаемых в центральных каналах плит на 0,1-0,15 кВт меньше, чем у периферийных. Расположение электронагревателей (и каналов) может быть неравномерным (из-за выталкивателей, знаков и т.д.), они могут отстоять на разные расстояния друг от друга и от краев плит, но важно, чтобы создаваемое ими температурное поле в объеме изделия было максимально возможно равномерным. Суммарная мощность электронагревателей должна быть несколько больше расчетной (но не более, чем в 1,3 раза). Пространство между стенками канала и трубчатым элементом заполняют изоляцией. В плитах обогрева выполняют отверстия под термоэлектрические преобразователи, которые располагают равномерно между ТЭНами, а также отверстия глубиной до 100 мм и диаметром 10,5 мм для установки термометров визуального наблюдения. Плиты обогревов с расположением каналов для электронагревателей показаны на рис. 2.2, 2.4, 2.11.

Конструктивные особенности систем электрического индукционного обогрева показаны на рис. 2.21. Известно, что преимущества индукционного обогрева — в малых потерях тепла за счет существенного уменьшения при этом излучения и конвекции тепла. Индукторы нагревают обоймы пуансона и матрицы. При пропускании переменного тока через индуктор вокруг него возникает магнитное поле, напря-

женность которого периодически изменяется по величине и направлению. Токи, индуцированные в пресс-форме, циркулируют так, что создается сопротивление протеканию тока в индукторе. При этом пресс-форму можно рассматривать в качестве вторичной обмотки трансформатора, состоящей из одного витка, а индуктор – в качестве первичной обмотки.

Во вторичной обмотке (пресс-форме) образуется тепло, которое вместе с теплом, возникающим вследствие перемагничивания постоянно меняющегося магнитного поля, создает то количество тепла, которое и нагревает пресс-форму до температуры переработки. Вследствие скин-эффекта плотность тока во вторичной цепи непостоянна. Она уменьшается (по закону  $e$ -функции) от максимума  $I_2$  на поверхности металла, охватывающего катушку индуктора, по направлению внутрь пресс-формы. Глубину на которой плотность тока уменьшается в 2,718 раза (основание натурального логарифма  $e$ ), т.е. до  $i = 0,368I_2$ , называют глубиной проникновения  $a$ ; в расчетах условно принимается, что плотность тока на глубине проникновения  $a$  имеет постоянное максимальное значение  $I_2$ ;  $a = 500\sqrt{\rho_c / (f \mu')}$ , где  $\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление стали, Ом·м;  $\mu'$  – относительная магнитная проницаемость (при заданной температуре и напряженности поля);  $f$  – промышленная частота тока.

Индуктор, или индукционный нагреватель, представляет собой специальную катушку, устанавливаемую в пазы плиты обогрева, которые охватывают полость формы: матрицу и пуансон. Расстояние между стенкой полости формы и стенкой паза должно быть как можно меньше и определяться прочностным расчетом. Укладка индуктора должна обеспечивать легкость его извлечения. Изоляция провода, используемого для изготовления обмотки индуктора, должна выдерживать максимальную температуру индуктора. Индукторная катушка должна плотно сидеть в пазу, иначе большой воздушный зазор между индуктором и пресс-формой, а также между отдельными слоями обмотки ухудшит теплопередачу от индукторной катушки к пресс-форме и может привести к перегреву катушки и разрушению изоляции провода.

Чтобы устранить влияние неизбежных зазоров, остающихся все же несмотря на плотную намотку, рекомендуется после посадки катушки в паз залить ее силиконовым лаком (возможно только при температуре до 180 °С). Пазы в плане могут быть круглыми, прямоугольными со скругленными углами или в виде удлиненного овала; в сечении – прямоугольные. Размеры сечения пазов определяют после установления необходимой мощности для обогрева пресс-форм. Верхнюю плиту обогрева закрывают стальной шлифованной крышкой. Выводы катушки подключают к клеммной колодке. Терморегуляторы размещают в плитах обогрева на расстоянии около 3 мм от стенки паза.

Число витков индуктора определяется по формуле  $n = U[G/(3W)]^{1/2}$ , где  $U$  – рабочее напряжение на клеммах индуктора в В (например, 220 В);  $W$  – требуемая мощность обогрева в Вт (определяется из расчета необходимого количества тепла для нагрева пресс-формы).

Полный расчет индуктора должен включать определение параметров активного сопротивления первичной и вторичной цепей, толщины катушки, индуктивного сопротивления первичной и вторичной цепей, величины полного сопротивления и коэффициента мощности, допустимой силы тока в индукторной обмотке.

Индукционные нагреватели значительно долговечнее электронагревательных элементов, они позволяют создать более равномерное температурное поле, уменьшить время разогрева пресс-форм, но они сложнее в изготовлении, монтаже и заменах.

### 2.6.2. Тепловой расчет пресс-форм

Целью теплового расчета пресс-форм является определение установочной мощности системы обогрева, которая необходима для обеспечения работоспособности системы как в пусковом (начальном), так и в стационарном (устойчивом) режимах работы пресс-формы. Таким образом, в тепловом расчете пресс-форм должны быть выделены два этапа: 1) определение мощности нагревательных элементов для разогрева пресс-формы в течение заданного времени в пусковом режиме работы  $W_1$ ; 2) определение мощности нагревательных элементов в стационарном режиме работы  $W_2$ .

Для большинства пресс-форм  $W_1 > W_2$ , но расчет величины  $W_2$  обязателен, поскольку, например, конструкции пресс-форм с сильно развитой поверхностью при малой общей массе формирующих элементов (например, для плоских тонкостенных изделий) имеют значительные потери тепла в окружающую среду при размыкании пресс-формы в стационарном режиме ее работы, так что  $W_2 > W_1$ . Оценить соотношение  $W_1$  и  $W_2$  для конкретной проектируемой формы, не проводя соответствующих расчетов, возможно лишь при большом опыте конструирования и эксплуатации их. После расчетов принимают значение мощности (для реализации ее в пресс-форме), соответствующее максимальному значению из  $W_1, W_2$ .

**Расчет  $W_1$ .** При заданном времени разогрева (обычно его принимают равным 30–45 мин – в зависимости от габаритов пресс-формы)

$$W_1 = Q_{\text{пр}}/\tau_{\text{раз}} + Q_{\text{пот}}^{\text{раз}},$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – тепло для разогрева пресс-формы до температуры прессования (без учета потерь), кДж;  $Q_{\text{пот}}^{\text{раз}}$  – потери тепла за время разогрева, кВт;  $\tau$  – время разогрева, ч.

Значение  $Q_{\text{пр}}$  (в кДж) равно

$$Q_{\text{пр}} = cG_{\text{пр}}(\bar{T}_{\text{пр}} - 20),$$

где  $c$  – удельная теплоемкость стали, кДж/(кг·град);  $G_{\text{пр}}$  – масса пресс-формы, кг;  $\bar{T}_{\text{пр}}$  – средняя температура пресс-формы в конце разогрева ( $\bar{T}_{\text{пр}} \approx 20$  °С при температуре стенки  $T_c = 165 + 170$  °С).

Потери тепла за время разогрева

$$Q_{\text{пот}}^{\text{раз}} = Q_{\text{бп}} + Q_{\text{сп}},$$

где  $Q_{\text{бп}}$  — потери тепла боковыми поверхностями пресс-формы, кВт;  $Q_{\text{сп}}$  — потери тепла в стол пресса поверхностями контакта с прессом, кВт.

Потери тепла боковыми поверхностями  $Q_{\text{бп}}$ :

а) без теплоизоляции  $Q_{\text{бп1}} = \alpha_6 f_6 (T_c - 20)/2$ , кВт;

б) с теплоизоляцией  $Q_{\text{бп2}} = \alpha_6^{\text{и}} f_6 (T_c - 20)/2$ , кВт,

где  $\alpha_6$ ,  $\alpha_6^{\text{и}}$  — коэффициенты теплоотдачи боковых поверхностей соответственно пресс-формы и изоляции;  $f_6$  — площадь боковых поверхностей пресс-формы,  $\text{м}^2$ ;  $T_c$  и  $T_{\text{и}}$  — температуры соответственно поверхностей пресс-формы и теплоизоляции,  $^{\circ}\text{C}$ . Обычно  $\alpha_6 \approx \alpha_6^{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^{-2}$  кДж/( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ );  $T_{\text{и}} = 80 \pm 85$   $^{\circ}\text{C}$ .

Потери теплоты в стол пресса  $Q_{\text{сп}}$ :

$$Q_{\text{сп}} = f_{\text{к}} (\lambda_{\text{пр}} / \delta_{\text{пр}}) (T_0 - T_{\text{п}}),$$

где  $f_{\text{к}}$  — площадь контакта пресс-формы с прессом,  $\text{м}^2$ ;  $\lambda_{\text{пр}}$  — коэффициент теплопроводности прокладки, кДж/( $\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ );  $\delta_{\text{пр}}$  — толщина прокладки, м;  $T_0 = (T_c - 20)/2$  — средняя температура поверхностей контакта пресс-формы за период разогрева, град;  $T_c$  — температура стенок пресс-формы, град;  $T_{\text{п}} \approx 28 \pm 30$   $^{\circ}\text{C}$  — средняя температура поверхностей контакта пресса, град.

Возможно, не проводя расчета, а зная площадь поверхности пресс-формы, разность температур стенки и окружающей среды и условный коэффициент теплоотдачи (коэффициент использования тепла пресс-формой, оценивается экспериментально), по номограмме (рис. 2.22) определить расход энергии на нагрев пресс-формы в кВт. Для определения полезного расхода тепла необходимо установить часовую

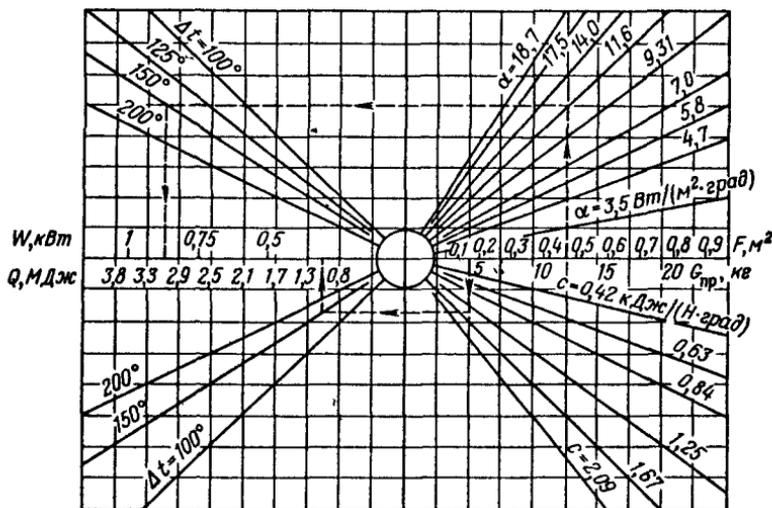


Рис. 2.22. Номограмма для определения мощности нагревательных элементов

выработку продукции, увеличение температуры материала изделия в пресс-форме и теплоемкость изделия.

Пользуясь номограммой, также нетрудно определить и мощность каждого нагревательного элемента, если это электронагревательные элементы. Для этого необходимо общую поверхность пресс-формы разбить на составляющие, проводя границы по плоскостям геометрических мест точек минимальных температур между соседними нагревателями.

Номограммой можно пользоваться как базой сравнения при обосновании выбора времени разогрева пресс-формы. Покажем методику такого выбора. Для этого представим уравнение теплового баланса пресс-формы в дифференциальном виде:

$$Wdt = cG_{\text{пр}}d\Delta T(\tau) + \alpha_6 f_6 \Delta T(\tau) dt + (\lambda_{\text{пр}}/\delta_{\text{пр}}) f_{\text{пр}} \Delta T(\tau) dt,$$

где  $\Delta T(\tau) = T(\tau) - T_0$ ;  $W$  — мощность обогрева, кВт;  $c$  — теплоемкость металла формы, кДж/К;  $G_{\text{пр}}$  — масса пресс-формы, кг;  $T(\tau)$  — текущее значение температуры формы, К;  $T_0$  — температура окружающего воздуха, К;  $\alpha_6$  — коэффициент теплоотдачи от боковой поверхности формы, кДж/(м<sup>2</sup>·с·К);  $f_6$  — площадь боковой поверхности, м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{пр}}$  — теплопроводность материала теплоизолирующих прокладок между плитами пресса и формой (как правило, асбест), кДж/(м·с·град);  $\delta_{\text{пр}}$  — толщина прокладок, м;  $f_{\text{пр}}$  — площадь контактирующей поверхности прокладок, м<sup>2</sup>.

Смысл этого уравнения следующий: количество тепла, выделяемого нагревателями за дифференциально малый отрезок времени  $dt$  (левая часть уравнения), затрачивается на нагрев тела формы, вследствие чего температура его повышается на величину  $dT$  или  $d\Delta T$ , что одно и то же (первое слагаемое правой части), а также на теплопотери в окружающий воздух через боковую поверхность формы (второе слагаемое) и в плиты пресса (третье слагаемое).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_6$  при естественной конвекции от вертикальной стенки является функцией критериев Грасгофа  $Gr$  и Прандтля  $Pr$ :

$$\alpha_6 = (0,76 \lambda_{\text{в}} / h)(Gr \cdot Pr)^{0,25}; Gr = [g\beta h^3 \Delta T(\tau)] / \nu^2,$$

где для воздуха  $Pr \approx 0,7$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $h$  — высота формы в сомкнутом состоянии, м;  $\lambda_{\text{в}}$  — теплопроводность воздуха, кДж/(м·с·К);  $\beta$  — температурный коэффициент изменения плотности воздуха, К<sup>-1</sup>;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Разделяя переменные и выполняя интегрирование уравнения теплового баланса в пределах

$$\tau = 0: T = T_0, \Delta T = 0; \tau = \tau: T = T(\tau), \Delta T = \Delta T(\tau),$$

получаем формулу для расчета текущего значения времени  $\tau$ , при котором достигается некоторое значение  $\Delta T$  — разности между возрастающей температурой формы  $T$  и температурой окружающей ее среды  $T_0$ :

$$\tau = k_1 J,$$

причем

$$J = \int_0^{\Delta T} f(\Delta T) d\Delta T; K_1 = cG_{\text{пр}};$$

$$f(\Delta T) = (W - k_2 \Delta T - k_3 \Delta T^{1,25})^{-1};$$

$$K_2 = (\lambda_{\text{пр}} / \delta_{\text{пр}}) f_{\text{пр}}; K_3 = (0,76 \lambda_{\text{в}} / h) (0,7 g \beta h^3 / \nu^2)^{0,25} f_6.$$

Возможны два варианта зависимости разности температур  $\Delta T$  от времени  $\tau$  (рис. 2.23). Если определенная приближенно по номограмме (см. рис. 2.22) мощность  $W$  оказывается недостаточной, то величина  $\Delta T$ , возрастая, не достигает требуемого своего значения  $\Delta T_{\text{п}} = T_{\text{п}} - T_0$  к установленному первоначально времени разогрева формы  $\tau_{\text{раз},1}$  (см. кривую "б" на рис. 2.23);  $T_{\text{п}}$  — требуемая температура формы. В этом случае необходима корректировка выбранного по номограмме значения мощности. Если же мощность  $W$  выбрана по номограмме верно, т.е. несколько превышает минимально необходимую ее величину, то разность  $\Delta T$ , возрастая, достигает требуемого своего значения  $\Delta T_{\text{п}}$  за время  $\tau_{\text{раз},2}$ , меньше того значения  $\tau_{\text{раз},1}$ , которым задавались (см. кривую "а" на рис. 2.23).

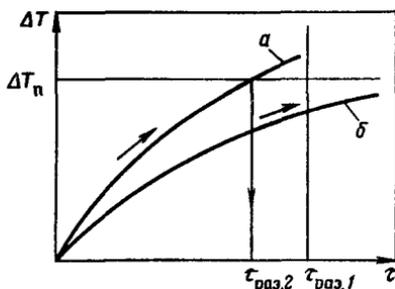


Рис. 2.23. Зависимость разности температур от времени разогрева пресс-формы  $\tau$

Алгоритм расчетной процедуры по проверке правильности выбора значения мощности  $W$  по номограмме, а в случае необходимости и корректировки этого значения, представлен на рис. 2.24.

При выбранном по номограмме значении мощности  $W$  (см. блок 2 исходных данных) задаются последовательно возрастающими значениями  $\Delta T$  (блок 6) и вычисляют соответствующие им значения  $\tau$  (блоки 7–9), каждый раз проверяя, не достигло ли текущее значение  $\tau$  заданной величины  $\tau_{\text{раз},1}$  (блок 10).

Если при этом по блоку 10 величина  $\tau$  еще не достигла  $\tau_{\text{раз},1}$ , а текущее значение разности  $\Delta T$  уже несколько превысило требуемое значение  $\Delta T_{\text{п}}$  (см. блок 12), что соответствует кривой "а" на рис. 2.23, то значение мощности выбрано верно, расчет окончен (блоки 13–15). Если же по блоку 10 текущее время  $\tau$  превысило требуемое время

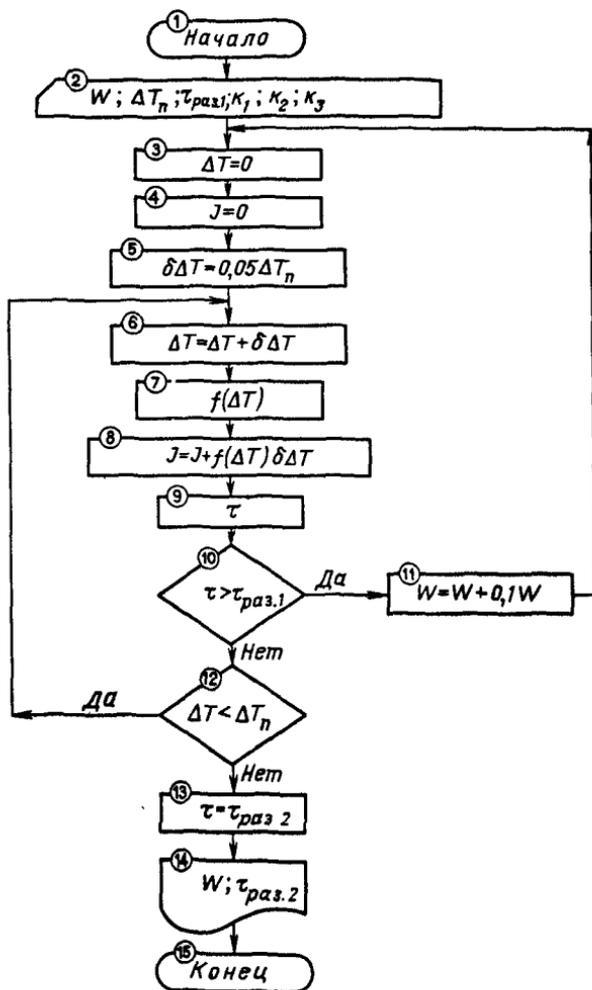


Рис. 2.24. Схема алгоритма вычисления  $W$  и  $\tau_{\text{раз.2}}$ :

блок 2 — ввод исходных данных; блоки с 3 по 9 включительно — выполнение операции интегрирования по формуле для  $J$  приближенным методом прямоугольников; блок 5 — назначение шага интегрирования  $\delta$  по аргументу  $\Delta T$ ; блок 9 — определение конца интервала интегрирования по аргументу

разогрева  $\tau_{\text{раз.1}}$ , то необходимо задаться несколько большим значением мощности (см. блок 11) и повторить расчет.

**Расчет  $W_2$ .** Принципиально этот расчет подобен расчету  $W_1$ . Мощность нагревательных элементов  $W_2$  должна быть достаточной для обеспечения полного теплового баланса (внешних источников тепла):

$$Q_{\text{эл}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{с.п}} + Q_{\text{о.с}} + Q_{\text{б.с}} + Q_{\text{пр}}$$

где  $Q_{\text{пол}}$  — полезное тепло, расходуемое на нагрев пресс-массы;  $Q_{\text{с.п}}$  — потери тепла в стол пресса;  $Q_{\text{о.с}}$  — потери тепла в окружающую среду через боковые поверхности и места разъема пресс-формы ( $Q_{\text{о.с}} = Q_{\text{б}} + Q_{\text{пр}}$ );  $Q_{\text{б.с}}$  — потери тепла через болтовые соединения;  $Q_{\text{пр}}$  — прочие потери (потери тепла при обдувке воздухом, продувке пресс-формы, вынужденных перерывах в работе и пр.).

Основными являются три первых члена правой части равенства, которые могут быть определены с достаточной для практических расчетов точностью. Определение потерь является задачей менее определенной: поскольку два члена являются к тому же незначительными по величине, такие приближенные расчеты не вносят существенных изменений в результаты расчета.

По экспериментальным данным, при различных условиях работы пресс-формы величина прочих потерь колеблется в пределах 10–20% от общего расхода электроэнергии.

Полезная теплота  $Q_{\text{пол}}$  определяется по зависимости

$$Q_{\text{пол}} = cG_1 \Delta T z,$$

где  $c$  — теплоемкость прессуемого материала, кДж/(кг·град);  $G_1$  — масса одного изделия, кг;  $\Delta T$  — изменение температуры материала в процессе его нагревания в пресс-форме, К;  $z$  — число изделий, изготавливаемых в час.

При расчете потерь в окружающую среду обязательным является учет  $Q_{\text{р}} = \tau_{\text{р}} \Sigma \alpha_{\text{р}} f_{\text{р}} \Delta T$ , где  $f_{\text{р}}$  — площадь поверхности разъема, м<sup>2</sup>;  $\Delta T$  — разность температур поверхности пресс-формы и окружающей среды, °С;  $\tau_{\text{р}}$  — продолжительность раскрытия пресс-формы за 1 ч работы, ч.

Для матрицы и пуансона эти потери следует считать отдельно, потому что значения  $\alpha_{\text{р}}$  и  $f_{\text{р}}$  для них различны.

Коэффициент теплоотдачи мест разъема  $\alpha_{\text{р}}$  для оформляющей части матрицы может быть найден из зависимости

$$\alpha_{\text{р}} = 0,95(\lambda/h)(Gr \cdot Pr)^{0,02},$$

где  $h$  — высота гнезда матрицы, м.

Для горизонтальной плоскости разъема матрицы  $\alpha_{\text{р}} = 4,2 \Delta T^{0,19}$ .

В уравнения для  $\alpha_{\text{р}}$  все величины, зависящие от температуры, подсчитываются по определяющей температуре  $\bar{T} = (T_{\text{с}} - T_{\text{о.с}})/2$ .

В горизонтальных плоскостях разъема коэффициент теплоотдачи меньше, чем в вертикальных, но учитывая, что пуансон имеет периодическое поступательное движение и обдувается холодным воздухом, коэффициент теплоотдачи для него может быть увеличен и принят равным коэффициенту теплоотдачи вертикальных стенок — порядка  $1,5 \cdot 10^{-2}$  кДж/(м<sup>2</sup>·с·град).

Поверхность соприкосновения пресс-формы со столом пресса составляет 15–25% от ее общей поверхности, и, если принять коэффициент теплоотдачи в стол пресса, равным коэффициенту теплоотдачи от боковых поверхностей, будем иметь тепловой запас порядка 7,5–12% на пресс-форму (по сравнению с точным учетом расхода теплоты в стол пресса), обеспечивающий бесперебойную работу пресс-форм при снижении напряжения в сети и т.д. Тогда общие потери тепла могут

быть подсчитаны по одной формуле

$$Q_{\text{пот}} = \alpha f_{\text{полн}} \Delta T,$$

где  $\alpha$  – условный коэффициент теплоотдачи, кДж/(м<sup>2</sup>·с·град);  $f_{\text{полн}}$  – полная поверхность пресс-формы, м<sup>2</sup>.

Ввиду того, что во время работы напряжение в сети иногда падает, что приводит к перерывам в работе и появлению брака в изделиях, необходимо найденную величину  $Q_{\text{эл}}$  увеличить на 15–20%, что компенсирует также все непредвиденные расходы тепла (сквозняки, сильные морозы и т.п.):  $Q_{\text{расх}} = Q_{\text{эл}}^{\phi}$ . Избыток энергии при этом будет исключаться терморегулятором.

Общий расход тепла (в кВт) в период прессования может быть подсчитан по уравнению теплового баланса  $Q_{\text{общ}} = Q_{\text{эл}} + Q_{\text{реакц}}$ , где  $Q_{\text{эл}}$  – тепловой поток, подведенный к пресс-форме в виде электроэнергии;  $Q_{\text{реакц}}$  – тепловой поток от экзотермической реакции.

В случае, когда требуется, чтобы  $W_1 \gg W_2$ , к пресс-форме подключают специальные секции стартовых нагревателей, мощность которых  $W_{\text{ст}} = W_1 - W_2$ ; эти секции отключают при выходе пресс-формы на стационарный режим. Рассчитанную для всей пресс-формы мощность требуется распределить на две полуформы (учитывая массы их и расположение полости), и каждую автономно подключить к системе терморегулирования. Далее расчет проводят в зависимости от типа источника электроэнергии – электронагревательных элементов (устанавливая их единичную мощность) для индукторов (устанавливая число витков, толщину изоляции и другие функциональные параметры).

Для уменьшения тепловых потерь, учитывая реальные их значения, предусматривают применение теплоизоляционных плит, а также покрытие наружных поверхностей термостойкой краской.

## **2.7. Системы удаления изделий из полости пресс-формы, перемещения и центрирования деталей.**

### **Установка пресс-форм**

Названные в этом разделе функциональные системы пресс-форм конструктивно чрезвычайно разнообразны, что определяется разнообразием конфигураций изделий. Опыт конструирования дает возможность выделить некоторые типовые положения и типичные варианты, которые следует рассматривать как первоначальную базу для выбора конкретных необходимых решений. Важно, чтобы конструкции этих систем были максимально простыми и в механическом, и в кинематическом отношениях.

#### *2.7.1. Система удаления изделий*

В эту систему входят детали, взаимодействие которых (после формирования изделий и размыкания пресс-форм) приводит к перемещению и выталкиванию изделий.

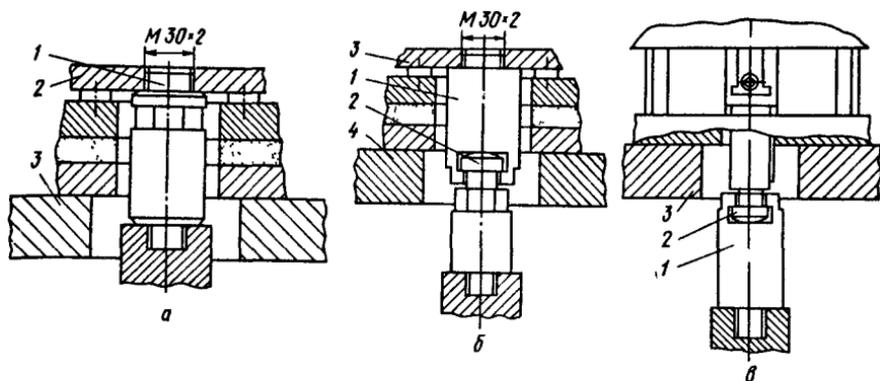


Рис. 2.25. Варианты связи выталкивающих систем гидравлического пресса и пресс-формы: а — цельный хвостовик (1 — хвостовик по ГОСТ 22559—77, 2 — плита выталкивающего устройства пресс-формы, 3 — стол пресса); б — составной хвостовик (1 — наконечник по ГОСТ 22561—77, 2 — толкатель по ГОСТ 22560—77, 3 — плита выталкивающего устройства пресс-формы, 4 — стол пресса); в — наконечник в блоке сменных пресс-форм прямого прессования (1 — наконечник по ГОСТ 22561—77, 2 — хвостовик по ГОСТ 22559—77, 3 — стол пресса);  $H_{зк}$  — высота загрузочной камеры

В систему удаления изделий могут входить и различные манипуляторы съема и укладки изделий вне рабочей зоны пресса. В большинстве случаев по смыслу выполняемой работы систему называют выталкивающей. Она жестко связана (в стационарных пресс-формах прямого и литевального прессования) с выталкивающей системой гидравлического пресса, и перемещается с последней по командам (вручную, автоматически). Выталкивающая система монтируется на хвостовике — цельном или составном (рис. 2.25). Составной хвостовик позволяет быстро и надежно соединять толкающую плиту с выталкивателем пресса, производить завинчивание двух разъемных частей хвостовика раздельно, когда пресс-форма еще не установлена на прессе (эта конструкция предпочтительна).

Выбор выталкивателей зависит от конфигурации и габаритов прессуемого изделия. Известны следующие конструктивные варианты выталкивающих систем: стержневые (наиболее распространенные), клиновые (сравнительно мало распространенные), комбинированные (для извлечения изделий сложной конфигурации в стационарных пресс-формах). Иногда для извлечения изделий используют пуансон.

Проектирование выталкивающей системы надо начинать с выбора способа выталкивания (рис. 2.26).

Наиболее простой и распространенный способ выталкивания — стержнем с гладким торцом (см. рис. 2.26, а). Он используется для изделий, поверхность которых имеет плоские участки. Иногда функцию выталкивания осуществляют подвижные формующие знаки (рис. 2.25, б). В свою очередь, выталкиватели используются иногда для установки и фиксации арматуры (рис. 2.26, в). Выталкивание изделия производится здесь через арматуру.

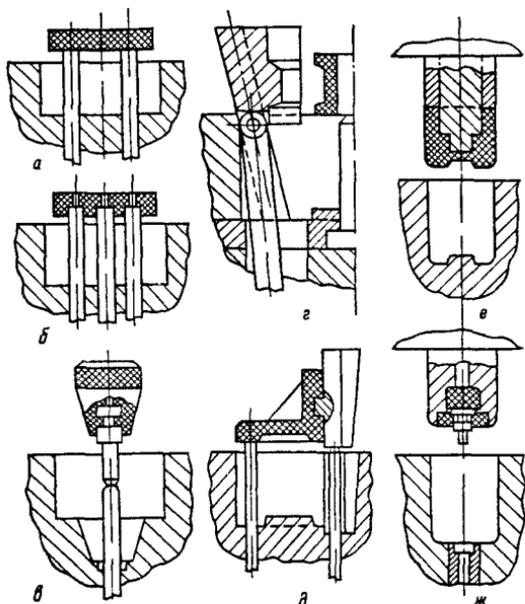


Рис. 2.26. Способы выталкивания прессовых изделий:

а — стержнем с гладким торцом; б — подвижным формирующим знаком; в — выталкивателем через арматуру; г — при помощи клиновидных щек; д — при помощи щеки и стержневых выталкивателей; е — при помощи гильзы; ж — при помощи центрального стержня

На рис. 2.26, г представлен способ выталкивания изделия при помощи клиновидных щек. Клиновидные щеки при движении вверх скользят по наклонным пазам, при этом осуществляется разъем. Для извлечения изделий сложной конфигурации используют комбинированные способы выталкивания. На рис. 2.26, д показан способ выталкивания при помощи щеки и стержневых выталкивателей. Изделие отделяется от щеки вручную.

Одним из способов выталкивания является способ извлечения изделия при помощи пуансона. В этом случае изделие остается на пуансоне или в пуансоне и снятие его с пуансона является вторым этапом извлечения. Принудительное снятие изделия осуществляют различно: при помощи специальной гильзы, играющей роль трубчатого выталкивателя (рис. 2.26, е) или при помощи центрального стержня (рис. 2.26, ж).

В съемных пресс-формах функции выталкивателей могут выполнять формирующие знаки или специально устанавливаемые толкатели. В большинстве случаев они не имеют постоянной связи с пресс-формой и после каждого извлечения детали устанавливаются на место вручную.

**Общие требования к выталкивателям** изложены ниже.

1. При расположении выталкивателей необходимо предусматривать, чтобы изделие не перекашивалось при удалении из матрицы, иначе неизбежна его деформация или поломка; усилие, возникающее при выталкивании на торцах толкателей, не должно деформировать или разрушать изделие, поэтому рекомендуется ставить выталкиватели под арматуру или утолщенные места (ребра, бобышки и пр.).

2. Остающиеся от выталкивателей отпечатки, следы не должны портить внешний вид. Поэтому торцы выталкивателей должны находиться в одной плоскости с дном формирующей полости. Если сторона изделия, на которую действуют выталкиватели, не является лицевой, можно торцы выталкивателей делать на 0,15–0,2 мм выше дна матрицы, что даст небольшие углубления (эти углубления необходимо предусмотреть в чертеже). При "утопленных" в матрицу (относительно плоскости дна) выталкивателях на изделии будут оставаться выступы, что не допустимо.

3. Высота выталкивателей (в частности, в съемных пресс-формах без нижних плит) должна быть строго одинаковой, иначе возможны перекося и поломка выталкиваемого изделия.

4. Величина хода выталкивателей должна обеспечивать полное удаление отпрессованного изделия из пресс-формы. Для стационарных пресс-форм она равна расстоянию от дна формирующей полости до верхней плоскости обоймы матриц (загрузочной камеры) плюс 8–10 мм (для ввода под вытолкнутые изделия вилки-съемника).

5. Крепление выталкивателей в стационарных пресс-формах рекомендуется делать, как правило, свободным – плавающим. Такое крепление компенсирует некоторое несовпадение отверстий в матрице и плитах выталкивателей и обеспечивает лучшую работу выталкивателей.

6. Выталкиватели нельзя располагать вплотную к стенкам формирующего гнезда, чтобы его не повредить, и надо устанавливать как можно ближе к контуру формирующего элемента, а также в наиболее глубоких местах формирующей полости – для равномерного извлечения и уменьшения деформации изделия.

### *2.7.2. Система перемещения деталей*

Назначение этой системы – перемещение формирующих знаков одновременно (или после) с размыканием пресс-формы, до начала выталкивания изделий. Рассмотрим на рис. 2.27 пример простой конструкции гладкого знака, оформляющего боковое отверстие в прессуемом изделии.

Установка знака в рабочее положение и удаление его из изделия осуществляется за счет клиньев, закрепленных в пуансонодержателе верхней части пресс-формы. Рабочая длина клина  $L$  равна

$$L = (1 + c) / \sin \alpha,$$

где  $l$  – ход бокового знака, мм;  $c$  – добавочный ход (3–5 мм);  $\alpha$  – угол клина (от 15 до 30°).



изделия и загрузки материала пресс-форма смыкается, колонка 3 возвращает ползун в рабочее положение.

Расчетные формулы, по которым достаточно точно определяют исполнительные размеры лекальных колонок, смещение центра отверстия под колонку на ползуне относительно центра на плите, поясняются схемой на рис. 2.29. Здесь: рабочая длина лекальной колонки  $l_{\text{раб}} = l_{\text{хода}}/\sin\alpha + 0,5/\text{tg}\alpha$ ;  $l_1 = 3,8\cos\alpha$ ;  $l_2 = 2 + (d + 5)\text{tg}\alpha$ ;  $l_3 = h/\cos\alpha$ ;  $l_4 = [(d + 10)/2]\text{tg}\alpha$ ;  $l_0 = l_3 + l_4 - l_2$ ;  $l = l_{\text{раб}} + l_1 + l_3 + l_4$ ;  $L = l + l_4 + B$ ;  $B = (h + 0,5)\text{tg}\alpha$ .

Перемещение формирующих знаков, как указывалось, производится с помощью механизмов: клиновых, шарнирных, рычажных, шестеренных и гидравлических. Выбор типа механизма диктуется не только стремлением к максимальной механизации процесса извлечения, но и простоте, надежности работы.

Устройство механизма подачи арматуры в большой степени зависит от конфигурации, размеров и места расположения арматуры в форме.

### 2.7.3. Система центрирования

Система центрирования пресс-форм предназначена для точного совмещения двух полуформ при их смыкании, а также для направления движения выталкивающей системы. В нее входят главным образом направляющие колонки и втулки.

Направляющие колонки всегда устанавливают в подвижной (верхней) полуформе: это облегчает загрузку пресс-формы, установку арматуры и знаков, удаление изделий, очистку полости формы.

Длину колонок следует определять конструктивно, руководствуясь длиной пуансона (с припуском 5–10 мм) или величиной необходимого хода выталкивания, величиной толщины плит и толщины упора.

Размеры направляющих втулок к колонкам зависят от размеров последних. Высота втулки должна лежать в пределах 1,5–2 ее внутреннего диаметра. Колонки направляющие стандартизованы в ГОСТ 22072–76, а втулки – в ГОСТ 22073–76; втулки центрирующие – в ГОСТ 22075–76.

В съемных пресс-формах обычно устанавливают две колонки, разных диаметров. Если в таких пресс-формах несколько плоскостей разреза, то применяют ступенчатые колонки (число ступеней равно числу плоскостей разреза съемного пакета). Конструктивное исполнение направляющих колонок и втулок – см. рис. 2.2–2.4.

### 2.7.4. Установка и закрепление пресс-форм

Установку и закрепление пресс-форм производят с учетом размеров и расположения пазов для крепления пресс-форм (см. ГОСТ 16114–80). Надежное закрепление необходимо, чтобы не происходили случаи травматизма рабочих из-за сдвигов, перекосов плохо установленной пресс-формы. На рис. 2.30 представлены распространенные варианты закрепления стационарных пресс-форм. Вариант рис. 2.30, а

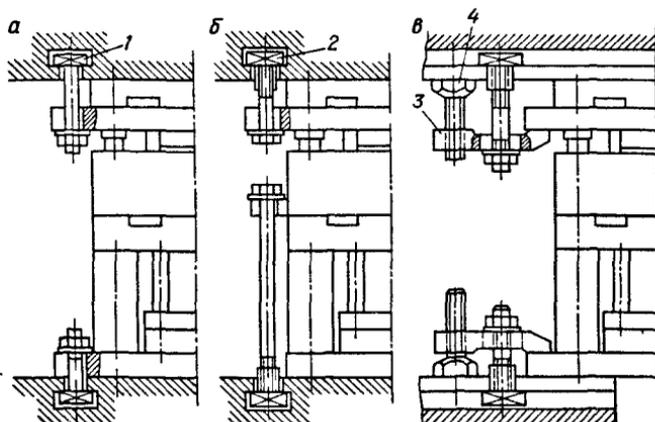


Рис. 2.30. Варианты конструкций закрепления стационарных пресс-форм:

*а* — проушины в основании пресс-формы и в пуансонодержателе; *б* — проушины в обойме и в пуансонодержателе; *е* — прихваты с регулирующими опорами (1 — болт, 2 — резьбовое гнездо, 3 — прихват, 4 — регулируемая опора)

предусматривает закрепление за специальные проушины в основании пресс-формы и в пуансонодержателе, совпадающие с Т-образными пазами стола пресса. Болты с квадратной головкой предотвращают проворачивание болта при затягивании гайки. В варианте рис. 2.30, *б* проушины не в основании пресс-формы, а в обойме, и благодаря этому при затягивании болтов все плиты нижней полуформы дополнительно поджимаются. Подвижные резьбовые гнезда предотвращают пазы пресса от сколов. По сравнению с вариантом рис. 2.30, *а* здесь крепежные болты более длинные, при затягивании их может скрутить. В варианте рис. 2.30, *е* установку осуществляют прихватами; требуемая высота их расположения достигается с помощью регулируемых опор.

## 2.8. Материалы и технологические процессы изготовления формообразующих деталей пресс-форм (ФОД)\*

### 2.8.1. Стали

Основными и самыми распространенными материалами для изготовления формообразующих деталей (ФОД) являются стали. Срок службы пресс-форм зависит главным образом от стойкости ФОД, а она связана с правильным выбором марки стали, режимов ее термообработки или упрочнения.

Основными причинами потери стойкости материалов ФОД являются: износ, разрушение, смятие, коррозия, адгезия полимеров к поверхности ФОД.

\*Приводимые сведения относятся не только к пресс-формам, но и к другим типам формующего инструмента.

Износостойкость стальных ФОД определяется типом и количеством карбидной фазы и твердостью мартенситной основы сталей. Определяющим является их абразивный износ, усиленный воздействием агрессивных химических веществ, выделяющихся в рабочей зоне формования.

Разрушение ФОД – сколы тонких элементов, перемычек и т.д. – наблюдаются чаще при использовании цементируемых сталей в результате влияния концентрации напряжений.

Смятию подвергаются локальные участки поверхности ФОД из-за неравномерной и пониженной прокаливаемости некоторых сталей при попадании в плоскость разъема формы твердых частиц материала.

Коррозия ФОД наблюдается при переработке пластмасс, отличающихся сильно агрессивными выделениями летучих, особенно сложной конфигурацией полости, когда технологически затруднено выполнить однородное хромовое покрытие. В таких случаях стали с хромовым электролитическим покрытием заменяют на улучшенные коррозионностойкие стали. Они отличаются относительно небольшой устойчивостью к излому при закалке, средним (до малого) износом, низкой теплопроводностью, но отличными антикоррозионными свойствами, постоянством размеров, сопротивлением к трещинообразованию, высокой прочностью на сжатие, хорошей полируемостью, обрабатываемостью.

При переработке малоагрессивных пластмасс возможно применять стальные ФОД даже без хромового покрытия.

Адгезия полимеров к ФОД проявляется чаще всего тогда, когда уже произошла коррозия поверхности, или когда эта поверхность была недостаточно чистой (шероховатой). Стали, применяемые для ФОД, по методу их термической обработки классифицируют на цементируемые, закаливаемые (в том числе, стали сквозной закалки), улучшенные, специальные (в основном – мартенситностареющие).

Особенностями цементируемых сталей являются: твердая поверхность, большая износостойкость, отличная полируемость и возможность нанесения твердого хромового покрытия. Чем глубже и тверже зона цементации, тем больше сопротивление износу и пластической деформации; глубина цементации должна быть тем больше, чем больше давление формования и площадь плоской поверхности ФОД.

Закаливаемые стали имеют примерно одинаковые механические свойства во всем объеме ФОД, и не опасно (как и в цементируемых сталях) удалить прочный поверхностный слой при механической обработке или в результате пластической деформации. Эти стали особенно пригодны для электроэрозионной обработки, они хорошо полируются. При переработке реактопластов материалы ФОД должны отвечать двум основным требованиям – высокой прочности на сжатие и высокому сопротивлению износу. Эти требования выполняют закаливаемые стали, например марки X12 и многие другие. Они отличаются и высокой размерной стабильностью, мало деформируются, достаточно пластичны и вязки. Закаливаемые стали для крупных ФОД при

резких перепадах температур подвергают высокому отпуску (более 500 °С); для мелких ФОД, работающих в условиях медленного повышения температур, – низкому отпуску (до 250 °С).

Улучшенные стали применяют для крупных и средних ФОД. В них устранены недостатки цементуемых и закаливаемых сталей – они отличаются высокой прочностью сердцевины, что позволяет допускать значительные локальные перегрузки, повышенной поверхностной прочностью и пластичностью (из них выдавливают глубокие и сложные

Таблица 2.8. Рекомендуемые марки сталей для изготовления ФОД

| Наименование ФОД   | Марка стали   | Твердость рабочих частей ФОД  |   |
|--|---|---|---|
|  |   | для прямого и литев-<br>ного прессования  | для литья под<br>давлением  |
| Матрицы, пуансоны, вставка матриц<br>и пуансонов простой конфигурации                                  | У8А   |   |   |
|  | У10А  | 56...61HRC <sub>3</sub>   | 45–55 HRC <sub>3</sub>  |
| Матрицы, пуансоны, вставки слож-<br>ной конфигурации без тонких выст-<br>упов и ослаблений сечений     | 40Х   | –   | 45–50 HRC <sub>3</sub>  |
|  | 40Х13   | 50–55 HRC <sub>3</sub>  | 45–55 HRC <sub>3</sub>  |
|  | 95Х18   | 54–58 HRC <sub>3</sub>  |   |
|  | 12ХНЗА, 20Х   | Цементировать<br>56–61 HRC <sub>3</sub>   |   |
|  | 5ХНМ  | 56–61 HRC <sub>3</sub>  |   |
|  | ХВГ<br>9ХС<br>4Х5МФС  | 56–61 HRC <sub>3</sub><br>56–61 HRC <sub>3</sub><br>56–61 HRC <sub>3</sub>                |   |
| Матрицы, пуансоны, вставки слож-<br>ных конфигураций с тонкими выст-<br>упами и ослабленными сечениями | 20Х   | Цементировать<br>50–61 HRC <sub>3</sub>   | 45–55 HRC <sub>3</sub>  |
|  | 12ХНЗА;<br>20ХНЗА   | Цементировать<br>53–57 HRC <sub>3</sub>   |   |
|  | 38Х2МЮА   | Азотировать<br>53–57 HRC <sub>3</sub>   |   |
|  | 7ХГ2ВМ  | 56–61 HRC <sub>3</sub>  |   |
|  | Х6ВФ  | 56–61 HRC <sub>3</sub>  |   |
|  | 20Х13   | Азотировать<br>50–61 HRC <sub>3</sub>   |   |
|  | 30Х13   | 50–55 HRC <sub>3</sub>  |   |
|  | Знаки гладкие и резьбовые, кольца<br>резьбовые, выталкиватели | 40Х, ХВГ<br>9ХС, 4Х5МФС,<br>65Г, 30Х13,<br>У8А, 40Х13,<br>У10А, 95Х18,<br>Х12М<br>38Х2МЮА | 50–61 HRC <sub>3</sub><br><br><br><br><br><br>Азотировать<br>50–61 HRC <sub>3</sub> |
| Тонкие знаки и тонкие плоские<br>вкладыши  | 65Г<br>У8А<br>У10А  | 35–42 HRC <sub>3</sub>  | 35–42 HRC <sub>3</sub>  |
| Матрицы, пуансоны таблетформ   | Х12М, Х12Ф1   | 60–63 HRC <sub>3</sub>  |   |

полости ФОД). Улучшение сталей проводят легированием, добавляя бор, молибден, никель, вольфрам, а также специальной обработкой. Например, при закалке с последующим отпуском при температуре более 500 °С в течение 1–2 ч получается структура сорбита, обеспечивающая сочетание оптимальной вязкости и прочности.

Рекомендуемые ГОСТ 27358–87 стали для изготовления ФОД приведены в табл. 2.8 (марки сталей 20Х13, 30Х13, 40Х13, 95Х18 по ГОСТ 5632–72; 65Г по ГОСТ 14959–79; 12ХНЗА, 20ХНЗА, 38Х2МЮА, 20Х, 40Х по ГОСТ 4543–71; 9ХС, 5ХНМ, 7ХГ2ВМ, 4Х5МФС, Х6ВФ, ХВГ, Х12М, Х12Ф1 по ГОСТ 5950–73; У8А, У10А по ГОСТ 1435–74).

Допускается заменять стали на другие с механическими свойствами не ниже, чем у приведенных.

В деталях, имеющих различные твердости, размер переходной зоны твердостей должен быть в пределах 15–30 мм нормируемого участка.

Детали ФОД изготавливают из отливок (требования к ним – по ГОСТ 977–75 и ГОСТ 26358–84. Неуказанные литейные радиусы в зависимости от габаритных размеров заготовок деталей пресс-форм должны быть от 2 до 40 мм. Допускается вместо литейных радиусов применять фаски.

Заготовки ФОД из чугуна должны быть подвергнуты старению. Допуски размеров отливок из металлов и сплавов, не подвергаемых механической обработке, назначают по 10-му классу ГОСТ 26645–85. В технической документации могут быть установлены другие допуски размеров.

Выбор сталей для ФОД оказывает значительное влияние на технико-экономические показатели производства. Главными факторами, определяющими выбор той или иной марки сталей, являются: тип перерабатываемого материала, сложность конструкции из ФОД, давление формования, серийность выпуска, гнездность формирующего инструмента, особенности планируемого технологического процесса изготовления ФОД.

### *2.8.2. Цветные сплавы и другие материалы*

ФОД для серийного производства можно изготавливать из медных, цинковых или алюминиевых сплавов, для опытного – даже из свинцовых или оловянистых сплавов.

Медные сплавы (латуни, бронзы) применяют наиболее широко. Наиболее высокой твердостью из них отличается бериллиевая бронза; ФОД из нее в сочетании с хромовым покрытием успешно используют для матриц, в которых формуют небольшие тонкостенные изделия. ФОД из цветных сплавов получают литьем, благодаря чему формирующие поверхности получаются с малой шероховатостью, без окалины, они отличаются низкой адгезией к материалам мастер-модели.

Никель-кобальтовые материалы применяют для изготовления ФОД методом гальванопластики. При этом получают высокие (7–9 качества) точность размеров и качество поверхности ( $Ra$  0,2–0,05 мкм) без

дополнительной механической обработки формообразующих поверхностей, термообработки и хромирования. Матрицы из никелькобальтовых материалов для изготовления тонких длинных изделий, со сложным рельефом получают по модели.

### 2.8.3. Технологические процессы изготовления и сборки ФОД

Выбор экономически целесообразного метода изготовления ФОД определяется минимумом приведенных затрат:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_{pz_i} \tau_i,$$

где  $C_{pz_i}$  — приведенные часовые затраты (с учетом капитальных) по эксплуатации оборудования при выполнении  $i$ -й операции;  $\tau_i$  — норма времени на выполнение  $i$ -й операции при изготовлении требуемого количества ФОД;  $n$  — число операций.

Однако этой оценке должен предшествовать всесторонний анализ технических возможностей (по табл. 2.9 и другим данным) процессов изготовления ФОД. Напомним кратко суть некоторых из этих процессов.

Электроэрозионная обработка заключается в разрушении металла обрабатываемой поверхности под действием электрических разрядов. В точке разряда металл локально оплавляется, испаряется, образуя

Таблица 2.9. Технические возможности процессов изготовления ФОД

| Процесс                              | Максимальный размер обрабатываемой ФОД              | Качество размеров рабочей полости | Шероховатость поверхности рабочей полости $R_a$ , мкм |
|--------------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Слесарно-механическая обработка      | Любой   | 8—5                               | 0,63—0,04   |
| Электроэрозионная обработка:         |   |                                   |   |
| копировальным прошиванием            | Площадь до 2000 см <sup>2</sup>                     | 11—9                              | 2,5—0,32  |
| вырезка непрофилированным электродом | Толщина детали до 50 мм                             | 9—6                               | 1,25—0,32   |
| Точное стальное литье                | Ограничен техническими возможностями оборудования   | 12—11                             | 40—20   |
| Точное цветное литье                 | Ограничен техническими возможностями оборудования   | 9—6                               | 1,25—0,32   |
| Полугорячее выдавливание             | Площадь до 250 см <sup>2</sup><br>Глубина до 200 мм | 12—9                              | 2,5—0,63*   |
| Холодное выдавливание                | Площадь до 150 см <sup>2</sup><br>Глубина до 100 мм | 6—8                               | 0,63—0,08*  |
| Порошковая металлургия               | Площадь до 250 см <sup>2</sup>                      | 11—8                              | 1,25—0,63   |
| Плазменное напыление                 | Площадь до 250 см <sup>2</sup>                      | 12—9                              | 1,25—0,63   |
| Гальванопластика                     | Площадь до 1000 см <sup>2</sup>                     | 9—6                               | 0,32—0,04*  |

\* Не требуется дополнительной слесарной обработки поверхностей.

лунку. Удаляются продукты эрозии из зоны обработки благодаря газодинамическим явлениям, сопровождающим процесс. Копировальное прошивание производится электродами – инструментами (из меди, латуни, чугуна, углеродистых масс), по форме повторяющими конфигурацию обрабатываемой полости. Вырезание непрофилированным электродом (точнее – проволокой диаметром 0,08–0,3 мм) производят по шаблонам, копирам, а на станках с ЧПУ – по программам.

Точное литье, например в керамические формы по постоянным и эластичным моделям, заключается в заливке расплавленного металла требуемой марки в керамическую форму. Эта форма, в свою очередь, выполняется по модели (постоянная – из дерева, металла, пластмассы; эластичные – из термостойкого заливочного компаунда, причем саму эту модель получают по другой модели, выполненной из пластилина, воска, парафина и т.п.). Керамическая форма используется один раз. Этот процесс дает возможность изготовления ФОД большой массы, сложной конфигурации с поднутрениями, боковыми отверстиями.

Холодное выдавливание состоит во вдавливании закаленного мастер-инструмента из легированной высокосортной стали в отожженную заготовку из пластичной стали. Полость, образующаяся в результате, точно копирует конфигурацию рабочей части мастер-пуансона. Этот процесс позволяет существенно снизить трудоемкость образования сложных фасонных поверхностей ФОД, в 1,5–2 раза повысить износостойкость благодаря упрочнению поверхностного слоя. Но есть и ограничения применения процесса: невозможность выдавливания сложных полостей в инструментальных и легированных сталях; необходимость применения дорогостоящего оборудования – прессов большой мощности; необходимость изготовления высокоточных мастер-пуансонов из высокопрочных сталей; невозможность изготовления полостей ФОД, не имеющих уклонов и имеющих поднутрения.

Полугорячее выдавливание аналогично холодному, но осуществляют его на быстроходных гидравлических прессах. Пластическому деформированию подвергают стальные заготовки, разогретые до температуры 600–750 °С. Полугорячее выдавливание несколько расширяет ограничения холодного выдавливания.

Порошковая металлургия позволяет получать заготовки ФОД, прессуя металлический порошок в стальной пресс-форме, с последующим спеканием в печах с защитной атмосферой при температуре, равной 2/3 температуры плавления сплава металла.

Плазменное напыление заключается в напылении на мастер-модель металлов в виде порошковой композиции, используя в качестве источника тепла низкотемпературную плазменную струю, которая получается путем подачи смеси газов в зону горения электродов, создающих электрическую дугу. Модели делают из металла или керамических смесей. Этот процесс высокопроизводителен и эффективен, причем его достоинства возрастают по мере усложнения конфигурации детали; однако напыленный слой достаточно хрупок, а стойкость керамической модели – одноразовая (одна наплавка).

Гальванопластика, или пластическое воспроизведение поверхности модели путем осаждения на нее металла или сплава из электролита производится следующим образом. Модель изготавливают из токопроводящего материала или другого, но покрытого серебром, графитом, медью, никелем. Модель является катодом, пластины осаждаемого металла – анодом. Материал для изготовления ФОД – сплав никеля с кобальтом, он обеспечивает минимальное коробление при осаждении на модель, имеет твердость поверхности 45–52 НРС<sub>3</sub>. На осажденный рабочий слой из этого сплава толщиной 0,8–1,5 мм наращивают конструкционный слой меди толщиной до 30–50 мм. Такая деталь-корка закрепляется в обойме или на стальном основании (припаивается, приклеивается и т.д.). Процесс имеет много достоинств (главное – снижение трудоемкости изготовления сложных ФОД) и ограничений (повышенная хрупкость рабочего слоя, длительность цикла изготовления и др.).

В последние годы для изготовления сложных отверстий в ФОД успешно применяют лазерную обработку.

Общими требованиями к качеству обработки ФОД при любом процессе их изготовления являются следующие: на поверхности деталей не должно быть следов коррозии, трещин и других механических повреждений, ухудшающих прочность, эксплуатационные качества и внешний вид.

Шероховатость поверхностей деталей должна соответствовать значениям параметра Ra по ГОСТ 2789–73 (например, 3,2 мкм – резьб, 0,80 мкм – опорных плоскостей разъема; 0,20 мкм – формообразующих полостей; 0,025 мкм – формообразующих полостей для изделий светотехники и для изделий с поверхностями для гальванической или вакуумной металлизации).

Формообразующие поверхности деталей пресс-форм в зависимости от перерабатываемого полимерного материала должны быть подвергнуты одному из видов гальванической, химической или химико-термической обработки: хромированию, никелированию, азотированию, оксидированию и др. Толщина слоя хрома должна быть не менее 12 мкм. В труднодоступных местах допускается толщина слоя хрома не менее 6 мкм.

Детали, изготовленные из сталей типа 30X13, 40X13, 95X18 и др., гальванической обработке не подлежат. Формообразующие поверхности должны полироваться до и после гальванической, химической или химико-термической обработки. Полировку в разводящих каналах и литниках целесообразно проводить вдоль потока массы и по направлению съема детали.

Технологические процессы сборки ФОД в принципе традиционны для машиностроения. В основном – это процессы слесарно-механические. Точность сборки определяется заданными допусками: допуск плоскостности опорных плоскостей плит, плоскостей разъема форм, а так же параллельности прилегающих поверхностей плит, матриц, держателей, обойм должен соответствовать 6-й степени точности по ГОСТ 24643–81; допуск перпендикулярности отверстий под знаки, матрицы,

вкладыши относительно плоскости разреза не должен быть более 0,02 мм; допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей — по ГОСТ 14140—81; допуск параллельности опорных поверхностей нижней (неподвижной) и верхней (подвижной) плит крепления в закрытой форме и допуск параллельности плоскости разреза по отношению к опорным плоскостям плит формы должны соответствовать 8-й степени точности по ГОСТ 24643—81; допуск перпендикулярности направляющих колонок и втулок, а также колонок возврата относительно опорных плоскостей плит пресс-форм должен соответствовать 8-й степени точности по ГОСТ 24643—81; смещение контуров формообразующих поверхностей относительно друг друга по плоскости разреза не должно быть более 0,05 мм; торцы выталкивателей должны быть в одной плоскости с формообразующей поверхностью матрицы. Допускается выступание над поверхностью или "утопление" выталкивателей до 0,2 мм, если сторона изделия, на которую действуют выталкиватели, не является лицевой, и в зависимости от требований, предъявляемых к изделию.

## **2.9. Приемка, эксплуатация, ремонт и ресурс пресс-форм\***

### **2.9.1. Приемка**

Приемке должна подвергаться каждая пресс-форма. Изготавливаемые детали и узлы пресс-форм подвергают приемочному контролю в соответствии с нормативно-технической документацией.

Соответствие каждой пресс-формы требованиям подтверждают измерениями отформованных изделий и, при необходимости, по эталону внешнего вида изделия. Измерения проводят не ранее, чем через 16 ч после получения изделий. Объем партии изделий при испытании пресс-форм устанавливается по согласованию между изготовителем и потребителем.

В пресс-формах и отпрессованных изделиях внешний вид, наличие покрытия, полировки, плавность переходов проверяют осмотром; размеры, допуски формы и расположения поверхностей проверяют универсальными или специальными средствами измерения.

Твердость термически обработанных деталей проверяют по ГОСТ 9013—59, но не на формообразующих поверхностях пуансона, матриц и других деталей.

Сопротивление изоляции электрических цепей проверяют мегаомметром при напряжении 500—1000 В до испытания пресс-форм.

Проверку плавности перемещения подвижных частей пресс-форм проводят при испытаниях на холостом ходу (не менее 3 смыканий). Герметичность системы охлаждения проверяют на специальном стенде или при испытании пресс-форм.

---

\* Сведения, приводимые в разделе, относятся также к другим типам формующего инструмента.

Проверку остальных требований, проверяемых при приемо-сдаточных испытаниях, следует проводить при работе пресс-форм (надо произвести не менее 5 отпрессовок). В результате приемки составляют паспорт пресс-формы.

Пригодную к работе пресс-форму маркируют и, если она предназначена для эксплуатации на предприятии заказчика, производят консервацию и упаковку.

Временная противокоррозионная консервация пресс-форм, деталей и узлов должна соответствовать ГОСТ 9.014–78 (группа II).

Методы и условия консервации должны обеспечивать сохранность изделий в течение года.

Пресс-формы, детали и узлы в зависимости от габарита и массы должны быть упакованы в тару, но допускается транспортировать пресс-формы, их детали и узлы без тары в контейнерах или другими способами, обеспечивающими предохранение груза от воздействия атмосферных осадков и сохранность его при транспортировании.

Формы, детали и узлы следует хранить на стеллажах или подставках в один ряд.

### 2.9.2. Эксплуатация

Пресс-формы должны устанавливаться на оборудование, нормы точности которого соответствуют стандартам и (или) паспортным данным.

Закрепленная и выставленная на оборудовании пресс-форма должна закрываться без толчков и раскрываться без заеданий. Пресс-формы следует эксплуатировать в закрытых помещениях при температуре окружающего воздуха не ниже плюс 10 °С и относительной влажности (65±15)%.

При перерывах в эксплуатации пресс-форм на длительный срок формообразующие полости и трущиеся поверхности должны быть покрыты смазкой, предохраняющей от коррозии.

Формообразующие полости пресс-форм в процессе работы при необходимости смазывают (в соответствии с технологической картой). Попадание в формообразующие полости жидкостей и масел, не предусмотренных технологической картой, не допускается.

Очистку формообразующих деталей пресс-форм следует проводить при помощи предметов, изготовленных из цветных металлов, дерева, пластмассы.

В пресс-формах для прямого и литьевого прессования после каждой отпрессовки формообразующие полости следует продувать сжатым воздухом.

Подвижные соединения, не соприкасающиеся с формообразующей полостью пресс-формы, до начала работы и в процессе эксплуатации должны быть смазаны графитной смазкой или другими смазками для данных условий эксплуатации.

Для эксплуатации пресс-форм прямого и литьевого прессования плиты обогрева должны быть теплоизолированы от стола пресса.

В пресс-формах с электрическим обогревом должно быть предусмотрено

рено заземление. Место заземления должно быть обозначено словом "заземление".

Конструкция зажимов защитного заземления должна быть выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ 21130–75.

Сопротивление изоляции электронагревателей при температуре 20°C должно быть не менее 1 МОм, при рабочей температуре – менее 0,5 МОм.

Система охлаждения форм должна быть герметичной и выдерживать давление охлаждающей жидкости 0,6 МПа.

### 2.9.3. Ремонт

Для обеспечения гарантийной стойкости в процессе эксплуатации пресс-формы должны периодически подвергаться техническому обслуживанию и планово-предупредительному ремонту (ППР).

Система ППР включает основные виды обслуживания пресс-форм: профилактический осмотр и профилактическое межремонтное обслуживание пресс-форм; текущий ремонт; средний и капитальный ремонт.

Профилактические работы подразделяют на виды: техническое обслуживание пресс-форм, выполняемое в течение всей смены и выполняемое после снятия пресс-формы с оборудования, перед отправкой на склад.

Техническое обслуживание пресс-формы без снятия ее с оборудования предусматривает: проверку крепления и центровки пресс-формы на оборудовании и при необходимости подтягивание болтов; осмотр пресс-формы, регулирование и смазку направляющих элементов; прочистку отверстий от облоя; проверку плит (выталкивателей, штоков); проверку плит обогрева, замену в случае необходимости или закрепление клеммника, замену обогревателей; проверку наличия покрытия на формообразующих поверхностях деталей пресс-формы; проверку плавности перемещения движущихся частей пресс-формы, смазку движущихся частей; проверку других деталей и узлов пресс-формы, определяющих ее нормальную эксплуатацию.

Техническое обслуживание пресс-формы после снятия ее с оборудования до отправки на склад предусматривает: наружный осмотр формы; исправление мелких дефектов, подтягивание отдельных деталей и устройств, подналадку; замену легко демонтируемых и фиксирующих элементов.

Текущий ремонт пресс-форм может включать: частичную разборку и сборку пресс-формы с промывкой и очисткой отдельных деталей; замену выталкивателей (их пригонку), формирующих вставок, стяжных болтов, стяжных винтов и штоков, механизмов бокового перемещения знаков, направляющих колонок и втулок, резьбовой втулки под хвостовик, сменных маркировок, штоков, загрузочных камер, боковых рычагов, клиньев, колонок, системы обогрева формы, фиксирующих штифтов, отдельных неформирующих деталей и узлов; устранение забоин, вмятин, заусенцев на формообразующих деталях пресс-формы, обратных конусов; доводку до чертежных размеров отдельных встав-

вок, элементов матриц и пуансонов с их перехромировкой; установку и снятие пресс-формы с оборудования.

При среднем ремонте проводят частичную разборку пресс-формы, капитальный ремонт отдельных частей, замену и восстановление основных изношенных деталей, восстановление покрытия и переполровку формообразующих деталей пресс-форм с их доработкой по полученным изделиям до требований чертежа.

При капитальном ремонте проводят полную разборку пресс-формы, замену всех изношенных деталей с восстановлением всех ее эксплуатационных характеристик, предусмотренных техническими условиями и чертежами.

Трудоемкость работ восстановительных ремонтов по отношению к трудоемкости изготовления новой пресс-формы составляет около 20 – 30% для среднего ремонта; 40 – 60% – для капитального ремонта.

#### 2.9.4. Ресурс

Пресс-форма – это особый вид технологической системы, надежность которой должна быть гарантирована. Надежность можно оценивать косвенными способами – по показателям качества формуемых изделий.

Практикой установлены иные критерии оценки ресурсов работы пресс-формы, в частности, безотказная и гарантийная наработка, при условии соблюдения правил эксплуатации, хранения, транспортирования. Нарботка и ресурс пресс-форм зависят от сложности их конструкций (различают четыре категории сложности).

Установленную безотказную наработку  $P_6$  и установленные ресурсы пресс-формы до среднего ремонта  $P_c$  и до капитального ремонта  $P_k$  определяют (в тыс. деталей) по формулам

$$P_6 \text{ (или } P_c \text{ или } P_k) = O_6 \text{ (или } O_c \text{ или } O_k) \cdot k_r \cdot k_v \cdot k_t \cdot k_{ш} \cdot k_{и} \cdot k_3 \cdot n,$$

где  $O_6$ ,  $O_c$ ,  $O_k$  – соответственно номинальная наработка пресс-формы с одного гнезда, номинальный ресурс пресс-формы до среднего ремонта с одного гнезда, номинальный радиус пресс-формы до капитального ремонта с одного гнезда, тыс. деталей;  $k_r$  – коэффициент, учитывающий гнездность пресс-формы;  $k_v$  – коэффициент, учитывающий высоту формуемых пластмассовых изделий;  $k_t$  – коэффициент, учитывающий твердость формообразующих поверхностей;  $k_{ш}$  – коэффициент, учитывающий шероховатость формообразующих поверхностей;  $k_{и}$  – коэффициент, учитывающий качество размеров изделий;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности пресс-формы и дополнительные требования к качеству формуемых пластмассовых изделий;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий связь пресс-формы с оборудованием;  $n$  – число гнезд в пресс-форме.

Значения коэффициентов приведены в ГОСТ 27–358–87.

Гарантийная наработка пресс-формы  $P_r$  (в тыс. деталей) до среднего ремонта принимается равной установленному ресурсу до среднего ремонта  $P_c$ .

Гарантийная наработка пресс-форм, по сложности выходящих за рамки IV категории конструктивной сложности, определяется по согласованию между потребителем и изготовителем пресс-форм.

Гарантийный срок эксплуатации пресс-форм – 6 мес, а универсальных блоков – 1 год со дня ввода их в эксплуатацию.

Максимально возможное количество изделий  $N_{\max}$  которые можно изготовить за время эксплуатации формы до полного ее износа, определяется по формуле

$$N_{\max} = (K_{\max} + 1)C,$$

где  $K_{\max}$  – максимально допустимое количество ремонтов формообразующих деталей;  $C$  – стойкость деталей.

При этом

$$K_{\max} \cdot \Delta_{\text{рем}} \leq T_{\text{и}} - \Delta_{\Sigma},$$

где  $\Delta_{\text{рем}}$  – изменение исполнительного размера формообразующей детали при механической обработке ее во время одного ремонта ( $\Delta_{\text{рем}} \approx 0,04$  мм);  $\Delta_{\Sigma}$  – полное поле рассеяния соответствующего размера изделия (фактическая точность его, достигаемая при формовании);  $T_{\text{и}}$  – допуск на этот размер изделия.

## ГЛАВА 3

### ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

#### 3.1. Назначение, устройство и принцип действия литьевых форм

Формы для литья под давлением изделий из полимерных материалов относятся к самым распространенным сейчас и к весьма перспективным в будущем. В этих формах, устанавливаемых на универсальных или специализированных литьевых машинах-автоматах, получают изделия практически из всех термопластов, а также из многих марок порошкообразных и гранулированных реактопластов, резиновых смесей. В формах для литья под давлением получают разнообразнейшие изделия – от простейших до особо сложных и высокоточных. Обеспечение заданных требований, предъявляемых к изделию (в отношении структуры материала, величины и характера распределения внутренних напряжений, прочностных и деформационных свойств, точности размеров и геометрической формы), зачастую оказывается трудной проблемой, компромиссное рациональное решение которой зависит от глубокого знания особенностей литья под давлением конкретного материала, полного учета свойств материала в исходном состоянии и при переработке, максимального согласования технических возможностей литьевых машин-автоматов и конкретных форм для литья под давлением.

Сущность процессов, протекающих в формах для литья под давлением, рассмотрена в работе [1].

При анализе работы форм для литья под давлением термопластов целесообразно выделить следующие четыре стадии: заполнение закрытой, замкнутой формы расплавом (впрыск расплава), фронт которого продвигается постепенно до периферии внутренней полости

формы, являющейся негативным отображением детали; подпитка этой внутренней полости расплавом, дополнительно поступающим по специальным транспортным путям (литниковой системе) из узла инъекции литьевой машины-автомата и компенсирующим уменьшение объема материала, наступающее при частичном охлаждении расплава в ходе заполнения полости; охлаждение массы отливки (изделия) в закрытой, замкнутой форме после снятия давления литья (охлаждение без давления); извлечение отливки (изделия) из разомкнутой формы.

От условий проведения стадии заполнения формы расплавом зависит появление недоливов, перегрев расплава; от условий проведения подпитки зависит появление облоя, величина объемной усадки. На этих стадиях цикла литья под давлением окончательно фиксируется ориентация материала и связанные с ней внутренние напряжения, усадка и коробление отливок.

Стадия заполнения форм для литья под давлением расплавом и подпитки можно характеризовать следующими реологическими особенностями: резкой неизотермичностью процесса (например, температура стенки формы равна 20 – 50 °С, а расплава 150 – 250 °С); существенной зависимостью вязкости расплава от скорости сдвига при течении и от давления; нестационарностью процесса течения (критерий Фурье  $Fo \approx 1 \div 10$ , критерий Деборы  $De < \infty$ ); невозможностью использования модели несжимаемой жидкости при расчете стадии подпитки, так как уменьшение удельного объема расплава (его усадка) на этой стадии является движущей силой процесса течения; характерным профилем скоростей в области, прилегающей к фронту расплава (профиль типа „фонтан”, или „выворачивающийся чулок”), образующимся при заполнении литникового канала и полости формы из горячего ядра потока с постепенным охлаждением периферийных и пограничных слоев: это приводит к отсутствию условий автомодельности течения расплава, что усложняет соответствующие расчеты; относительной (часто – значительной) сложностью геометрии литниковой системы и формирующей полости.

В дополнение к реологическим следует отметить основные теплофизические особенности рассматриваемых стадий, а именно: зависимость теплофизических параметров (теплоемкости и теплопроводности) от температуры и степени кристалличности термопластов; смешанный конвективно-кондуктивный характер теплообмена; кондуктивный теплообмен (теплообмен теплопроводностью), который происходит главным образом в плоскости поперечных сечений литниковых каналов и полости формы, так что охлаждение материала в литьевой форме обеспечивается в основном этим теплообменом; конвективный теплообмен, который происходит преимущественно вдоль оси течения расплава в литниковых каналах и полости формы, кроме области, непосредственно прилегающей к фронту расплава (благодаря конвективному теплообмену в литниковом канале с наименьшим поперечным сечением образуется устойчивый тепловой слой и при достаточно больших поперечных сечениях остальных литниковых каналов недоливы не

будут возникать при любом объеме отливки); диссипативные тепловыделения, обусловленные внутренним трением при течении расплава и теплотой кристаллизации – для кристаллизующихся термопластов (в среднем от действия диссипативных тепловыделений, обусловленных внутренним трением, термопласты могут нагреваться до 100 °С, а локально и в зоне наибольшего трения – до 150 – 200 °С, вязкость расплава при этом уменьшается на один – два порядка); выделение скрытой теплоты кристаллизации, соответствует нагреву термопластов на 20 – 50 °С).

Основной особенностью стадии охлаждения массы отливки (изделия) в форме без давления является неизотермичность процесса кристаллизации (для кристаллизующихся термопластов): скорость охлаждения расплава вблизи стенки формы достигает 1000 °С/с и более, а в центре отливки – порядка 10 °С/с.

На этой стадии, а также после извлечения отливки из разомкнутой формы при ее охлаждении вне формы необходимо учитывать зависимость объемной усадки (изменения удельного объема термопластов) от давления, температуры расплава и степени кристалличности термопластов.

Типичная конструкция литейной формы показана на рис. 3.1.

Форма (рис. 3.1,а) состоит из двух полуформ: подвижной I и неподвижной II, закрепленных на плитах литейной машины-автомата. Поверхности матрицы А и пуансона Б, непосредственно соприкасающиеся с расплавом, называются оформляющими, а внутренняя замкнутая полость, ограниченная этими поверхностями и заполняемая при впрыске расплавом, гнездом.

Форма (рис. 3.1,б) включает пуансоны 11, матрицы 15 и плиты крепления – неподвижную 14 и подвижную 1 с фланцами 16 для точного центрирования формы относительно оси инжекционного цилиндра 18. В обойме 13 матрицы установлена литниковая втулка 17 с центральным литниковым каналом. Это – основная часть разветвленной литниковой системы. Радиус сферической поверхности втулки 17 на 1–2 мм больше радиуса сферы сопла литейной машины, что обеспечивает плотное прилегание сопла к втулке, предотвращает утечку расплава и облегчает извлечение центрального литника.

От центрального литникового канала к гнездам 12 подходят разводящие каналы; непосредственно у гнезд их сечение сужается, образуя впускные каналы. Матрицы 15 установлены в обойме 13, которая в свою очередь прикреплена к плите 14. Пуансоны 11 установлены в подвижной обойме 21 и крепятся с помощью промежуточной плиты 27. В пространстве между стойками 10, промежуточной плитой 27 и подвижной плитой крепления 1 расположена плита 4 выталкивателей. В ней установлены выталкиватели 7 для извлечения отливки, центральный выталкиватель 19 для удаления центрального литника, а также возвратные толкатели 23. Выталкиватели крепятся к плите выталкивателей с помощью плиты 3, которая воспринимает нагрузки от сил выталкивания и в исходном положении опирается на упор 2.

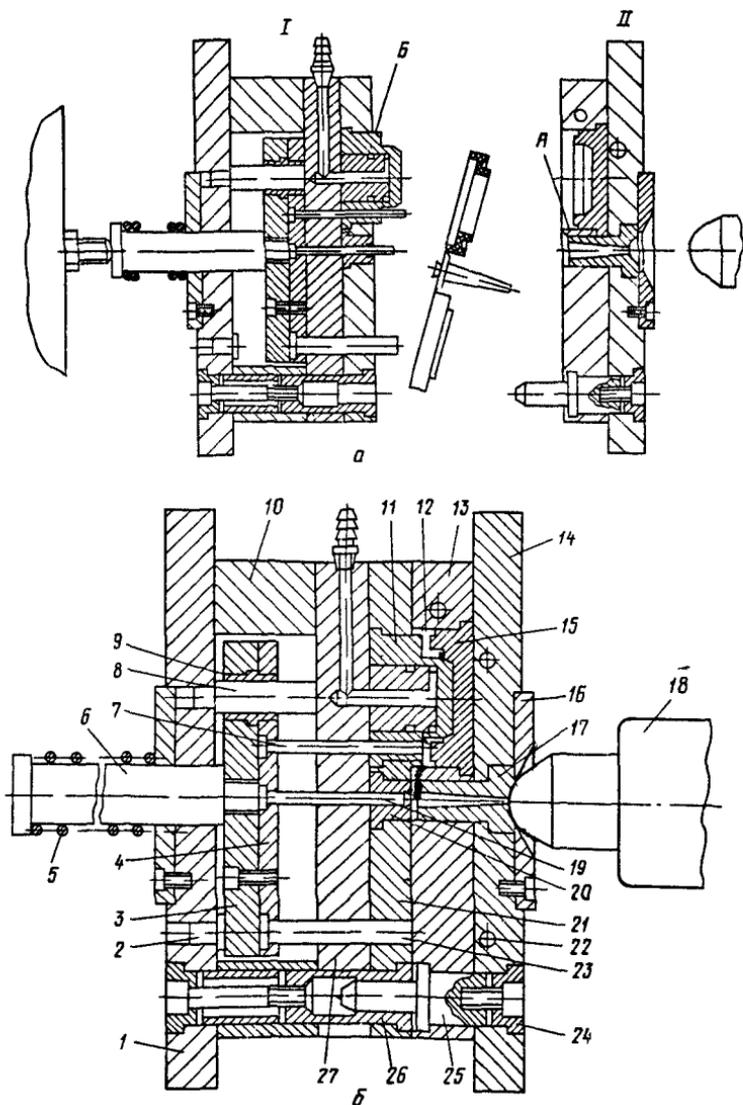


Рис. 3.1. Конструкция типичной двухгнездовой формы для литья под давлением кольцевой втулки из полистилена:

а — форма раскрыта; б — форма сомкнута; I — подвижная, II — неподвижная полуформы; 1 — подвижная плита крепления формы; 2 — упор; 3, 4 — плиты выталкивателей; 5 — пружина; 6 — хвостовик; 7 — выталкиватель; 8, 25 — направляющие колодки; 9, 26 — направляющие втулки; 10 — стойка; 11 — пуансон; 12 — гнездо пресс-формы; 13 — обойма матриц; 14 — неподвижная плита крепления пресс-формы; 15 — матрица; 16 — фланец; 17 — литниковая втулка; 18 — инжекционный цилиндр; 19 — центральный выталкиватель; 20, 24 — втулки; 21 — обойма пуансонов; 22 — канал охлаждения; 23 — возвратный толкатель; 27 — промежуточная плита

Перемещение плиты выталкивателей при удалении отливки осуществляется по направляющим колонкам 8 направляющими втулками 9 с помощью хвостовика 6, а обратный ход – под действием пружины 5 и возвратных толкателей 23. Для точного центрирования пуансона относительно матрицы служат направляющие колонки 25, соединенные болтами с втулками 24, и направляющие втулки 26.

После подхода подвижной части формы к неподвижной сопло инжекционного цилиндра 18 плотно прижимается к литниковой втулке 17, и происходит впрыск расплава полимера.

Через центральный литниковый канал в литниковой втулке 17, разводящие и впускные каналы расплав заполняет гнезда формы. Температура внутренних поверхностей гнезд благодаря охлаждающей жидкости, циркулирующей в каналах охлаждения 22, существенно ниже температуры расплава, поэтому расплав охлаждается и отливка затвердевает.

При размыкании формы ее подвижная часть отходит от неподвижной. При этом за счет усадки изделие и литники извлекаются из неподвижной матрицы 15 и перемещаются вместе с пуансоном 11 в подвижной части формы. Центральный литник извлекается из литниковой втулки с помощью захвата, выполненного во втулке 20. При даль-

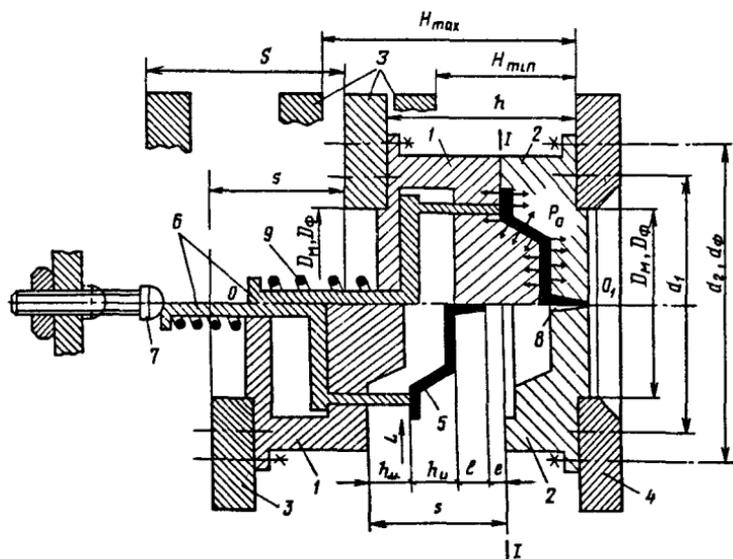


Рис. 3.2. Схема взаимодействия формы для литья под давлением термопласта с литьевой машиной-автоматом:

1 — подвижная полуформа; 2 — неподвижная полуформа; 3 — плита подвижной полуформы; 4 — плита неподвижной полуформы; 5 — изделие; 6 — толкатель; 7 — упор неподвижный; 8 — канал литниковый; 9 — пружина

нейшем движении хвостовик 6 наталкивается на неподвижный упор машины и останавливает плиту 4 выталкивателей вместе с выталкивателями 7, которые и сбрасывают изделие вместе с литниками в приемную тару. После этого форма замыкается и цикл повторяется. Такая форма из которой изделия и литники сбрасываются, не отрываясь друг от друга (получается цельная отливка), называется полуавтоматической, так как разделение производится позднее и, как правило, вручную.

На рис. 3.2 показана типичная схема взаимодействия формы с литьевой машиной-автоматом. На примере конструкции формы по рис. 3.1 видно, что даже для простой конфигурации отливки расплав полимерного материала, обладающий определенной вязкостью, нестабилен. Поток, заполняющий форму, никогда не бывает равномерным из-за разности скоростей течения, колебаний давления, температуры расплава и стенок каналов. Увеличение вязкости, а также возрастание сопротивления каналов при уменьшении их сечения снижает давление внутри полости формы. Все это приводит к неравномерному распределению массы (даже в случае полной равнотолщинной отливки), разной ориентации полимера, неравномерному остыванию отливки и, следовательно, к анизотропии свойств. На примере этой конструкции также видно, что разные детали литьевой формы имеют одно, два или несколько функциональных назначений. Группы деталей, отдельные детали или даже только определенные элементы отдельных деталей в зависимости от выполненных ими функций образуют функциональные системы, объединение которых создает конкретную структуру формы для литья под давлением.

Система оформляющих деталей охватывает все детали форм, которые имеют поверхности, соприкасающиеся с расплавом и таким образом участвующие в формовании определенного элемента отливки (матрицы, пуансоны, вставки, выталкиватели и т.д.).

Система литниковая объединяет все детали формы, участвующие в создании транспортного пути для расплава (запорные краны, распределители-коллекторы, литниковые втулки, плиты и втулки с разводящими и впускными каналами, а также газоотводящими каналами и т.д.).

Система транспортирования включает наряду с деталями, в которых выполнены каналы для охлаждающей жидкости или другого хладагента, ниппели, уплотняющие и герметизирующие детали, а также специальные термостаты, расположенные вне формы.

Системы перемещения и центрирования состоят из деталей, обеспечивающих перемещения, совпадающие и не совпадающие по направлению с рабочим движением литьевой машины-автомата (шиберы, поводки наклонные, кулисы, пружины, различного типа механические передачи), а также соосность оформляющих деталей формы (фланцы плит полуформ, направляющие колонки и втулки, штифты и отверстия для них в плитах, детали с отверстиями и пазами под встроенные пуансоны, матрицы и знаки и т.д.).

Система извлечения, удаления отливок и литников (система выталкивания) объединяет сталкивающие плиты, толкатели, штоки и тяги, хвостовик, пружины и т.д., обеспечивающие удаление (выталкивание) и сброс изделий, а также возвращение формы в исходное замкнутое положение; кроме того, к системе относятся устройства (гидравлические, пневматические, электрические или механические) и передачи, обеспечивающие свертывание резьбовых знаков и т.п.

Система установки, крепления форм включает несущие и крепежные детали.

Каждая из перечисленных систем имеет первостепенное значение для обеспечения работоспособности форм. Конструктор формы для литья под давлением должен принимать во внимание взаимодействие всех систем друг с другом и с литейной машиной-автоматом.

Классификация форм для литья под давлением должна учитывать конструктивно-технологические особенности отливаемых изделий, в частности: степень сложности поверхностей изделий (наружные и внутренние поверхности без поднутрений, гладкие; с поднутрениями, т.е. с локальными углублениями только на наружной или только на внутренней поверхности, например резьбовые поверхности; с поднутрениями на обеих поверхностях или со сложными криволинейными участками поверхности); качества размеров изделий (грубые, свыше IT14; нормальные, IT13–14; точные, меньше IT13).

Для учета этих особенностей принципиальным является правильный выбор расположения детали в форме, для чего можно руководствоваться следующими основными положениями: для удобного и легкого выталкивания пластмассового изделия из формы наибольшую поверхность его следует располагать параллельно плоскости размыкания (разъема) формы; обеспечивать кратчайший путь течения материала от литниковой втулки до оформляющей полости, избегая лобовых ударов и завихрений; стремиться к удержанию изделия вместе с литниками в подвижной полуформе (это может быть достигнуто за счет оформления внутренних полостей изделия знаками, закрепленными в подвижной полуформе, за счет обратных уклонов, поднутрений и т.д.); места подвода впускного литника выбирать, исходя из оптимизации условий заливки и трудоемкости последующего удаления литника; учитывать надежность установки и фиксации арматуры; наиболее точные элементы изделий располагать только в одной части формы (только в матрице или формовать их только пуансоном) и т.д.

В общем, чем сложнее поверхности и точнее размеры пластмассовых изделий, тем, естественно, сложнее, дороже и менее надежны в эксплуатации формы для литья под давлением.

Рассмотрим классификационные признаки форм.

Формы для литья под давлением разделяют на стационарные, полустационарные и ручные.

В стационарных формах весь цикл литья изделий и их удаление из формы осуществляются непосредственно на литейной машине-автомате. Форма не снимается с машины до окончания изготовления заданной программы выпуска изделий (или до ее ремонта – в случае необходимости).

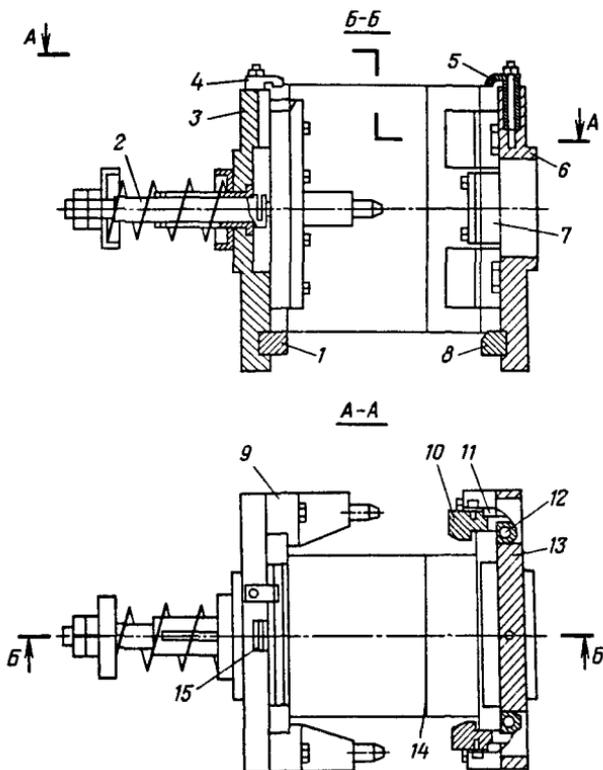


Рис. 3.3. Конструкция универсального блока для литья под давлением термопластов:

1 — упор; 2 — подпружиненный хвостовик; 3 — подвижная плита крепления; 4, 5 — крепежные Г-образные прихватки; 6 — неподвижная плита крепления; 7 — направляющие планки; 8 — упор; 9 — фиксирующий элемент; 10 — защелка; 11 — пластинчатая пружина; 12 — ось; 13 — эксцентриковый кулачковый упор; 14 — сменная форма; 15 — хвостовик

Полустационарные формы имеют съемные оформляющие кассеты, которые после каждого цикла литья извлекают из формы и разбирают вне рабочей зоны машины-автомата.

Ручные формы целиком извлекают из зоны формования после каждого цикла литья.

Применяют также стационарные и полустационарные формы, устанавливаемые на универсальных блоках. В комплект формы, устанавливаемой на универсальном блоке, входят лишь основные оформляющие детали (матрицы, знаки и др.), а вспомогательные детали (передние и задние плиты, литниковые плиты, обоймы и т.д.) включены в универсальный блок. Конструкции блоков разнообразны, зависят от типоразмеров отливаемых в формах изделий; на рис. 3.3 приведен один из вариантов.

На подвижной плите крепления 3 жестко закреплены фиксирующие

элементы 9, выполненные в виде направляющих планок, упор 1, крепежные Г-образующие прихваты 4 и подпружиненный хвостовик 2.

На неподвижной плите крепления 6 закреплены направляющие планки 7, упор 8, крепежные Г-образные прихваты 5 и фиксирующие элементы в виде установленных на осях 12 неподвижной плиты эксцентриковых кулачковых упоров 13 и защелок 10, каждая из которых снабжена пластинчатой пружиной 11, контактирующей с упором.

Вначале подвижную плиту сменной формы 14 в замкнутом положении задвигают в пазы фиксирующих элементов 9 подвижной плиты. При этом хвостовик 15 сменной формы 14 входит в паз хвостовика 2, соединяясь с ним.

Затем форма движется к неподвижной плите 6 крепления и, упираясь в защелки 10, поворачивает их вокруг осей 12.

При последующем движении форма, направляясь и центрируясь упором 8 и направляющими планками 7, нажимает на эксцентриковые кулачковые упоры 13, которые, поворачиваясь вокруг своих осей, деформируют пластинчатую пружину 11, создавая дополнительное усилие защелкивания. Далее форма продолжает двигаться до упора в неподвижную плиту 6 крепления, и защелки 10, защелкиваясь, фиксируют неподвижную часть формы. Части формы закреплены посредством крепежных и фиксирующих элементов.

При размыкании формы ее неподвижная часть поджимается к защелкам 10 эксцентриковыми кулачковыми упорами 13, и зазор, необходимый для защелкивания, выбирается. При этом устраняется возможный перекося неподвижной части формы.

Съем частей сменной формы производят в замкнутом или разомкнутом положении, выдвигая плиты формы из фиксирующих элементов 9 и защелок 10.

Стационарные формы для литья под давлением, в том числе устанавливаемые на универсальных блоках, разделяют на полуавтоматические (см. выше) и автоматические, обеспечивающие отделение и сепарацию литников от изделий при размыкании формы; на управляемые (т.е. снабженные датчиками, регистрирующими состояние расплава в течение всего цикла литья под давлением) и не управляемые (фактически не пригодны к работе в системе АСУТП).

Все формы, независимо от характера их связи с литьевой машиной-автоматом и системой управления ее работой, по количеству одновременно отливаемых изделий разделяются на одно- и многогнездные, а по интенсивности заполнения гнезд – на одно- и многовпускные (в одно гнездо).

Все формы для литья под давлением по важному признаку – направлению их размыкания (разъема) относительно горизонтальной оси литьевой машины-автомата – разделяют на следующие: с одной вертикальной плоскостью, с одной вертикальной плоскостью и раздвижными полуматрицами, с комбинированными разрезами (с одной основной и вспомогательными плоскостями; с основной, вспомогательной и дополнительной плоскостями и т.д.), в которых оформляющие детали

раскрываются параллельно и перпендикулярно оси машины. Формы с комбинированным разъемом применяются для деталей с поднутрениями, боковыми отверстиями и тому подобными элементами. Конструктивно они выполняются в виде клиновых или шиберных форм.

Дополнительные классификационные признаки форм для литья под давлением термопластов связаны с конструктивными особенностями (классификацией) функциональных систем форм. Например, литниковые системы по состоянию материала в них в момент окончания заполнения внутренней полости формы разделяют на холодноканальные (затвердевающие), горячеканальные (незатвердевающие) и комбинированные – см. с. 151. Формы разделяют также на термостатируемые (с различными вариантами конструктивного оформления системы – канальным, полостным, комбинированным) и нетермостатируемые – см. с. 178. Классификация стационарных форм предусматривает разделение их и по способу удаления изделий из формы: стержневыми или трубчатыми выталкивателями; плитой съема; комбинированным (ступенчатым) выталкиванием.

Формы с выталкивателями применяются в случаях, когда изделия достаточно жестки и прочны и на них допускаются следы выталкивателей, причем формы со стержневыми выталкивателями используются для изделий, имеющих достаточную поверхность для контакта с выталкивателями, а формы с трубчатыми выталкивателями – для изделий типа втулок.

Формы с плитой съема рекомендуются для тонкостенных изделий, исключающих возможность использования стержневых или трубчатых выталкивателей.

В формах со ступенчатым выталкиванием изделие сначала снимается со знака плиты съема, а затем выталкивается из этой плиты стержневыми выталкивателями (при этом используется механизм шариковой защелки).

### 3.2. Исходные данные для проектирования

**Данные об оборудовании.** Форма для литья под давлением должна проектироваться с учетом установки и эксплуатации ее на конкретной заданной (или выбранной) литейной машине-автомате. Это – обязательное условие, требующее изучения основных технических характеристик оборудования. Для термопласт-автоматов к основным параметрам относятся: объем впрыска, см<sup>3</sup>; давление впрыска, МПа; усилие замыкания (смыкания) формы, кН; производительность, кг/ч; важными являются также паспортные характеристики – объемная скорость впрыска, см<sup>3</sup>/с; наименьшее время запираения и раскрытия формы, с; наибольшее расстояние между плитами, мм; ход подвижной плиты (при наибольшей высоте формы), мм; наибольший ход выталкивателя, мм; расстояния между колоннами в свету по горизонтали и по вертикали, мм; наибольшая и наименьшая высоты формы, мм. Термопластавтоматы выпускают в СССР с характеристиками, соответствующими ГОСТ 10767–71, 17251–71.

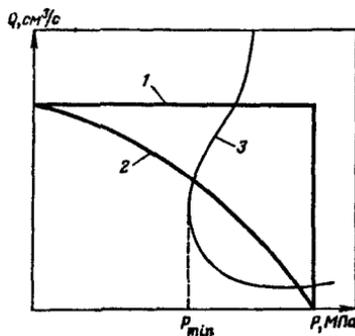
Данные об изделии, технологии, материале. Они должны быть подробно представлены в нормативно-технической документации. В чертеже изделия, выполненном в точном соответствии с требованиями ЕСКД, указывают: марку материала; размеры, допуски размеров и допускаемые отклонения от правильной геометрической формы, качество поверхностей (если это продиктовано необходимостью, условиями эксплуатации изделия); другие важные конкретные сведения, технические условия. Перед началом проектирования формы по чертежу изделия целесообразно оценить степень его технологичности, устранить замеченные несоответствия общим рекомендациям по технологичности (см. гл. 1), определить „рабочее” положение изделия при формовании. Помимо чертежа изделия должна быть задана программа его выпуска; желательно – технологическая карта литья под давлением изделия, для которого проектируется форма (или информация о времени технологического цикла изготовления, чтобы можно было оценить быстрходность термoplast-автомата, цикл/ч).

Рис. 3.4. Схема применения САПР форм для литья под давлением:

1 – включение; 2 – данные об изделии; 3 – нормализованные данные стандарта; 4 – конструкция формы; 5 – анализ конструкции формы; 6 – чертеж изделия; 7 – информация о форме; 8 – рабочие чертежи; 9 – цифровая программа; 10 – текст; 11 – технология; 12 – продукция

Рис. 3.5. Типичные инжекционные характеристики литьевой машины-автомата (ИХ) и сопротивления течению расплава в литьевой форме (ХСФ):

1 – ИХ для идеальной машины при  $Q = \text{const}$ ; 2 – ИХ для реальной машины; 3 – ХСФ для гипотетической литьевой формы



В случае модернизации конструкции формы (с целью повышения качества изделия или увеличения количества выпускаемых изделий; снижения трудоемкости, себестоимости производства, затрат энергии, экономии материалов и т.д.) используют также чертежи существующей формы. Необходимые сведения о технологических свойствах материалов устанавливают по соответствующим стандартам и справочникам.

Общая последовательность проектирования форм, включая обоснование выбора типа всей конструкции и отдельных функциональных систем ее, наиболее оптимально может быть реализована при использовании САПР. В настоящее время получают распространение различные варианты таких САПР форм для литья под давлением опирающиеся на банки данных об оборудовании, материалах, стандартах на типовые нормализованные детали форм, чертежи изделий и форм-аналогов. На рис. 3.4 показана возможная типовая схема применения САПР для проектирования формирующего инструмента.

### 3.3. Взаимосвязь формы с литьевой машиной

#### 3.3.1. Инжекционные, объемные и основные геометрические соотношения

Анализ основных технических характеристик литьевой машины приведен в работе [1].

Показателем достаточно точного соответствия формы и машины является полное заполнение внутренней полости формы расплавом на стадии впрыска. Это достигается при условии, что инжекционной характеристике (ИХ) машины, т.е. зависимости объемной скорости впрыска (расхода)  $Q$  от давления впрыска  $P$ , соответствует характеристика сопротивления течения расплава в литьевой форме (ХСФ). На графике (рис. 3.5) приведены указанные характеристики. Поскольку  $Q$  и  $P$  изменяются во время стадии заполнения полости формы, ИХ и ХСФ также непостоянны. Их определяют экспериментально или рассчитывают. При этом для оценки ХСФ используют формулу  $P = A Q^{1/n} + B / (1 + C Q^{1/2})$ , где  $A, B, C$  – коэффициенты, зависящие от конструкции и размеров литниковой системы, оформляющей полости, количества и места расположения впускных каналов, свойств формируемого термопласта и температуры его переработки под давлением;  $n$  – показатель текучести расплава термопласта.

Положение ХСФ на рис. 3.5 можно пояснить: при больших  $Q$  сопротивление течению расплава в форме становится значительным; при малых  $Q$  расплав в формирующей полости уже в стадии заполнения ее начинает интенсивно охлаждаться, что также увеличивает сопротивление течению в незастывших зонах и литниковых каналах. При некотором промежуточном значении  $Q$  требуется минимальное значение  $P = P_{\min}$  для заполнения оформляющей полости без недолива.

По мере износа литьевой машины ее ИХ сильно изменяется. Если отсутствует возможность экспериментально определить ИХ, можно пользоваться линейной аппроксимацией:  $Q(P) = Q_p \cdot P / P_{\max}$ , где  $P_{\max}$  –

максимальное давление впрыска: развиваемое узлом инъекции машины;  $Q_p$  — реальная объемная скорость впрыска. Для новых машин  $Q_p$  определяется по паспортным данным, для находящихся в эксплуатации — рассчитывается по формуле

$$Q_p = V_0 / \tau_{\text{впр.в}},$$

где  $V_0$  — объем пластифицированной дозы (желательно, чтобы он был возможно ближе к максимальному объему впрыска машины);  $\tau_{\text{впр.в}}$  — время впрыска в воздух.

Достижение соответствия ИХ и ХСФ в каждом конкретном случае связано с конструированием и расчетом литниковой системы. Далее, важно обеспечить соотношение объемов, при котором объем впрыска машины  $V_{\text{в}}$  должен превышать объем отливки  $V_0$ , получаемой в данной форме:  $V_{\text{в}} \gg V_0 k$ ;  $k = 1,3$ .

Объем отливки включает в себя также и объем массы в литниковой системе. Коэффициент  $k$  превышения  $V_{\text{в}}$  над  $V_0$  учитывает тот факт, что расплав, впрыскиваемый в форму, уменьшается в объеме вследствие охлаждения.

Взаимосвязь по геометрическим параметрам необходима в связи с тем, что в конструкциях машин предусмотрена возможность установки форм различной высоты  $h$  в направлении смыкания плит (см. рис. 3.2): расстояние между плитами в сомкнутом состоянии  $H$  регулируется в диапазоне от  $H_{\text{мин}}$  до  $H_{\text{макс}}$ . Очевидно, что форма может быть установлена на машину, если соблюдается условие

$$H_{\text{мин}} < h < H_{\text{макс}}.$$

Минимально необходимый ход разъема полуформ  $s$ , достаточный для того, чтобы изделие было вытолкнуто из нее и свободно упало в образовавшийся между полуформами разъем, не должен превышать максимального хода подвижной плиты машины  $S$ :

$$S > s = 2h_{\text{и}} + l + e,$$

где  $h_{\text{и}}$  — высота изделия;  $l$  — длина литника в направлении смыкания формы;  $e$  — запас по ходу разъема (достаточный, чтобы изделие выпало из разъема, не зависнув при этом на полуформах).

Если нет гарантии, что изделие будет падать в строго фиксированном первоначальном положении, то, предусматривая возможность поворота изделия во время падения на  $90^\circ$ , величину  $e$  следует принимать, пользуясь следующим очевидным из рис. 3.2 соотношением:  $e \geq L - (h_{\text{и}} + l)$ , где  $L$  — максимальный вертикальный размер изделия.

Если же изделие падает преимущественно в первоначальном положении, то величину  $e$  принимают равной 2–10 см (большие значения е принимают для изделий больших габаритов).

Во избежание раскрытия формы во время впрыска в нее расплава и выдержки под давлением усилие  $F_{\text{т}}$ , стремящееся разомкнуть форму и возникающее вследствие развития в оформляющей полости давления расплава  $p_0$  (см. рис. 3.2), не должно превышать усилия запираания  $F_{\text{м}}$ , развиваемого механизмом смыкания:  $F_{\text{м}} \geq F_{\text{т}}$ . Это условие автомати-

чески выполняется, если максимально допустимая площадь отливки  $f_m$ , которая может быть получена на конкретной машине, меньше фактической площади отливки  $f_0$ . Значения  $f_m$  приводятся среди технических характеристик большинства машин-автоматов.

Если характеристика машины не содержит величины  $f_m$ , то рассчитывают величину  $F_r = 0,8rf_0$ . Значение  $f_0$  определяется как площадь проекции отливки (включая литниковую систему) на плоскость разреза I-I (см. рис. 3.2), причем ось центрального литникового канала  $\delta$  формы должна совпадать с общей осью  $OO_1$  механизмов смыкания и впрыска. Это достигается центровкой полуформ на плитах посредством центровочных буртов с диаметром  $D_\phi$ , входящих по подвижной посадке в центральные отверстия плит с диаметром  $D_m$ . Опорные поверхности плит имеют Т-образные пазы или резьбовые отверстия для крепежа полуформ. Эти отверстия расположены по одной или нескольким окружностям с диаметром  $d_i$  (на рис. 3.2 это  $d_1$  и  $d_2$ ). Очевидно, диаметры окружностей крепежных отверстий у формы  $d_\phi$  и плит  $d_i$  должны быть равны. Таким образом, эти условия сопряжения конструкций формы и плит машины имеют следующий вид:  $D_m = D_\phi$ ;  $d_i = d_\phi$ .

### 3.3.2. Расчет гнездности формы

Расчет гнездности формы для литья под давлением проводят в двух направлениях: с учетом ограничений, налагаемых возможностями литьевой машины-автомата и технологической специфики перерабатываемых термопластов (технические оценки); с целью оптимизации экономических параметров производства, повышения его рентабельности (технико-экономические оценки).

Технические оценки для выбора числа гнезд проектируемой формы выполняют по формулам, приведенным в табл. 3.1. Можно отметить, что в практике проектирования редко встречается полное соответствие паспортных технических характеристик машин фактическим значениям, реализуемым в конкретной форме, для конкретного изделия. Из рассчитанных значений  $n_{V_B}$ ,  $n_A$ ,  $n_{F_M}$  для конструирования, разработки чертежей принимают, естественно, наименьшее:

$$n_n = \min[n_{V_B}, n_A, n_{F_M}].$$

В качестве ориентира правильности выбора числа гнезд и согласованности факторов, по которым проводится техническая оценка, может служить выполнение соотношения  $0,2n_{V_B} \leq n_A \leq 0,8n_{V_B}$  (коэффициенты 0,2 и 0,8 определяют степень использования объема впрыска машины).

Принятое значение  $n_n$  не должно быть больше:

1) числа  $n_f$ , зависящие от площади рабочей поверхности плит  $f_{пл}$  литьевой машины-автомата, т.е.  $n_n \leq n_f = 0,5f_{пл}/f_M$ ;

2) числа  $n_B$ , зависящие от линейных размеров  $B$  (ширины или высоты) рабочей части плиты машины и определяющего габаритного размера изделия  $L_n$ , т.е.  $n_n \leq n_B = 1,3B/L_n$  (при двух направлениях разреза частей

Таблица 3.1. Технические оценки гнездности форм для литья под давлением термопластов

| Фактор, по которому проводится оценка                  | Обозначение числа гнезд | Формулы для расчета*            |                         |
|--|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|  |                         | уточненная                      | упрощенная              |
| Объем впрыска $V_B$                                    | $n_{VB}$                | $\beta_1 V_B / (V_1 k_1)$       | $V_B / V_1$             |
| Пластификационная производительность машины-автомата А | $n_A$                   | $AT_{ц} / (\rho V_1 k_1)$       | $A / (z V_1)$           |
| Усилие замыкания формы $F_M$                           | $n_{FM}$                | $F_{MN} / (\rho_0 f_n k_2 k_3)$ | $F_{MN} / (\rho_0 f_n)$ |

\*  $V_1$  — объем одного изделия;  $k_1$  — коэффициент объема литниковой системы в расчете на  $V_1$  (для затвердевающих литников);  $\beta_1$  — коэффициент использования машины (0,75 для аморфных; 0,65 — для кристаллизующихся термопластов);  $T_{ц}$  — общее время технологического цикла;  $\rho$  — плотность термопласта;  $z$  — быстроходность машины;  $F_{MN}$  — номинальное усилие смыкания формы, развиваемое механизмом смыкания машины;  $\rho_0$  — давление формования (для полистирола — около 32 МПа);  $f_n$  — площадь проекции изделия на плоскость разъема формы (без учета отверстий в изделии);  $k_2$  — коэффициент учета площади литников в плане ( $k_2 = 1,1$ );  $k_3$  — коэффициент использования максимального усилия смыкания ( $k_3 = 1,25 + 1,11$ ).

формы в двух плоскостях);  $n_n \leq n_B = 0,65B/L_n$  (при трех направлениях разъема частей формы в двух плоскостях);  $n_n \leq 4$  (при трех направлениях разъема частей формы в трех плоскостях);  $n_n \leq 2$  (при четырех направлениях разъема частей формы в трех плоскостях);  $n_n = 1$  (при более чем четырех направлениях разъема частей формы в трех плоскостях).

Технико-экономические оценки при выборе оптимального числа гнезд форм для литья под давлением достаточно сложны, потому что многофакторны. Понятно, что сейчас, например, полная автоматизация работы формы достигается с меньшими затратами для одногнездной формы, которая в сравнении с многогнездными более проста по конструкции, надежна и экономична в эксплуатации, позволяет повысить качество отливок. При проектировании одногнездных форм в два–три раза сокращаются сроки разработок; это приводит к ускорению процессов освоения новой продукции.

При увеличении числа гнезд себестоимость отливки сначала до определенного предела снижается, а затем возрастает. Необходимо путем сопоставления общих затрат, т.е. суммы затрат на изготовление заданной партии изделий и формы, выбрать оптимальное число гнезд — такое, при котором затраты будут наименьшими.

Первоначально возможно оценить оптимальное число гнезд  $n_{\text{опт}} \leq n_n$  по следующей формуле:

$$n_{\text{опт}} = [C_{ц} \Pi / (0,45 C_{\phi})]^{1/2}.$$

Подробный технико-экономический анализ может быть проведен по формуле

$$n_{\text{опт}} = \left\{ (T_{ц} \Pi \tau_3 \sum_{i=1}^l O_i) / [C_{\phi} \Phi_o (K_o + E_n \tau_3)] \right\}^{1/2}.$$

Если известна (или можно рассчитать) стоимость  $C_{м.в}$  одного часа машинного времени, то можно применять формулу

$$n_{\text{опт}} = \{(C_{м.в.} + \tau_{\text{ч}})[T_{\text{ц}}\Pi/(3600C_{\text{ф}})]\}^{1/2}.$$

В формулах для расчета  $n_{\text{опт}}$  принято:  $C_{\text{ц}}$  – себестоимость одного цикла литья под давлением изделия;  $C_{\text{ф}}$  – себестоимость одного гнезда формы;  $\Pi$  – годовая программа выпуска изделия (значения  $C_{\text{ц}}$  и  $C_{\text{ф}}$  вычисляются или принимаются по нормативам);  $\tau_{\text{з}}$  – время действия заказа для выполнения программы выпуска  $q$  изделий;  $O_i$  – величина расхода по  $i$ -й статье ( $i = 1, \dots, q$ );  $l$  – номенклатура статей расходов, постоянных во времени;  $\Phi_0$  – оборотное число форм;  $k_0$  – число оборотных комплектов форм, используемых в период действия заказа;  $E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  $\tau_{\text{ч}}$  – часовая тарифная зарплата рабочего, обслуживающего форму.

Приведенные формулы корректируются в зависимости от серийности изделий. В величине  $C_{\text{ф}}$  иногда учитывают себестоимость изготовления и ремонта одного гнезда формы, что особенно важно для крупносерийного производства.

Производство изделий в форме для литья под давлением будет рентабельным, если стоимость изготовления форм с числом гнезд  $n_{\text{опт}} \leq n_{\text{п}}$  будет такого же порядка, как сумма зарплаты рабочего и всех амортизационных расходов за время эксплуатации формы.

### 3.4. Система оформляющих деталей

#### 3.4.1. Назначение и классификация

Система состоит из деталей, образующих оформляющую полость; ее назначение – обеспечение формования изделия заданного качества при оптимальном технологическом цикле.

Оформляющие детали (матрицы, пуансоны, знаки, плиты и т.д.) конструктивно многообразны, так как их контуры и размеры негативно повторяют геометрические особенности изделия.

Оформляющие детали (ФОД – формообразующие детали) разделяют по ряду признаков: характеру поверхностей формования – гладкие, резьбовые, с поднутрениями; состоянию поверхностей формования – зеркальные, матовые, шагреньевые; сложности – цельные, вставные, составные; точности формируемых элементов изделия – нормальные (квалитеты IT12–13), прецизионные (квалитеты IT9–11); способу перемещения подвижных формирующих элементов (см. с. 193); геометрической форме изделий – круглые, прямоугольные, кольцевые, трубчатые, корпусные и т.д.; технологии изготовления – механообработка, давление (холодное, полугорячее, горячее выдавливание), лазерная и электроискровая обработка, гальванопластика и т.д. Оформляющие детали помимо формирующих поверхностей имеют поверхности, участвующие: в сопряжениях с другими деталями

(посадочные, центрирующие); в контакте с ними (опорные, уплотняющие); попадающие в плоскость разъема формы (т.е. циклически охлаждающиеся – нагревающиеся).

### 3.4.2. Конструктивные особенности и расчетные схемы

Рассмотрим конструктивные особенности основных оформляющих деталей – матриц (гнезд) и пуансонов (знаков). Принципиальных отличий от конструкций таких же деталей для пресс-форм (см. с. 82) в формах для литья под давлением нет; аналогично решаются и задачи сборки, соединения этих деталей в соответствующих обоймах.

При конструировании матриц и пуансонов форм важным является установление оформляющей поверхности этих деталей. Для этого требуется окончательно определить положение изделия в форме, плоскость ее размыкания; характер перемещения изделия и оформляющих деталей при удалении изделия из формирующей полости. Таким образом, поверхность изделия распределяется между оформляющими деталями. Поскольку места их стыка оставляют на поверхности изделия следы, важно, чтобы эти стыки совпадали с естественными переходами поверхностей. На стыках должно обеспечиваться точное совпадение кромок по высоте, по плотности сопряжения, для чего недопустимы „завалы” острых кромок. Точное совпадение стыков требует их совместной доводки, обеспечения высокого качества поверхности деталей ( $Ra$  0,016–0,020 и выше).

Помимо распределения поверхности изделия определяют положение оси изделия относительно оси формы, что позволяет выделить в матрице, на пуансоне другие функциональные поверхности – посадочные, опорные, уплотняющие и т.д. Опорные (замыкающие) поверхности воспринимают усилие смыкания, удерживая полуформы в замкнутом состоянии; уплотняющие – герметизируют полость формы и т.д. Ось изделия не всегда совпадает с направлением замыкания – размыкания машины-автомата, и тогда требуется применять разъемные полуматрицы.

**Особенности цельных пуансонов и матриц.** Такие конструкции менее надежны в эксплуатации (из-за их износа, смещения осей возможно затекание расплава, облой), но более прочны, лучше противостоят внешним нагрузкам. В них достаточно удобно (если позволяют размеры) размещаются выталкиватели, охлаждающие каналы. На рис. 3.6 показаны конструкции и способы крепления цельных пуансонов. Цельные матрицы применяют в одногнездных формах, чаще – для больших изделий. В многогнездных формах цельные матрицы применяют с целью возможного сближения гнезд, уменьшения размеров формы (если это необходимо, исходя из имеющегося парка оборудования).

В цельных пуансонах и матрицах часто применяют вставки для образования локальных рельефных подробностей конфигурации изделия или закрепления других деталей. Пример конструкции

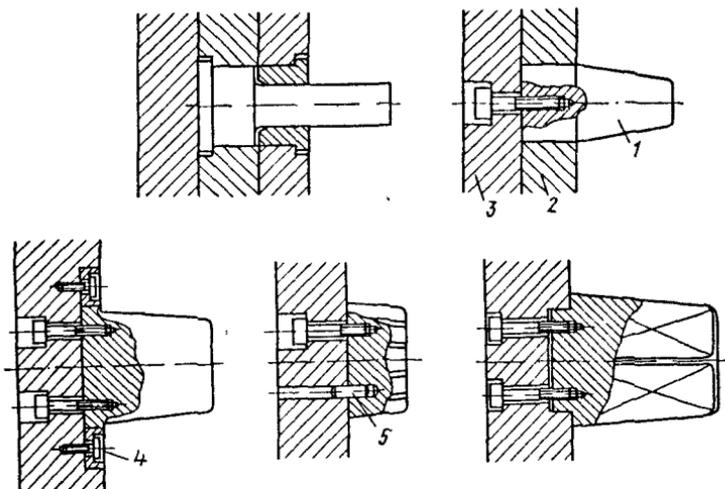


Рис. 3.6. Примеры конструкций и способов крепления цельных пуансонов форм:  
 1 — пуансон; 2 — плита пуансонодержателя; 3 — опорная плита; 4 — кольцо; 5 — штифт

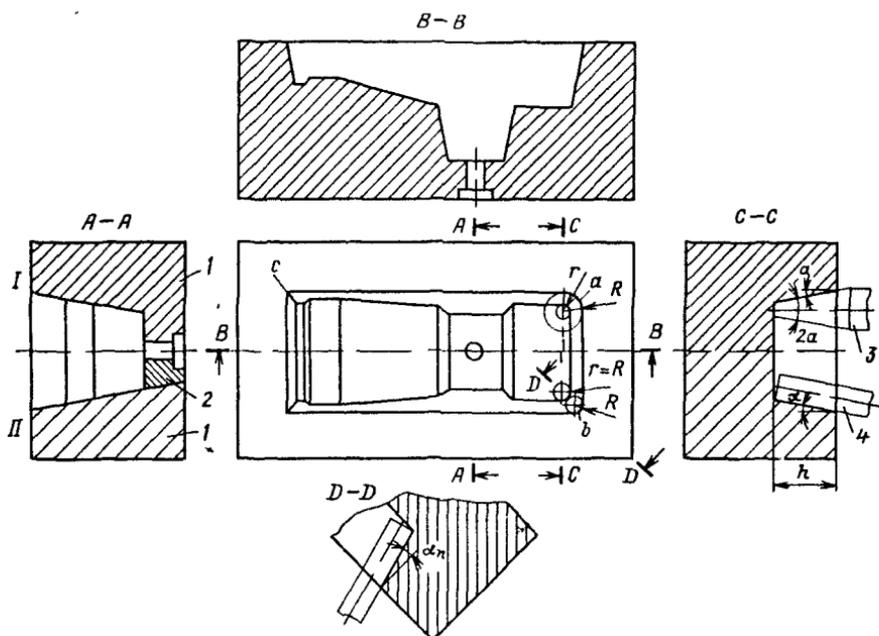


Рис. 3.7. Цельная матрица (I) и со вставкой (II):

1 — матрица; 2 — вставка; 3 — след конической фрезы для образования кромки по типу а ( $R > r$ );  
 4 — след цилиндрической фрезы для образования кромки по типу б ( $R = r$ ); кромка, выполненная по  
 типу с — острая

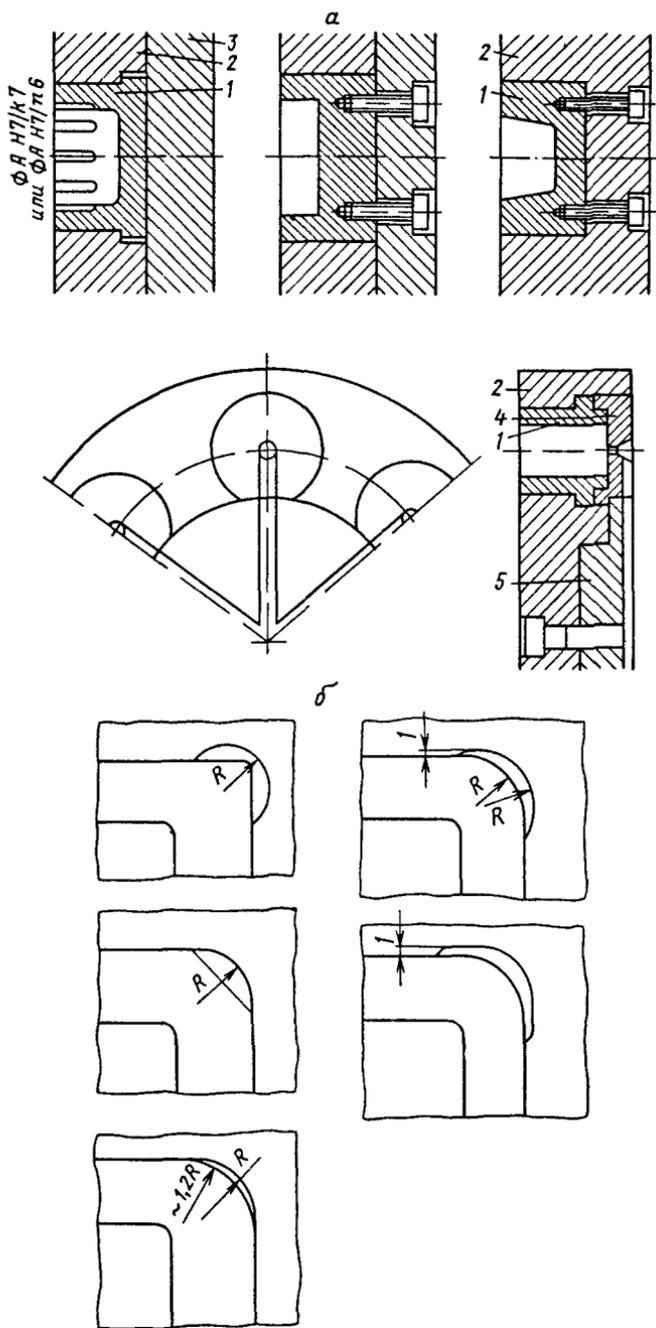


Рис. 3.8. Примеры способов крепления (а) и соединения с обоймой (б) цельных матриц:  
 1 – матрица; 2 – обойма матриц; 3 – опорная плита; 4, 5 – вставки

цельной матрицы со вставкой приведен на рис. 3.7, примеры способов их крепления – на рис. 3.8.

Цельные пуансоны и матрицы выполняют из крупных локовок легированных сталей, и несмотря на меньшую трудоемкость изготовления и сборки по сравнению с составными конструкциями это удорожает их стоимость.

**Особенности составных пуансонов и матриц.** Составные оформляющие детали конструируют, когда необходимо изготавливать изделия с поднутрениями, высокими ребрами при относительно небольшой толщине стенок, значительным количеством пазов, отверстий, расположенных как в направлении главного движения полуформ, так и перпендикулярно ему. Разнообразие вариантов конструкции, связанное с разнообразием изделий, очень велико, и общие рекомендации сводятся к следующим: элементы составных пуансонов и матриц должны быть прочными, а места их стыков – герметичными. Целесообразно создавать автоскрепленные конструкции, позволяющие рассматривать составную деталь как монолитную, но допускается применять и дополнительные крепления, конструктивные пазы и буртики и т.д.

При конструировании пуансонов и матриц особое значение приобретает опыт, конструкторская интуиция, активное использование знаний общинженерных дисциплин.

**Расчетные схемы.** Оформляющие детали форм для литья под давлением в процессе их конструирования рассчитывают: во-первых, с целью определения исполнительных размеров тех элементов, поверхности которых участвуют в формовании изделий (методика аналогична рассмотренной в разд. 2.2.4, но с учетом усадки и колебания усадки материалов, перерабатываемых литьем под давлением – см. табл. 3.2); во-вторых, с целью обеспечения прочности отдельных элементов и детали в целом; в-третьих, с целью обеспечения точности сборки и сохранения ее при эксплуатации, обеспечения определенности посадок деталей в обоймы, плиты и т.д.

Расчеты (или обоснование выбора посадок, особенно с натягом) выполняют традиционно по методикам, основанным на теории допусков и посадок. Такие расчеты приводят при конструировании сборных пуансонов и матриц, когда вставки или другие детали запрессовываются с натягом одна в другую. При этом особенно важно оценивать возникающие деформации тех поверхностей (элементов) пуансонов и матриц, которые непосредственно формируют изделие (значения этих деформаций не должны превышать требований, установленных качественными параметрами изделий).

Расчеты прочности пуансона и матриц форм имеют целью, как это отмечено в разд. 2.2.3, определение рациональных толщин стенок. Расчеты прочности дополняются расчетами деформаций особо нагруженных деталей. Основным исходным параметром, регламентирующим результаты прочностных и деформационных расчетов в формах, является давление впрыска расплава в форму, под действием которо-

Таблица 3.2. Усадка и колебание усадки термопластов при литье под давлением

| Группа материалов (по колебанию усадки $\Delta S$ , %).<br>Марки                     | Пределные значения усадки<br>$S_{\min} - S_{\max}$ , % | Стандарт, технические условия    |
|--|--|----------------------------------|
| Св. 0,1 до 0,16<br>Антегмит АТМ-2  | 1,1-1,2  | ТУ 05-031-502-77                 |
| Св. 0,16 до 0,25<br>Сополимеры полистирола:<br>МС, МСК                               | 0,4-0,6  | ГОСТ 12271-76                    |
| САН-С  | 0,2-0,4  | ТУ 6-05-041-369-76               |
| Полиамид 610-11-106 (с тальком)  | 0,8-1,0  | ОСТ 6-05-40С-75                  |
| Поликарбонаты:<br>ПК-1   | 0,6-0,8  | ТУ 6-05-1668-80                  |
| ПК-2, ПК-5, ПК-6   | 0,5-0,7  |                                  |
| ПК-3   | 0,4-0,6  |                                  |
| Св. 0,40 до 0,60<br>Полистирол:<br>блочный и суспензионный<br>оптического назначения | 0,4-0,8<br>0,4-0,8                                     | ГОСТ 20282-74<br>ТУ 6-05-1728-75 |
| ПСМ-О, ПСМ-С   |  |                                  |
| АБС-пластики   | 0,3-0,7  | ТУ 6-05-1587-79                  |
| Полиамиды стеклонаполненные  | 0,2-0,6  | ОСТ 6-05-408-75                  |
| Поликарбонат стеклонаполненный   | 0,2-0,6  | ТУ 6-05-211-1080-80              |
| Сополимер формальдегида СФД-31-4   | 1,8-2,2  | ТУ 6-05-211-1038-76              |
| Св. 0,60 до 1,0<br>Полистирол ударопрочный   | 0,4-1,2  | ОСТ 6-05-406-75                  |
| Этрол ацетилцеллюлозный  | 0,2-0,9  | ТУ 6-05-1528-72                  |
| Св. 1,0<br>Полиэтилен:<br>низкой плотности   | 1,0-2,0  | ГОСТ 16337-77                    |
| высокой плотности  | 1,0-2,5  | ГОСТ 16338-77                    |
| Полипропилен   | 1,0-2,5  | ТУ 6-05-1756-78                  |
| Полиамид-6   | 1,0-2,0  | ОСТ 6-06-С9-76                   |
| Полиамид-610   | 0,8-2,0  | ОСТ 6-05-408-75                  |

Примечание. Указанные значения усадки установлены по ГОСТ 18616-80.

го в оформляющих деталях развиваются напряжения, приводящие к деформациям или – в аварийных ситуациях – к разрушению деталей по опасным их сечениям. Такие расчеты выполняют по известным методам сопротивления материалов. Важно только правильно представить схему распределения сил применительно к конкретной конструкции пары „пуансон – матрица” и сопряженных с нею других деталей формы.

Напомним, что полость формы для литья под давлением испытывает максимальное давление в период ее полного заполнения. Величина этого давления определяется многими факторами, подробно рассмотренными в работе [1]: вязкостью расплава; толщиной и протяженностью изделия, т.е. конфигурацией полости формы; геометрическими особенностями литниковой системы, т.е. числом гнезд, впускных кана-

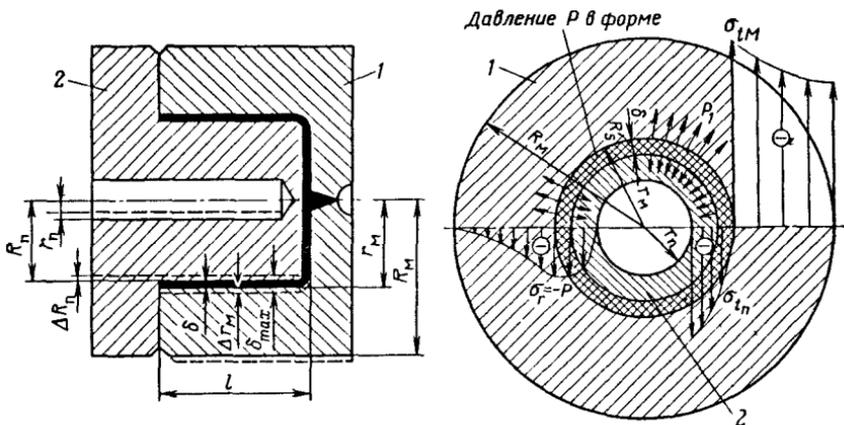


Рис. 3.9. К расчету деформативности и прочности гнезда формы (цельные конструкции матрицы и пуансона):

$\alpha$  — схема гнезда и размеры;  $\delta$  — эпюра напряжений; 1 — матрица; 2 — пуансон

лов, их размерами; давлением впрыска расплава, обеспечиваемого машиной; другими факторами. Величина максимального давления литья в форме должна предварительно рассчитываться или устанавливаться (см. реологические расчеты, с. 000).

Давление в форме не равномерно. Градиент давления зависит от конфигурации полости. От характера затекания расплава в полость зависит прочность и равнопрочность изделия; равномерность усадочной деформации, т.е. точность размеров; анизотропия свойств, определяемая ориентацией макромолекул. Поэтому полость формы должна конструироваться с учетом особенностей этого процесса, а не путем простого негативного копирования конфигурации изделия (т.е. обязателен анализ технологичности изделия — см. с. 174).

Рассмотрим кратко методику проведения расчетов деформативности и прочности оформляющих деталей на примере цельных матрицы и пуансона, образующих цилиндрическое гнездо (рис. 3.9). Расплав заполняет полость формы и в ней развивается давление  $P$ , действующее на матрицу (внутренний размер  $r_m$ , наружный —  $R_m$ ) и пуансон (наружный размер  $R_n$ , внутренний —  $r_n$ ). В результате действия этого давления формирующая поверхность матрицы (иначе — ее размер  $r_m$ ) будет деформироваться на величину  $\Delta r_m$ ; по аналогии — деформация пуансона (иначе — его размер  $R_n$ ) на величину  $\Delta R_n$ . Тогда максимальное изменение номинальной толщины стенки изделия ( $\delta = r_m - R_n$ ) будет:

$$\delta_{\max} = \delta + \Delta r_m + \Delta R_n.$$

Но сумма  $\Delta r_m + \Delta R_n < 2\delta S$  ( $S$  — усадка, мм/мин). Для определения величин  $\Delta r_m$  и  $\Delta R_n$  обратимся к эпюре напряжений, возникающих в

матрице и пуансоне (рис. 3.9, б) под действием давления литья  $P$ . Если оценить на основании применения теоремы Лямэ тангенциальные напряжения на поверхности пуансона и матрицы, то получим

$$\sigma_{tп} = P(R_{п}^2 + r_{п}^2)/(R_{п}^2 - r_{п}^2); \quad \sigma_{tм} = P(R_{м}^2 + r_{м}^2)/(R_{м}^2 - r_{м}^2).$$

Тангенциальные деформации будут равны:

$$\varepsilon_{tп} = \Delta R_{п}/R_{п} = 1/E(\sigma_{tп} - \nu P);$$

$$\varepsilon_{tм} = \Delta r_{м}/r_{м} = 1/E(\sigma_{tм} - \nu P).$$

Решая совместно приведенные уравнения, получаем значения  $\Delta R_{п}$  и  $\Delta r_{м}$  (в мм):

$$\Delta R_{п} = R_{п}[(R_{п}^2 + r_{п}^2)/(R_{п}^2 - r_{п}^2) - \nu](P/E);$$

$$\Delta r_{м} = r_{м}[(R_{м}^2 + r_{м}^2)/(R_{м}^2 - r_{м}^2) + \nu](P/E).$$

Если пуансон не имеет внутренней полости (ее делают, например, как канал для охлаждающей воды), то зависимость для  $\Delta R_{п}$  упрощается

$$\Delta R_{п} = R_{п}(1 - \nu)(P/E).$$

В приведенных выражениях  $\nu$  – коэффициент Пуассона (для стали  $\nu = 0,3$ );  $E$  – модуль упругости при растяжении (для стали  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа).

Толщина стенки матрицы характеризуется отношением  $k_{м} = r_{м}/R_{м}$ , а пуансона –  $k_{п} = r_{п}/R_{п}$ . Эти отношения можно определить через соответствующие тангенциальные деформации  $E, P$  и  $\nu$ :

$$k_{п} = [(A - 1)/(A + 1)]^{1/2}; \quad k_{м} = [(B - 1)/(B + 1)]^{1/2};$$

$$A = [(\Delta R_{п}/R_{п})(E/P) + \nu]; \quad B = [(\Delta r_{м}/r_{м})(E/P) - \nu].$$

Приведенные выше зависимости, анализ эпюр напряжений позволяют провести проверочные расчеты размеров матрицы и пуансона на прочность (см. разд. 2.2.3).

При проектировании оформляющих деталей проверочный расчет на прочность и деформативность следует проводить для цельных и составных (круглых и прямоугольных) обойм матриц.

## 3.5. Литниковые системы

### 3.5.1. Назначение и классификация

Основное назначение литниковой системы – транспортирование расплава от сопла машины-автомата к форме за возможно более короткое время (т.е. возможно более коротким путем) с минимальными потерями расплавом энергии и создание благоприятных условий для интенсивного и качественного заполнения расплавом оформляющей полости. Простота или сложность конкретных конструкторских решений зависит от большого числа факторов, учет которых требует, как правило, рассмотрения многих компромиссных вариантов. Среди

этих факторов главные – тип материала, особенности изделия, программа выпуска изделия.

Литниковая система существенно влияет на работоспособность формы; именно из-за неточностей, неполадок в этой системе вероятнее всего получают недоливы, раскрываются или „дышат“ сомкнутые формы, приводя к образованию облоя на изделии, возникают значительные или многочисленные области „холодных“ спаев потоков массы, заполняющей полость формы, появляются затруднения со своевременным отводом воздуха из литниковых каналов и полости формы по мере их заполнения расплавом (а это приводит к растворению газа в расплаве, к созданию в полости противодействия, способствующего недоливам; расположение газоотводящих каналов непосредственно зависит от особенностей литниковой системы). От конструкции литниковой системы зависят: производительность процесса (возможно прямо влиять на время впрыска расплава), качество изделия (возможно влиять на ориентацию материала, однородность температуры расплава, заполняющего полость и т.д.), экономия материала (можно сокращать или полностью ликвидировать отходы в виде затвердевших литников).

Классификация литниковых систем выделяет системы с затвердевающими, незатвердевающими и частично затвердевающими (точнее – затвердевающими только на отдельных участках, вблизи полости формы) литниками. Соответственно этому формы для литья под давлением и литниковые системы получили название холодноканальных, горячеканальных и комбинированных. Конструкции литниковых систем варьируются в зависимости от гнездности формы, числа впусков в одно гнездо, расположения литниковых каналов (в плане и относительно плоскости размыкания формы), конфигурации каналов и т.д. Все это позволяет классифицировать литниковые системы по соответствующим признакам. Выделим основные.

1. Структура элементов литниковой системы. Как видно из рис. 3.10, литниковая система состоит из трех элементов: основного литникового канала, по которому расплав из материального цилиндра поступает в форму; разводящего канала, ответвляющегося от основного в сторону оформляющего гнезда; впускного канала, по которому расплав

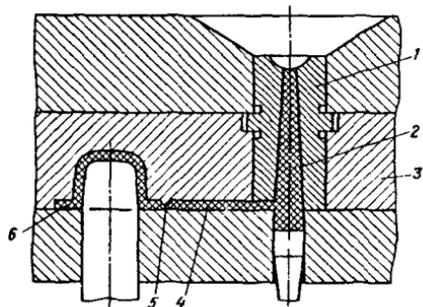


Рис. 3.10. Структура элементов литниковой системы:

1 – литниковая втулка с основным каналом; 2 – центральный литник; 3 – плита литниковая; 4 – разводящий литник; 5 – впускной литник; 6 – изделие

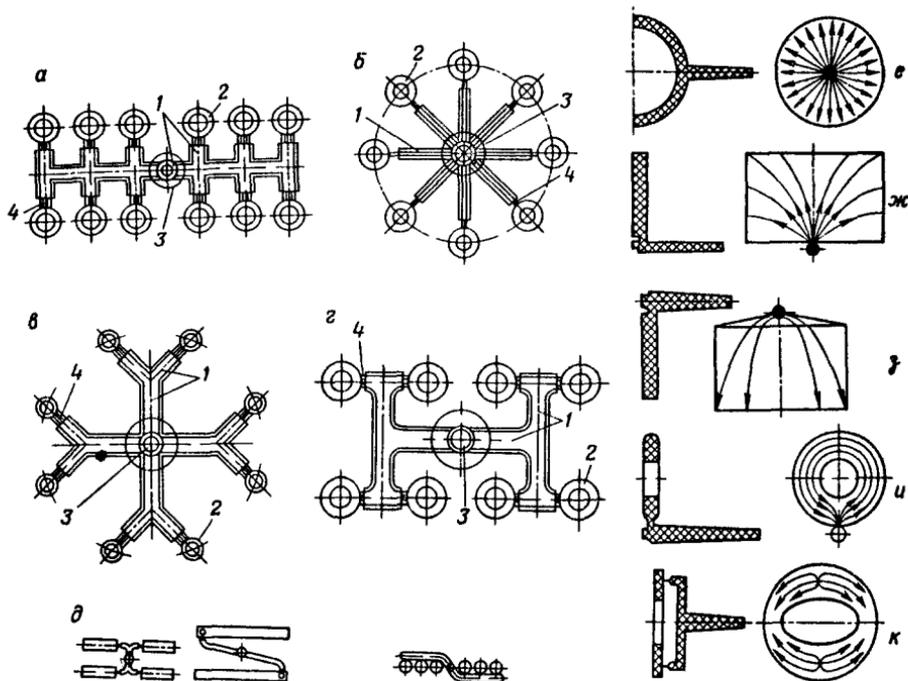


Рис. 3.11. Схемы расположения литниковых и впускных каналов (а – д) и движения расплава в полостях формы (е – к):

а – прямолинейное расположение, б – радиальное, в – радиальное с разветвляющимися разводящими каналами, г – комбинированное, д – параллельное и рядное, е – центральный литник, ж – точечный литник для плоскости, з – щелевой литник, и – точечный литник для кольца, к – точечный литник с двумя впусками; 1 – разводящий канал; 2 – изделие; 3 – основной канал; 4 – впускной канал

непосредственно поступает в оформляющую полость. В зависимости от конструкции изделия и формы литниковые системы могут иметь: все три элемента, первый и третий, только первый (например, в одногнездных формах, особенно для крупногабаритных изделий, в оформляющую полость материал поступает прямо из основного канала), только третий.

Основной канал выполняют в литниковой втулке, в этом канале образуется центральный литник. Разводящие каналы выполняют в литниковой плите (или в обойме матрицы – по плоскости разреза), в них образуются разводящие литники. Впускные каналы (с впускными литниками) являются продолжением разводящих каналов.

2. Расположение литниковых разводящих и впускных каналов. На рис. 3.11 показаны возможные варианты расположения каналов с одним впуском в одно гнездо.

Прямолинейное расположение позволяет разместить большое число гнезд при относительно малой массе литников, удобно расположить охлаждающие каналы. Заполнение гнезд происходит неравномерно, ближние к литнику изделия охлаждаются раньше и изделия получают разного качества (по точностным и прочностным параметрам). Радиальное расположение позволяет одновременно заполнить все гнезда, но конструктивно такое расположение охлаждающих каналов неудобно. При необходимости увеличивать число гнезд разводящие каналы удлиняются и увеличивается сечение основного литника, а это приводит к увеличению сопротивления течению массы и падению давления в оформляющей полости. Это в значительной степени устраняется при радиально-разветвляющемся расположении.

В каждом конкретном случае можно рационально расположить разводящие и впускные каналы, т.е. так, чтобы заливка всех гнезд происходила одновременно. Принципиально любой тип расположения впускных каналов может быть реализован и в холодно-, и в горячеканальных литниковых системах, но в первых – большие возможности для разнообразия.

3. Сбалансированность системы. По этому признаку литниковые системы делятся на сбалансированные и несбалансированные. Последние требуют специальной корректировки размеров поперечных сечений и протяженности разводящих и впускных каналов для обеспечения одновременности заполнения всех гнезд формы расплавом. Это особо важно при соответствующих требованиях к качеству изделий для прямолинейного, параллельного и рядного расположения гнезд в многогнездных формах, а также при литье под давлением в одной многогнездной форме разных изделий, несколько различающихся по массе и размерам (в этом случае по существу должны решаться одновременно задачи распределения масс и синхронности заполнения гнезд).

### 3.5.2. Холодноканальные литниковые системы

**Центральный литниковый канал.** Он является либо частью литниковой разветвленной системы, либо единственным ее элементом. В последнем случае его обычно используют для одногнездных форм и располагают в центре изделия (если оно симметрично), при переработке высоковязких и термочувствительных термопластов, при изготовлении тонкостенных изделий. Центральный литник оформляется в центральной литниковой втулке. Эти втулки стандартизованы (ГОСТ 22077–76), но часто применяют и специальные конструкции. Конструкция и примеры установки стандартной литниковой втулки представлены на рис. 3.12.

Угол у вершины конусного отверстия литниковой втулки равен  $3^\circ$  (в практике допускается  $2-4^\circ$ ).

Центральный литник на выходе закругляют ( $R = 1 \div 3$  мм). Литниковую втулку по высоте можно делать на 0,2 мм меньше толщины плиты, в которой она установлена, чтобы компенсировать возможную

деформацию при прижиге сопла к литниковой втулке. Для нормального касания этих деталей при смыкании формы радиус сферы втулки надо делать на 0,5–1,0 мм больше, чем радиус сферы сопла машины. Отверстие литниковой втулки полируют до зеркального блеска. При переработке материалов, расплавы которых вызывают коррозию металлов, на внутреннюю поверхность втулки дополнительно наносят твердое хромовое покрытие.

Наибольший диаметр литника  $D$  (на выходе из втулки) для одногнездной формы рекомендуется принимать на 1–1,5 мм больше максимальной толщины изделия. Наименьший диаметр  $d$  литника (на входе во втулку) зависит в большей степени от массы отливки, а также от типа перерабатываемого термопласта.

Длина центрального литника  $l$  принимается  $l \leq (5 + 9)d$ . В одногнездных формах центральный литник может оказаться и вне центра отливки (особенно это характерно для сложных несимметричных изделий). Это приводит к неравномерному распределению давления впрыска, перекосу формы, образованию облоя и даже поломке механизма замыкания. Во избежание этого необходимо, чтобы равнодействующая усилия замыкания по возможности совпала с осью центрального литника. В сложных формах необходимо определить положение центра тяжести и тем самым положение гнезд в форме. Положение центра тяжести для каждой оси можно получить из соотношения  $x_m = \frac{\sum(f_{\text{п}} x_i)}{(\sum f_{\text{п}})}$ , где  $x_m$  – расстояние от оси машины до центра тяжести отливки, мм;  $f_{\text{п}}$  – площадь проекции поверхности разема, мм<sup>2</sup>;  $x_i$  – расстояние до центра тяжести элемента отливки, мм.

В центральной втулке (непосредственно за литниковой втулкой – см. рис. 3.12) предусмотрено специальное гнездо с обратным кожухом для улавливания первой охлажденной порции массы и удержания центрального литника (или всей разветвленной литниковой системы) в подвижной полуформе.

**Разводящие литниковые каналы.** Поперечное сечение разводящих литниковых каналов определяется тем обстоятельством, что при впрыске расплава в литниковую систему наибольшей подвижностью и наибольшей скоростью обладает материал в центре потока, так как периферийные, близкие к стенкам канала зоны быстрее охлаждаются и расплав в них становится более вязким. Поэтому отношение площади поверхности разводящего канала  $f_{\text{р.к}}$  к его объему  $V_{\text{р.к}}$  должно быть наименьшим, а отношение этой площади к периметру поперечного сечения  $\Pi_{\text{р.к}}$  наибольшим. Одновременно с уменьшением передачи тепла от расплава к стенкам разводящего канала (при  $\Pi_{\text{р.к}} \rightarrow \min$ ) и улучшением передачи давления (при  $f_{\text{р.к}} \rightarrow \max$ ) возможно при прочих равных условиях и обеспечить рациональную экономию материала, идущего на разводящие литники.

На рис. 3.13 представлены несколько типов поперечного сечения разводящих каналов и значения отношений  $f_{\text{р.к}}/\Pi_{\text{р.к}}$ . При этом  $f_{\text{р.к}} \leq f_{\text{пр}}/n_{\text{р.к}}$ , где  $f_{\text{пр}}$  – наибольшая площадь поперечного сечения той

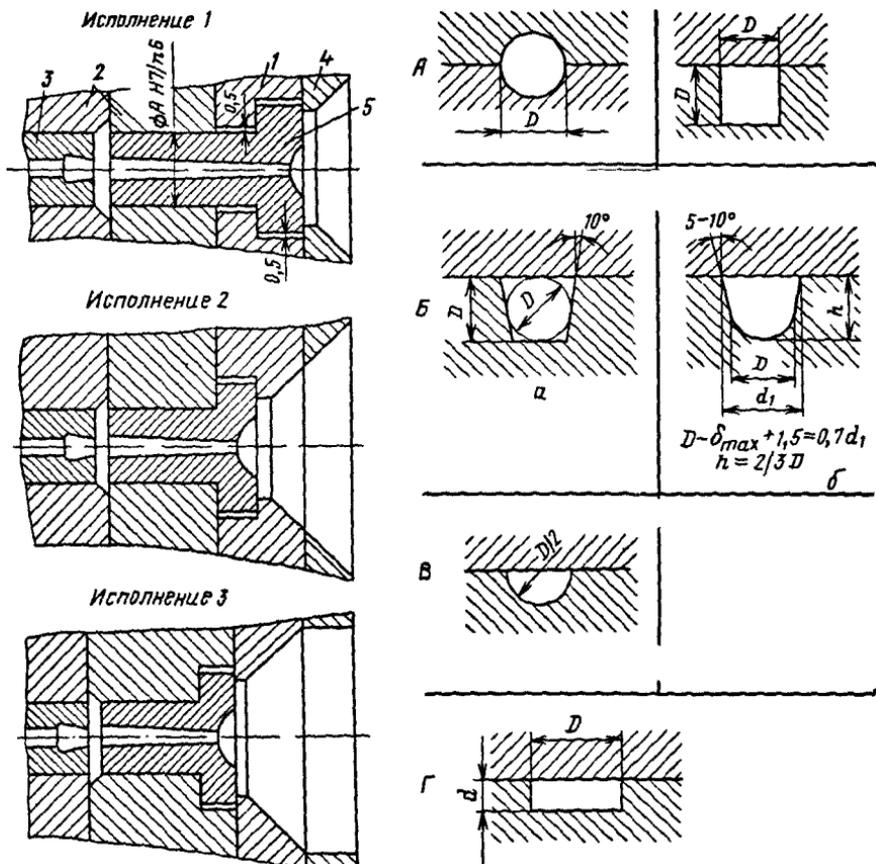


Рис. 3.12. Конструкция и примеры установки стандартной центральной литниковой втулки:

1 — плита крепления (заготовка по ГОСТ 22066—76); 2 — плита (заготовка по ГОСТ 20065—76); 3 — втулка центральная (по ГОСТ 22078—76); 4 — фланец (заготовка по ГОСТ 22081—76); 5 — втулка литниковая (по ГОСТ 22077—76)

Рис. 3.13. Распространенные типы поперечного сечения разводящего литникового канала. Отношение площади сечения канала к его периметру  $f_{p,к}/\Pi_{p,к}$  равно:

А —  $0,25 D$ ; Б —  $0,25 D$  (для а) и  $0,2 D$  (для б); В —  $0,153 D$ ; Г —  $0,166 D$  (при  $d = D/2$ ),  $0,1 D$  (при  $d = D/4$ ) и  $0,071 D$  (при  $d = D/5$ )

части канала, которая предшествует рассчитываемой;  $n_{p,к}$  — число разводящих каналов.

Размеры канала зависят от размеров отливки, вида формы и перерабатываемого материала. Поперечное сечение литникового канала должно быть тем больше, чем крупнее отливка, а при одинаковых отливках — чем больше толщина стенок. Большое поперечное сечение

облегчает заполнение формы, так как сопротивление течению здесь меньше, чем в небольших каналах. Разводящие каналы могут располагаться в той полуформе, где оформляется изделие, или в обеих полуформах.

Оптимальным является круглое сечение канала, при котором минимальны потери тепла и на трение при течении расплава по каналу, но его надо делать в двух полуформах, поэтому чаще используют более технологичное параболическое сечение каналов. Для термoplastов повышенной вязкости используют трапециевидные каналы со скошенными кромками.

Для деталей массой менее 200 г диаметр основного разводящего канала  $D$  (в мм) определяется по эмпирической формуле  $D = G^{1/2} L^{1/4} / 8$ , где  $L$  – длина канала, мм;  $G$  – масса детали, г.

Величина поперечного сечения разводящего канала зависит от его протяженности, а увеличение длины приводит к повышению потерь давления в литниках, увеличению ориентационных напряжений в изделии. При небольшой длине канала на практике редко делают сечение с наибольшим размером менее 3 мм.

Разводящие литники используются не только в многогнездных формах. Если изделие имеет сложную конфигурацию, например кольцо, то с целью ускорения заливки применяют несколько впусков в одногнездной форме, а это требует разводки расплава. Для таких изделий конструируют разводящий (и впускной) литник в виде кольцевой щели. При изготовлении длинных трубчатых изделий используют дисковые разводящие литники, а крупногабаритных плоских изделий – широкощелевые или пленочные разводящие литники. В таких литниках в середине потока материал может иметь большую скорость, чем на периферии; чтобы избежать этого, надо корректировать размеры щели.

**Впускные литниковые каналы.** Впускные каналы являются продолжением разводящих; они представляют собой суженную часть канала, непосредственно примыкающую к полости формы. Канал сужается с целью повышения скорости впрыска расплава в полость, повышения его температуры, текучести. Выбор места впуска связан с необходимостью обеспечения наименьшего пути течения массы, а также с движением потока по тому направлению, которое совпадает с направлением действующих при эксплуатации изделий наибольших усилий (следует принимать во внимание и перетекание расплава по полости формы от более толстых элементов изделия к более тонким). Важнейшей задачей является правильное конструирование переходного участка от разводящего к впускному литнику. Идеальное расположение впускного канала – по линии центра разводящего канала (это обеспечивает перетекание расплава в полость формы до полного затвердевания впускного литника). Такое расположение достигается только при круглом разводящем канале. Трапециевидный разводящий канал с этой точки зрения неудовлетворителен.

Переход от разводящего канала к впускному нецелесообразен, так

как при этом увеличиваются потери давления, а скорость течения повышается прежде, чем расплав попадает во впускной канал. Кроме того, остывающий на стенках канала материал „срывается” и попадает в оформляющую полость, что снижает качество изделия. Размеры и расположение впускных каналов определяются свойствами термопласта и особенностями изделия (его толщиной, объемом и т.п.). Впускной литник должен иметь минимальные размеры, хорошо извлекаться из формы и легко отделяться от изделия, не оставляя на нем заметных следов. Но чрезмерное уменьшение сечения впускных каналов увеличивает потери давления и ухудшает условия заполнения формы, сильный дополнительный разогрев материала может привести к его деструкции. На рис. 3.14 показаны разнообразные возможные виды впускных каналов. Чаще всего применяют впускные каналы круглого и прямоугольного сечений (в последнем случае изменением высоты регулируют выдержку под давлением, а ширины – условие заполнения гнезда).

При определении размеров поперечного сечения впускного канала надо учитывать, что впрыск связан с идущими одновременно двумя процессами – заполнения полости формы и уплотнения массы. Определяющим фактором при этом является скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ , которая должна быть тем меньше, чем уже температурный интервал переработки термопласта. Другой фактор – время, в течение которого расплав должен оставаться во впуске незатвердевшим, что необходимо для уплотнения массы в полости. Предварительно размеры впускного канала рассчитывают эмпирически по соотношению

$$f_{в.к} \leq f_0 / n_{в.к},$$

где  $f_{в.к}$ ,  $f_0$  – площади поперечного сечения впускного и основного центрального (на входе) каналов соответственно;  $n_{в.к}$  – число впускных каналов.

Глубина впускного канала  $h$ , от которой зависит время уплотнения массы, определяется по соотношению

$$h = k \delta,$$

где  $\delta$  – толщина изделия;  $k$  – постоянная материала (0,6 – полиэтилен; 0,7 – поликарбонат; 0,8 – полиамид; 0,9 – поливинилхлорид).

Длина впускных каналов должна быть, по возможности, малой (чем короче канал, тем меньше потери давления); ее назначают в пределах 0,5–0,8 мм (максимально – до 1,2 мм). Предпочтительный для применения прямоугольный торцовый впуск выполняют в виде прямоугольного канала в двух или в одной из оформляющих плит (симметричное и несимметричное расположение). Преимущества его – простота изготовления, возможность достижения высокой точности и независимого изменения размеров впуска в нужном направлении. Заметный недостаток – след на отливке.

Балансировку литниковых систем целесообразно проводить прежде всего за счет впускных каналов.

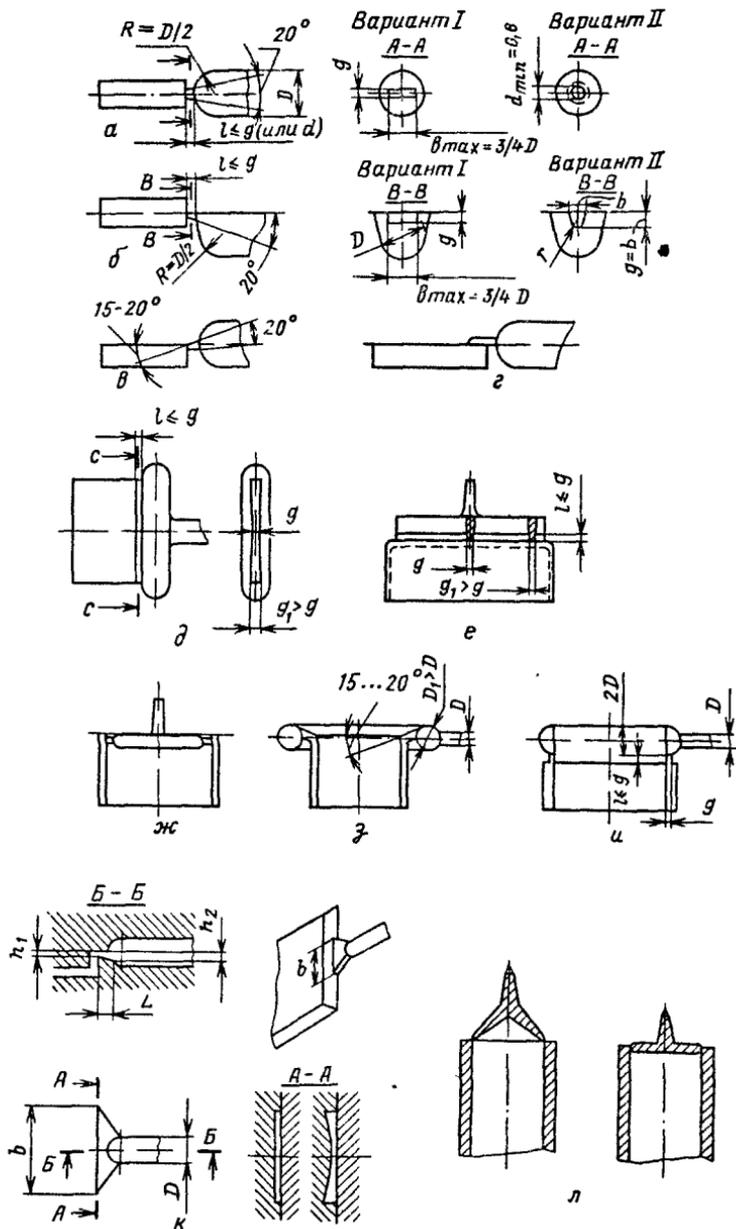


Рис. 3.14. Виды впускных литников:

а и б — прямоугольные или круглые торцовые (а — гнездо и разводящий канал выполнены в двух плитах формы; б — гнездо и разводящий канал выполнены в одной плите формы); в — наклонный; г — накладной; д — и — щелевые и кольцевые; к — верный; л — зонтичный

**Точечные и туннельные впускные каналы.** Точечные впускные каналы получили распространение благодаря возможностям изготовления с их помощью тонкостенных изделий (до 3 мм) без утяжки в месте подвода литника; отделению литника в момент размыкания формы и, таким образом, полной автоматизации ее работы; практически полной ликвидации литниковых отходов; широкой номенклатуре перерабатываемых термопластов. В результате быстрого затвердевания полимера в точечном впуске снижается остаточное давление в форме, что уменьшает уровень внутренних напряжений в изделии и улучшает условия извлечения отливки из формы.

В зависимости от типа конструкции (рис. 3.15) точечные впускные каналы разделяют следующим образом: с отрывным литником, безлитниковые, с предкамерой.

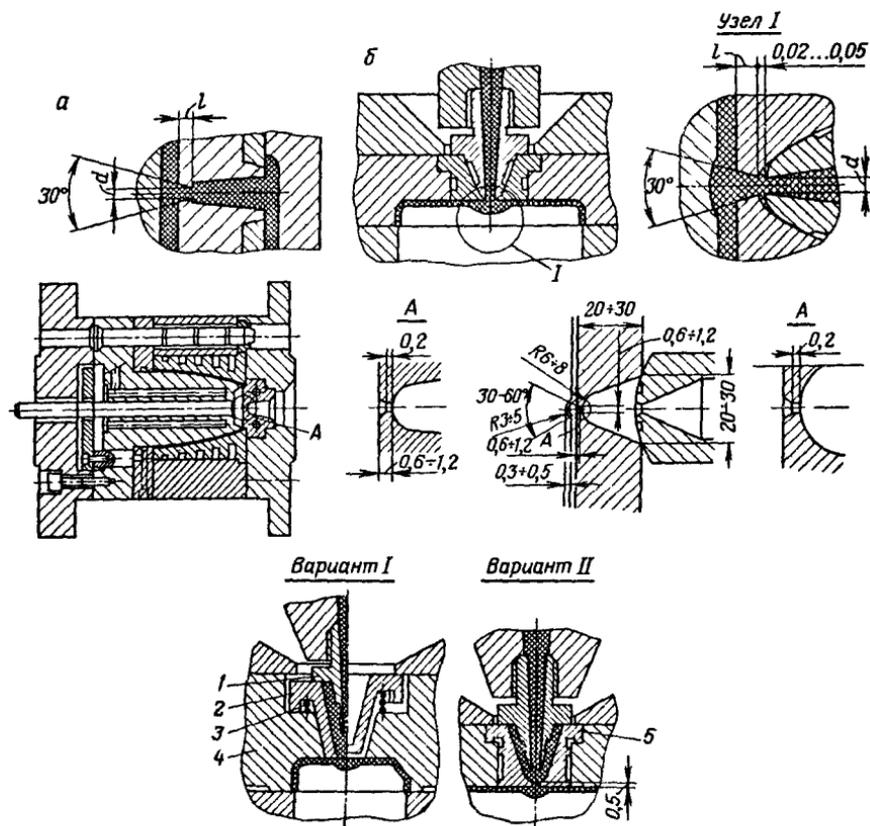


Рис. 3.15. Основные типы точечных впускных каналов:

а — с отрывным литником; б — безлитниковые; в — с предкамерой для детали типа стакана (справа — с углублением против литника); г — с подпружиненной предкамерой (1 — мундштук, 2, 5 — предкамеры, 3 — пружина, 4 — матрица)

В варианте с отрывным литником расплав к впускному каналу подводится через основной или разводящий литниковый канал. В варианте безлитниковом расплав к впускному каналу подается непосредственно из сопла литьевой машины. Здесь часто применяют samozапирающиеся краны (мундштуки) для предотвращения вытягивания нити расплава после впрыска.

В варианте с предкамерой (через специальную камеру, постоянно заполненную расплавом) исключаются потери материала на литник, так как материал в предкамере остается постоянно вязкотекучим. Наиболее целесообразно применять предкамеру при литье тонкостенных деталей, требующих непродолжительных циклов изготовления (3–4 отливки в минуту), из материалов с большим температурным интервалом и низкой температурой размягчения.

Объем предкамеры должен быть достаточно велик для того, чтобы материал, заполняющий ее, оставался вязкотекучим до следующего впрыска. Сохранение пластичности материала в предкамере может быть достигнуто также конструктивным оформлением сопла машины.

Предкамерный узел впрыска (рис. 3.15, з) отличается простотой в изготовлении и надежностью в эксплуатации при переработке кристаллизующихся полимеров. Основными элементами узла являются мундштук 1 и предкамера 2 или 5. Предкамера 2 (вариант I) закрепляется в конусном отверстии дна матрицы 4 и в промежутках между впрысками при отходе мундштука под действием пружины 3 имеет возможность приподниматься на 3–4 мм. Это необходимо для сохранения относительно высокой температуры предкамеры по отношению к охлаждаемой матрице, а также для получения качественной поверхности дна изделия.

Если к дну не предъявляются особые требования, возможно жесткое закрепление предкамеры 5 в матрице (вариант II). Мундштук в этом случае не отводится в промежутках между впрысками. Для уменьшения отдачи тепла от предкамеры на наружных стенках ее выполнены проточки, которые образуют воздушный зазор между предкамерой и матрицей. Мундштук изготавливается из бронзы, предкамера – стальная каленая.

Материал, заполнив при первом цикле предкамеру, остается в ней постоянно (вариант II) либо отводится вместе с мундштуком (вариант I). Благодаря короткому циклу материал в середине предкамеры не успевает застывать, и очередной впрыск проходит через нее беспрепятственно. При такой конструкции отпадает необходимость в подгонке мундштука, исключаются случаи продавливания дна камеры. Следовательно, с предкамерным узлом впрыска можно получать тонкостенные изделия с толщиной стенки до 2 мм (при условии эффективного охлаждения формы).

Литьевые формы с предкамерами надежны при переработке полиэтилена, полипропилена, ПВХ. При переработке полистирола и подобных ему материалов в зоне предкамеры должен монтироваться дополнительный (хотя конструктивно это часто затруднительно) обогрев с

терморегулятором. Мощность обогрева 300–400 Вт. Это – переход к горячеканальным формам.

Материал при продавливании через точечный впускной канал формы из-за трения, возникающего как между материалом и стенками точечного впускного канала, так и внутреннего трения, сильно разогревается, размягчается, а его вязкость значительно уменьшается, что требует относительно меньшего усилия для продавливания материала. При переходе к точечным литникам усилие, необходимое для продавливания материала по литниковым каналам, либо значительно уменьшается (при отрывном варианте), либо совсем не расходуется (при безлитниковом), из-за чего общее усилие, необходимое для оформления изделий в форме с точечным впускным каналом, значительно меньше усилия в формах с обычными литниками.

При значительном уменьшении величины поперечного сечения точечного впускного канала по сравнению с поперечным сечением, например, пальцевого впускного литника даже при несколько повышенном удельном давлении в полости перед точечным впускным каналом требуется значительно меньшее суммарное усилие для продавливания расплава в оформляющую полость, что также позволяет увеличить скорость поступательного перемещения поршня или червяка машины.

Точечные литники позволяют установить для выдержки под давлением минимальное значение, так как литник весьма малого сечения быстро застывает.

Затвердевание точечного литника наступает сразу после окончания выдержки под давлением, т.е. к моменту, когда изделие в оформляющей полости уже затвердело, и операция выдержки при охлаждении в зависимости от материала или совсем отпадает, или значительно сокращается. Особенно это заметно при изготовлении тонкостенных изделий.

Время для размыкания и смыкания формы при точечной литниковой системе сокращается, так как уменьшается путь перемещения подвижной части формы, необходимый для свободного извлечения изделий. Не менее значительны преимущества точечных впусков для повышения качества изделий. Наиболее важное из них заключается в том, что в зоне литника нет утолщений, охлаждение детали происходит равномерно, без образования внутренних напряжений и трещин, усадочных раковин и коробления. Отрыв и удаление точечных литников производят специальной плитой или сжатым воздухом, обработка поверхностей изделий при этом не требуется.

Размеры точечных впускных каналов (диаметр и длина) зависят от массы и толщины стенки изделия, площади проекции его на плоскость разреза, материала. Общие соображения для выбора размеров каналов приведены выше.

Применение точечных впускных каналов позволяет более полно использовать мощность и производительность оборудования (так как уменьшаются потери давления при течении расплава по разветвленной литниковой системе).

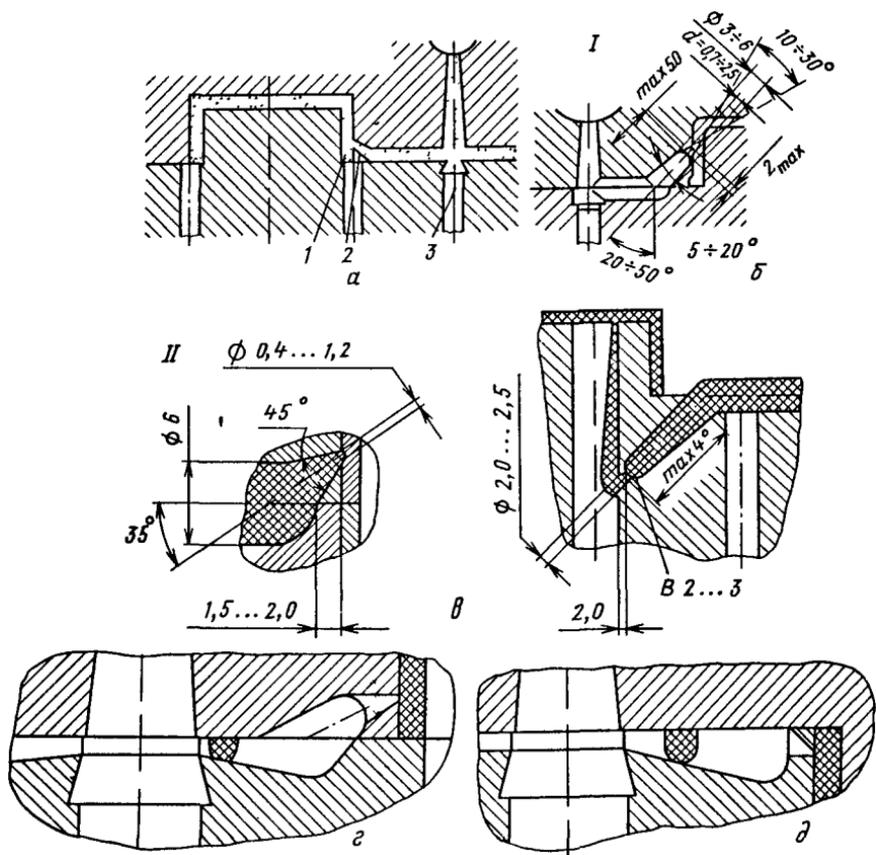


Рис. 3.16. Конструкции туннельных впускных каналов:

а — схема расположения литниковой системы; б — соотношения размеров исполнений I и II; в — варианты впусков внутрь изделия; г — расположение туннельного канала в неподвижной полуформе; д — расположение туннельного канала в подвижной полуформе

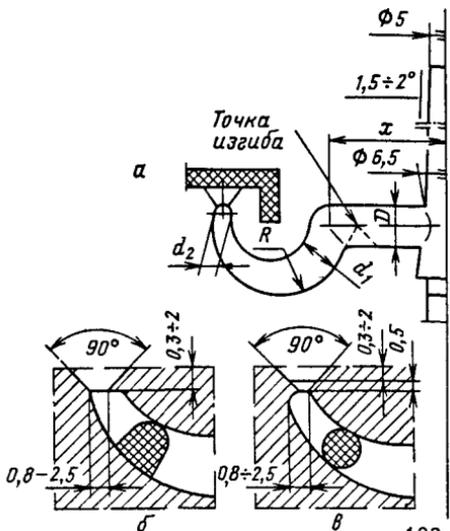


Рис. 3.17. Криволинейный туннельный литник:

$x/D \geq 2,5/1$  (min 15 мм);  $D \approx 4 + 6$  мм;  $d_1 = D$ ;  $R \leq (2,5 + 3) d_1$ ;  $d_1 - d_2 = 3 \dots 5^\circ$ ; пояснения в тексте

Туннельные впускные каналы – это разновидность точечных каналов. Они всегда – часть разветвленной литниковой системы. Туннельные каналы проходят к оформляющей полости (чаще – снаружи, но при необходимости – и изнутри) через стенку матрицы, сбоку. Они выполняются коническими. Туннельный канал располагают под углом 20–50° к плоскости разреза формы. Между изделием и туннелем образуется острая кромка, отрезающая литниковую систему при удалении отливки из формы.

Туннельные каналы можно использовать при переработке почти всех видов термопластов, кроме особенно хрупких, но целесообразнее применять их при переработке эластичных упругих материалов.

Размеры изготавливаемых изделий практически не ограничивают применение туннельных литников. Применение туннельных литников позволяет автоматизировать процесс изготовления изделий из пластмасс, исключить необходимость их дальнейшей механической доработки, улучшить качество.

При проектировании многогнездных форм с туннельными каналами особое внимание следует обращать на размеры и форму разводящих литниковых каналов, так как при извлечении туннельного литника разводящий литник изгибается. При литье хрупких материалов его следует изготавливать переменного сечения с уменьшением толщины в месте наибольшего изгиба. Диаметр разводящих каналов для туннельных впусков должен быть примерно на 1,5 мм больше наибольшей толщины отливки. На рис. 3.16 приведены примеры конструкций туннельных каналов. Располагать туннельные впускные каналы возможно и в неподвижной, и в подвижной полуформе.

При расположении впуска в неподвижной части срез литника с изделия и его извлечение из туннельного канала происходит в момент раскрытия пресс-формы. При расположении впуска в подвижной части срез литника с изделия и его извлечение из туннельного канала происходит при раскрытой пресс-форме в процессе выталкивания изделия из литниковой системы.

Расположение туннельного впуска в неподвижной части пресс-формы обеспечивает более надежный срез литника и позволяет легче автоматизировать работу формы.

Криволинейная форма туннельного впускного канала позволяет подводить расплав с внутренней стороны отливки (рис. 3.17, а). Для отрыва изделия от литника последний должен иметь достаточные конусность и свободу изгиба (рис. 3.17, б, в).

**Вентиляционные каналы.** Недостаточная вентиляция может снизить скорость истечения воздуха или даже вызвать закупоривание его в оформляющей полости. Однако поскольку вентиляционные отверстия являются точками потенциального подтекания расплава из полости, их следует делать минимального размера; целесообразно использовать царапины, наносимые алмазом, а не широкие канавки.

### 3.5.3. Горячеканальные литниковые системы

**Классификация и принципиальные схемы.** По названию этих литниковых систем (в которых расплав полимерного материала не затвердевает, т.е. не затвердевают и не извлекаются с отливкой литники, кроме выпускных) и формы для литья под давлением получили название горячеканальных. Такие формы особенно перспективны по сравнению с холодноканальными (т.е. с затвердевающими литниками в холодноканальных литниковых системах) по следующим причинам: практически нет отходов на литники, экономится дорогостоящий материал; повышается качество изделий за счет лучшего однородного качества расплава; сокращается технологический цикл литья под давлением (за счет уменьшения времени впрыска, времени смыкания – размыкания формы), повышается производительность процесса; себестоимость и трудоемкость изготовления изделий снижается также благодаря ликвидации операций обработки и переработки литников.

Перечисленные положительные эффекты существенно компенсируют несколько большие, чем для холодноканальных форм, затраты энергии. Распространение горячеканальных форм сдерживают конструкторские и технологические трудности. Первые потому, что сложно обеспечить равномерное температурное поле в горячем канале, или коллекторе, а также надежную теплоизоляцию между горячеканальным блоком, в котором размещается литниковая система, и охлаждаемыми формующими полостями. Вторые – из-за повышенной сложности и трудоемкости изготовления, требующей обеспечения высокой надежности в работе формы и одновременно – простоты в ее установке, обслуживании, управлении.

В развитых промышленных странах в горячеканальных формах литьем под давлением перерабатывают около 25% всех литьевых термопластов (полиэтиленов, полипропилена, полистирола, полиамидов – в том числе и стеклонаполненных). Основное, что отличает эти формы от других – специальный горячеканальный блок (плита, коллектор, узел) с литниковой системой. Перспективным является конструирование и выпуск взаимозаменяемых нормализованных горячеканальных блоков; это подтверждает опыт ведущих мировых фирм (например, „HASKO” в Германии).

Горячеканальные литниковые системы, размещаемые в блоках, разделяют: по конструктивному признаку на три группы – с нагреваемыми каналами, с изолирующими каналами и бесканальные; по характеру нагрева на две группы – с косвенным и непосредственным (реализуемым в разнообразных вариантах) нагревом.

Принципиальные схемы горячеканальных разных конструкций приведены на рис. 3.18. На рис. 3.18, а показан вариант непосредственного наружного нагрева (точнее – поддержания температуры расплава такой же, как в сопле материального цилиндра перед впрыском); известны также варианты прямого нагрева изнутри, когда в литниковый канал вставляется обогреваемая трубка или стержень и т.д. На рис. 3.18, б показан канал с подготовительной камерой, выполненной в

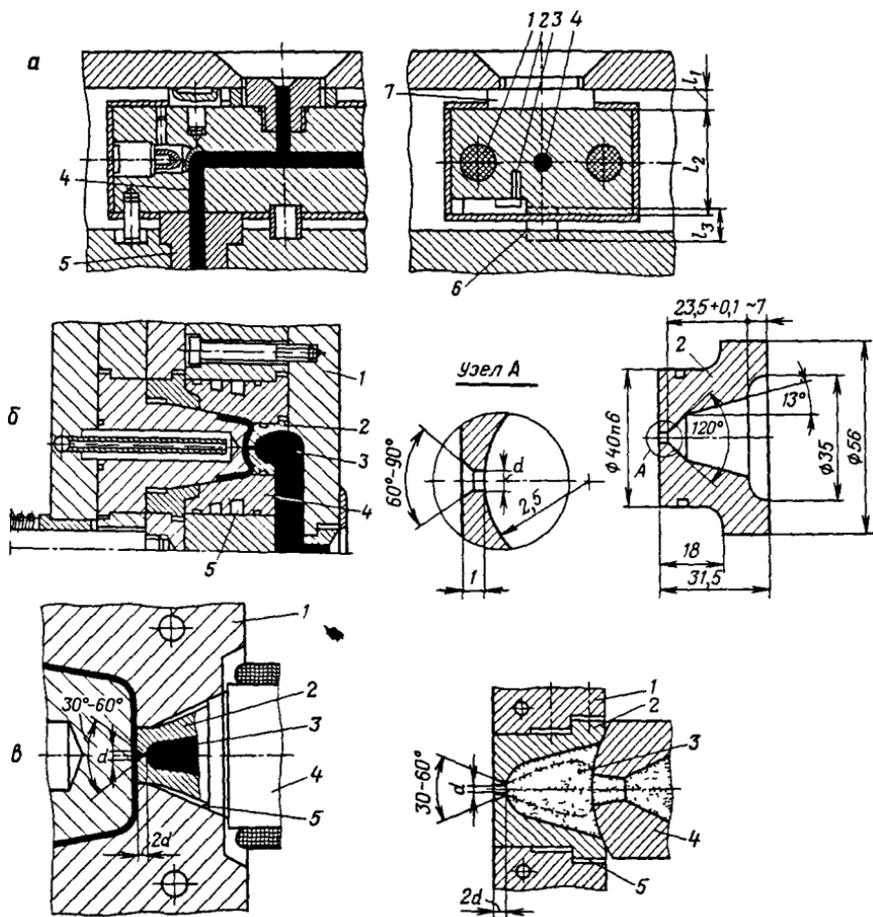


Рис. 3.18. Принципиальные схемы горячеканальных блоков:

а — с нагреваемыми каналами (1 — нагревательный конический или цилиндрический патрон, 2 — корпус блока, 3 — датчик температуры, 4 — канал с расплавом, 5 — сопло, 6 — задняя распределительная втулка, 7 — передняя распределительная втулка); б — с самоизолирующими каналами (1 — плита горячеканального блока, 2 — литниковая втулка, 3 — самоизолирующий канал, 4 — матрица, 5 — воздушные зазоры); в — бесканальные (1 — плита горячеканального блока, 2 — литниковая втулка — слева коническая, справа цилиндрическая, 3 — расплав, 4 — сопло машины-автомата, 5 — воздушный зазор)

литниковой втулке. Разводящий литник (после перегиба потока) имеет большой диаметр — до 30 мм. Самоизоляция канала обеспечивается за счет пристенных, более холодных слоев материала, создающих изолирующий экран. Такого типа каналы часто сочетают с разводящими затвердевающими литниками (так называемые „пассивные” литниковые системы), выполненными в литниковых втулках. Формы с изолированными каналами перед началом работы должны нагреваться

до 150°C. Их можно применять для изготовления изделий из материалов с низкой температурой плавления и широким температурным диапазоном переработки. Бесканальные системы (рис. 3.18, е) напрямую и практически без температурных потерь питаются расплавом из сопла машины-автомата.

**Особенности конструкций основных функциональных узлов и деталей.** Корпус горячеканального блока или коллекторную (распределительную) плиту выполняют в зависимости от характера нагрева блока, конструкции изделия, общего числа гнезд и расположения впусков в оформляющую полость формы. На рис. 3.19 приведены схемы различных вариантов корпусов (плит) блоков.

Особое внимание следует обратить на обеспечение при работе формы необходимого натяга  $H_m$ , зависящего от размеров плиты (коллектора) и установочных втулок, относительного изменения суммар-

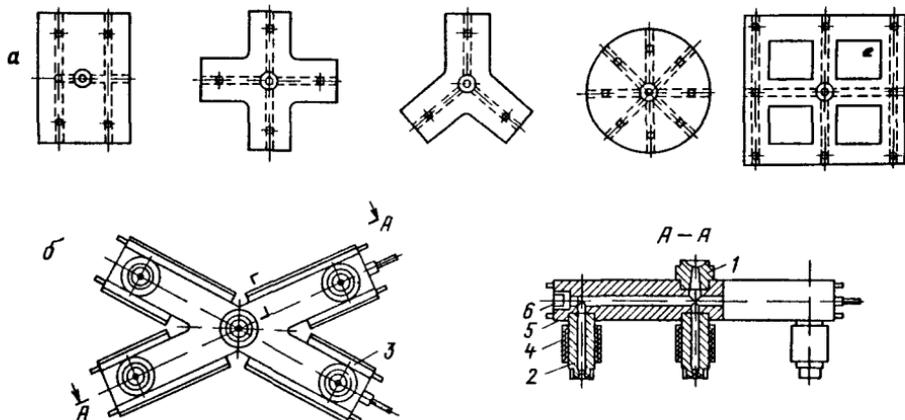
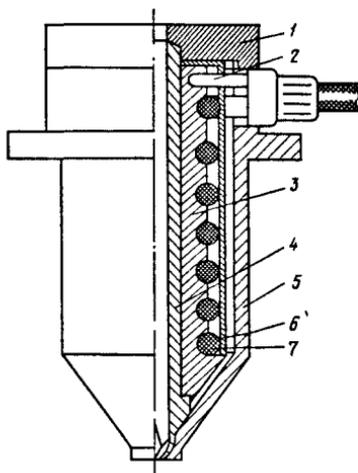


Рис. 3.19. Схемы вариантов корпусов (плит) горячеканальных блоков (а) и корпус в сборе (б):

1 — литниковая втулка; 2 — сопло; 3 — нагреватель коллектора; 4 — нагреватель сопла; 5 — корпус; 6 — заглушка

Рис. 3.20. Непосредственно обогреваемое сопло с наружным спиральным обогревом:

1 — крышка; 2 — термопара; 3 — втулка; 4 — торпеда; 5 — корпус сопла; 6 — предохранительный кожух; 7 — спираль обогревателя



ной длины. Кроме того, следует определять напряжение смятия поверхности плиты матрицы в зоне задней установочной втулки.

Сопла горячеканальных литниковых систем выполняют в разных вариантах в зависимости от характера нагрева блока, общего числа гнезд в расположении впусков, габаритов изделия, программы выпуска изделий и прогнозируемой надежности конструкции.

Рассмотрим несколько типовых распространенных конструкций сопел.

**Непосредственно обогреваемое сопло** (рис. 3.20). Торпеда 4, изготовленная из высокотеплопроводного сплава на основе меди, кобальта и бериллия  $CuCoBe$ , опирается на корпус сопла 5, а сверху она закреплена в крышке 1. На торпеду 4 надета втулка 3, на которую предварительно намотана спираль обогревателя 7, закрытая предохранительным кожухом 6. Термопара 2 контролирует температуру материала в сопле. Воздушный зазор между деталями 5 и 6 значительно уменьшает потери тепла. Такая конструкция универсальна, компактна, обеспечивает малое потребление энергии и качественную регулировку температуры, но имеет ограничения по длине сопла. Фирма „НАСКО“ выпускает большой нормализованный ряд горячеканальных блоков с описанной конструкцией сопел.

**Непосредственно обогреваемое сопло с внутренним сердечником** (рис. 3.21). В коллекторную плиту 1 с заглушкой вставлен и закреплен сердечник 2, внутрь которого помещен нагреватель (ТЭН) 3. Внутренний сердечник имеет заостренный хвостовик (торпеду) 5. Хвостовик

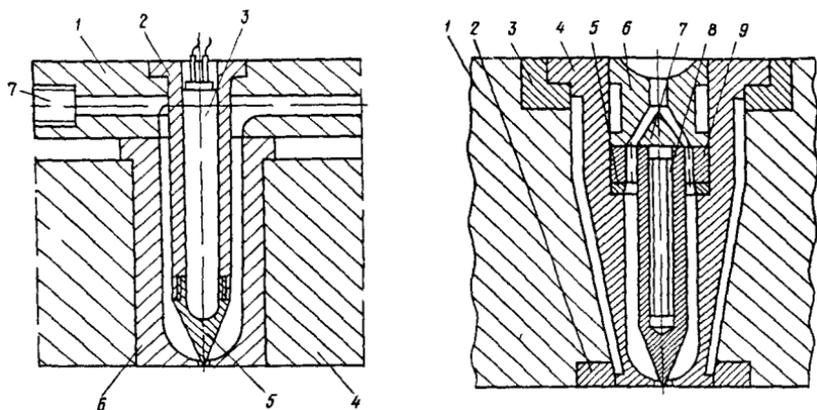


Рис. 3.21. Непосредственно обогреваемое сопло с внутренним сердечником-патроном:

1 — коллекторная плита; 2 — сердечник; 3 — нагреватель; 4 — плита; 5 — торпеда; 6 — литниковая втулка; 7 — заглушка

Рис. 3.22. Непосредственно обогреваемое сопло (с внутренним ленточным нагревателем):

1 — плита; 2, 3 — прокладки; 4 — корпус сопла; 5 — переходная втулка; 6 — литниковая втулка; 7 — крышка; 8 — нагреватель; 9 — торпеда

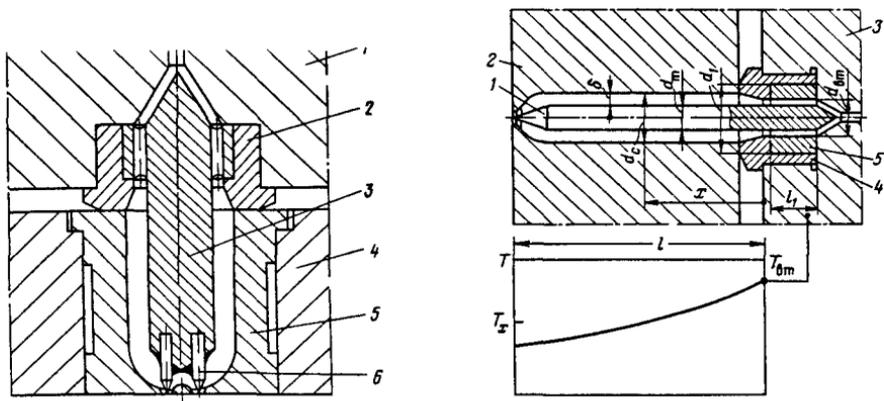


Рис. 3.23. Косвенно обогреваемое сопло:

1 — плита блока; 2 — опорная втулка; 3 — торпеда; 4 — обойма; 5 — литниковая втулка; 6 — накопник

Рис. 3.24. Изменение температуры по длине торпеды косвенно обогреваемого сопла:

1 — торпеда; 2 — горячеканальная плита; 3 — литниковая втулка; 4 — опорная втулка; 5 — переходная литниковая втулка

разогрет и это способствует сохранению требуемой температуры расплава, а также — благодаря конструкции — предотвращению вытягивания „нитей” расплава после окончания впрыска. Литниковая втулка 6, устанавливаемая в плиту 4, может изготавливаться из хромоникелевых сталей с относительно малой теплопроводностью.

Достоинством этого сопла является высокий КПД, использование мощности ТЭНа для поддержания температуры расплава, но не всегда возможно точно ее подобрать из стандартных нагревателей. Сопло непригодно при переработке нетермостабильных термопластов; контроль температуры расплава затруднен. Такая конструкция получила распространение с появлением ТЭНов малых размеров (диаметры 6–8 мм).

Разновидность описываемого сопла с ленточным (или спиральным) нагревателем показана на рис. 3.22. В плиту 1 устанавливают корпус сопла 4, контактирующий с керамическими прокладками 2 и 3; торпеда 9 опирается на переходную втулку 5, сверху она закрыта литниковой втулкой 6 и крышкой 7. Нагреватели 8 установлены внутри торпеды. Воздушный зазор между корпусом сопла 4 и плитой 1 создает хорошие теплоизоляционные условия.

Косвенно обогреваемое сопло (рис. 3.23) имеет торпеду 3, выполненную из высокотеплопроводной меди. Торпеда нагревается от обогреваемой ТЭНами горячеканальной плиты блока 1. Нагретая торпеда поддерживает температуру расплава. Плита опирается на опорную втулку 2; литниковая втулка 5, установленная в обойме 4, выполнена из малотеплопроводящего металла, что несколько умень-

шает потери тепла. Положение наконечников  $\delta$ , запрессованных в торпеду, позволяет регулировать величину впускных каналов (в данном случае – двух). Косвенно обогреваемые сопла более энергоемки, чем непосредственно обогреваемые, но исключают возникновение в зоне торпеды температурных пиков, вызывающих термодеструкцию материала; они проще в изготовлении и надежнее в эксплуатации. Из-за определенной потери тепла вдоль оси торпеды увеличить температуру последней можно, изменяя ее длину  $l_1$  или диаметр  $d_T$ , как это видно из графика на рис. 3.24.

Торпеды косвенно обогреваемых сопел конструктивно разнообразны, но все они представляют собой цилиндрические тела, в основании которых выполнены отверстия для течения расплава (см. рис. 3.22,

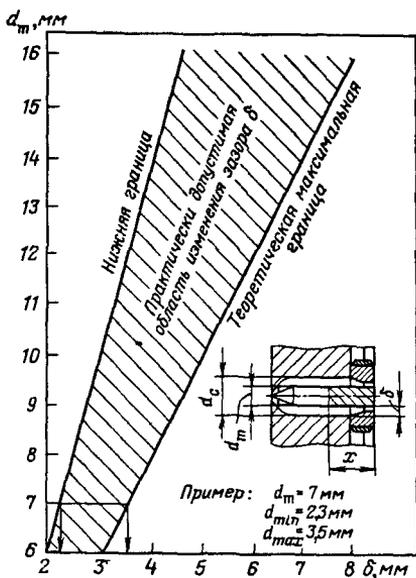
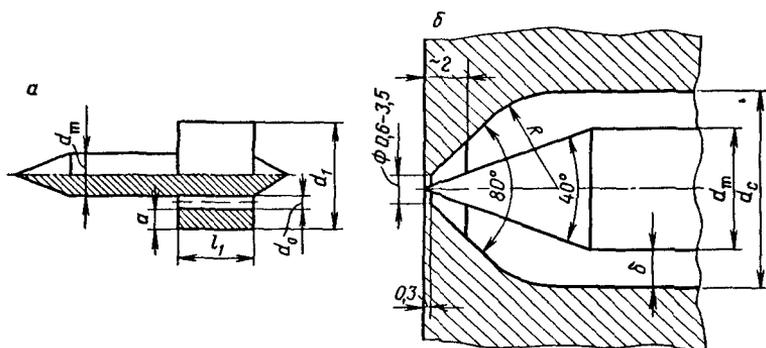


Рис. 3.25. Размеры (а), геометрические соотношения (б) торпед с заостренным хвостовиком

Рис. 3.26. Зависимость одностороннего зазора  $\delta$  между корпусом сопла и торпедой от диаметра торпеды

3.23). Наиболее распространены торпеды из электролитической меди и сплавов Cu-Cr-Zr. На рис. 3.25 показаны рекомендуемые геометрические соотношения и размеры торпед с заостренным хвостовиком. Число отверстий  $z_0 = 5 \div 8$ . Диаметр отверстий в основании торпеды  $d_0$  принимается равным 2–4 мм. Диаметр отверстий в литниковой втулке  $d_{вт}$ , по которым расплав перетекает в отверстия торпеды, равен:  $d_{вт} \leq d_0 \sqrt{z_0}$ .

Размеры основания торпеды (см. рис. 3.24 и 3.25, а) вычисляются по формулам:  $a \geq 3$ ;  $d_1 = 2a + d_r + 2d_0$ ;  $l_1 = 1,5 \div 2,0 d_r$ . Считается допустимым соотношение диаметров сопла и торпеды  $d_c/d_r = 2$ , поэтому  $\delta = d_r/2$ . Однако опыт фирмы „Hoechst“ показывает, что значения  $\delta$  могут быть иными – см. график на рис. 3.26.

**Основы теплового расчета горячеканального блока.** Тепловой расчет горячеканального блока имеет целью определить мощность нагревателей, необходимую для достижения требуемой скорости разогрева блока и компенсации тепловых потерь. Для конструкций блоков с косвенно обогреваемыми соплами – еще и обеспечение на конце торпеды температуры, достаточной для проведения интенсивного и высококачественного процесса литья под давлением. Рассмотрим основы теплового расчета на примере этого наиболее сложного варианта.

Процессы, определяющие потери тепла горячеканальным блоком, связаны с теплопроводностью, конвекцией, излучением.

Потери тепла посредством теплопроводности происходят (см. рис. 3.18) через установочные втулки (опоры) горячеканального блока; через воздушный зазор, окружающий блок; через теплопроводящую торпеду. Возможные пути сокращения этих потерь естественны: уменьшение поверхности контакта втулок с горячеканальным блоком, применение малотеплопроводных материалов для втулок. Для расчета потерь тепла в данном случае (для однородной стенки) используют в соответствии с законом Фурье, уравнение

$$Q_T = f(\lambda/\delta_{ст})\Delta T,$$

где  $f$  – площадь теплоотдающей поверхности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\delta_{ст}$  – толщина стенки;  $\Delta T$  – разность температур теплоотдающей и принимающей сред.

Потери тепла за счет конвекции связаны с движением воздуха между горячеканальным блоком и плитой крепления, а также между блоком и окружающей средой (в зависимости от конструкции формы) – см. рис. 3.18. Для расчета количества тепла, переданного конвекцией, применяют уравнение

$$Q_K = f\alpha_K(T_B - T_{ст}),$$

где  $\alpha_K$  – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции [от 5 до 10 Вт/(м<sup>2</sup>·град)];  $T_B$  – температура воздуха;  $T_{ст}$  – температура стенки блока.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_K$  зависит от свойств и вида движения теплоносителя, большого числа других параметров – характера (вынужденное или свободное) и скорости движения воздуха, его направления.

Для уменьшения потерь тепла за счет конвекции необходимо избежать так называемого "камерного" эффекта, т.е. принудительной циркуляции вследствие разницы плотностей воздуха окружающей среды и воздуха, находящегося в блоке. Горячеканальный блок должен быть полностью "закрыт" литейной формой.

Потери тепла за счет излучения в горячеканальной системе происходят между блоком и крепежными плитами – см. рис. 3.18. Для расчета теплового потока в этом случае используют известную формулу

$$Q_{\text{и}} = f C_{1/2} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4],$$

где  $C_{1/2}$  – константа лучевого обмена;  $T_1, T_2$  – абсолютные температуры стенок тел 1 и 2 соответственно.

Для уменьшения потерь тепла за счет излучения целесообразно применять светоотражающие ровные поверхности, например, поверхности блока покрывать защитным алюминиевым слоем.

На основе приведенных закономерностей в фирме „Hoeschst“ (Германия) получена формула для расчета температуры в любой точке сопла по оси торпеды (см. рис. 3.24):

$$T_x = (T_{\text{пл}} - T_{\text{ф}})(e^{a(l-x)} + e^{-a(l-x)}) / (e^{al} + e^{-al}) + T_{\text{ф}},$$

где  $a = [4\lambda_p / (\lambda_r d_r \delta)]^{1/2}$ ;  $T_{\text{пл}}$  – температура горячеканальной плиты;  $T_{\text{ф}}$  – температура формы;  $\lambda_p, \lambda_r$  – коэффициенты теплопроводности расплава и материала торпеды соответственно;  $l, d_r, \delta$  – см. рис. 3.24.

При  $x = l$  (на острие торпеды)

$$T_l = (T_{\text{пл}} - T_{\text{ф}})[2 / (e^{al} + e^{-al})] + T_{\text{ф}}.$$

Следствием изменения температуры по длине торпеды являются, как известно, изменения размеров, деформации и возникновения недопустимо высоких напряжений.

На рис. 3.27 показано, что изменение размеров возможно в направлениях  $x$  и  $y$ : в направлении  $x$  происходит смещение  $\Delta x$ , приближение и даже касание торпеды с литниковой втулкой; в направлении  $y$  – смещение  $\Delta y$ , приводящее к закупорке впускного литника.

Для сопел, изменение которых нужно компенсировать в направлении  $x$ , рекомендуется, например, фиксировать основание торпеды в литниковой втулке, причем торпеда своим основанием должна прилегать к горячеканальному блоку исключительно по плоскости, и должен быть обеспечен „силовой замок“. Возможные изменения размеров корректируются при изготовлении и сборке соответствующих деталей горячеканальной системы, но успешно это выполняют только в небольших и среднегабаритных формах. В больших соплах, тепловое расширение которых невозможно компенсировать, следует учитывать, что поперечное перемещение торпеды в литнике может сопровождаться ее деформациями и закупоркой самой торпедой поперечного сечения литника. Устранение этого требует тщательной корректировки размеров.

Отмеченные отрицательные эффекты во многом снижаются, если

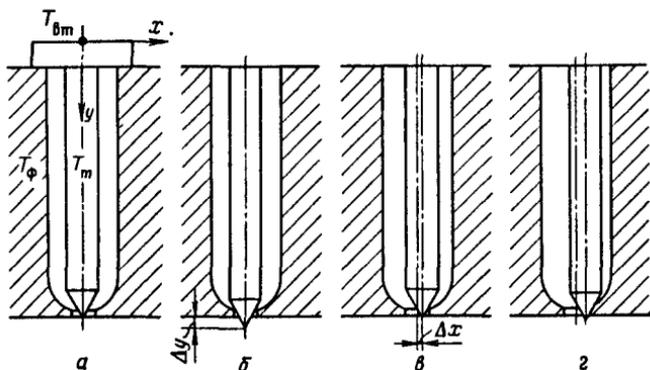


Рис. 3.27. Характерные варианты изменения позиционирования торпеды при нагревании:

*a* — исходное положение, при нормальной температуре; *б* — расширение в направлении оси *y*; *в* — расширение в направлении оси *x*; *г* — общее смещение торпеды

сопрягаемые элементы торпеды выполнены под посадку *H7/m6* (*H7* — внутренний диаметр опорной втулки).

Определение ожидаемых величин  $\Delta x$  и  $\Delta y$  называется расчетом позиционирования торпеды. Особенно это важно для многогнездных форм, когда необходимо согласовывать положение нескольких торпед. Для расчета позиционирования в направлении *y* определяют разность изменения длины торпеды и изменения длины литниковой втулки (рис. 3.23) или распределительной плиты (рис. 3.22) в указанном направлении, т.е.

$$\Delta l_y = l_o [\alpha_{\tau}(T_{пл} - T_{o.c}) - \alpha_{\phi}(T_{\phi} - T_{o.c})].$$

Для расчета позиционирования в направлении *x* определяют разность изменения длины горячеканального блока и изменения длины литниковой втулки или распределительной плиты в указанном направлении, т.е.

$$\Delta l_x = \alpha_{\phi} l_{ox}(T_{пл} - T_{\phi}).$$

В формулах  $\Delta l_y$  и  $\Delta l_x$ :  $l_o$  — номинальная длина торпеды, при нормальной температуре;  $l_{ox}$  — номинальное положение оси торпеды по отношению к оси симметрии формы;  $\alpha_{\tau}$ ,  $\alpha_{\phi}$  — коэффициенты линейного расширения материала торпеды и формы соответственно;  $T_{o.c}$  — температура окружающей среды.

Следует отметить также, что вследствие теплового расширения возникают в деталях сопла термические напряжения  $\sigma = \alpha E \Delta T$ , где  $E$  — модуль упругости.

После расчета температуры  $T_x(T)$ , оценки ее влияния на точность позиционирования и окончательного решения относительно установления температуры горячеканальной плиты  $T_{пл}$  вычисляют общую мощность нагревателей:

$$W = mc(T_{пл} - T_{н.пл}) / (860 \tau_{раз} \eta),$$

где  $m$  — масса горячеканального блока;  $T_{н.пл}$  — начальная температура горячеканальной плиты (равна температуре окружающей среды);  $\tau_{раз}$  — время разогрева блока;  $\eta$  — КПД нагревателя ( $\eta \approx 0,5$ ).

При необходимости проводят точный расчет мощности нагревателей, по методике, изложенной в разд. 2.6.1.

### 3.5.4. Гидравлический расчет литниковой системы и формы

Расплав полимерного материала, заполняя каналы любой без исключения литниковой системы (см. разд. 3.5.1–3.5.3) и полость формы, должен преодолеть сопротивление течению в них, при этом теряется скорость движения расплава, энергия потока, происходит потеря давления.

Гидравлический расчет позволяет определить реальный перепад давления при течении расплава по литниковым каналам и полости формы, сравнить его с максимальным давлением впрыска, создаваемым машиной-автоматом, что важно для решения задачи о заполнении полости формы (вообще и за заданное время). Для рационализации конструкции литниковой системы необходимо знать, в каком месте ее образуются значительные перепады давления (для уменьшения сопротивления в этих местах путем увеличения их поперечного сечения) и где перепады малы (следовательно, можно сократить объем каналов и, соответственно, литников, уменьшив поперечные сечения каналов).

Гидравлический расчет может быть противоречивым, если предварительно спроектирована литниковая система (например, с учетом приведенных выше рекомендаций по геометрическим размерам отдельных элементов и их соотношениям), или проектным, когда сравниваются различные альтернативные варианты.

Для проведения реологического расчета литниковую систему и полость формы представляют в формализованном виде, например используя теорию графов, в виде ветвей дерева, корнем которого является инъекционный узел машины. Ветви — это последовательно расположенные простые геометрические элементы течения: цилиндрический сплошной или кольцевой канал, плоская щель, канал и т.д. Набор простых элементов течения конкретен для каждой литниковой системы и полости формы. На рис. 3.28 даны необходимые пояснения, из которых ясно, что для обеспечения работоспособности литьевой формы необходимо выполнение следующего неравенства:

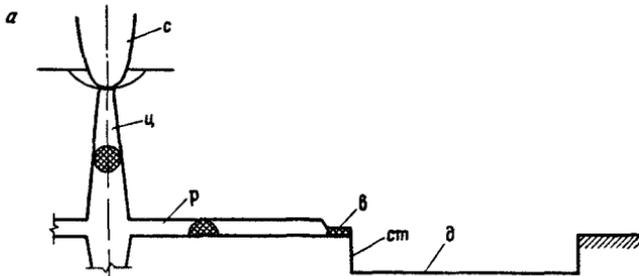
$$P > \Delta P_{ц} + \Delta P_p + \Delta P_v + \Delta P_{(ст)} + \Delta P_{(д)}; \text{ в общем виде } P > \sum_{i=1}^n \Delta P_i,$$

где  $n$  — число простых геометрических элементов.

Из этих неравенств очевидно, что чем меньше слагаемых при прочих равных (в отношении полости формы) условиях, тем меньше суммарные потери давления, например, в горячеканальных формах.

Собственно реологический расчет проводится на основе:

использования степенного закона течения расплава, записанного, например, в форме  $\dot{\gamma} = m\tau^n$ , где  $m$ ,  $n$  — реологические константы полимерных материалов;



б

| Корень        | Ветви (для двухгнездной формы) |   |                 |   |  |                           |
|---------------|--------------------------------|---|-----------------|---|--|---------------------------|
|               | с                              | ц                                       | р               | в | полость формы                              |                           |
|               |                                |   |                 |   | ст   | д                         |
| $u_x(q_p; P)$ | $q_p; \Delta P_c$              | $q_p/2; \Delta P_p$                     | $\Delta P_v$    |   | $\Delta P_\Phi(\text{ст})$                 | $\Delta P_\Phi(\text{д})$ |
| —             | Конический<br>круглый          | Цилиндри-<br>ческий<br>полукруг-<br>лый | Плоская<br>щель |   | Плоская<br>щель<br>(разверт-<br>ка кольца) | Плоская<br>щель           |

Рис. 3.28. Схема (а) и граф (б) формализации данных для реологического расчета литниковой системы и полости формы, построенный для двухгнездной формы; протяженность ветвей графа — условная. Обозначения:

с — сопло машины; ц — центральный литник; р — разводящие литники; в — впускные литники; ст — стенка; д — дно

описания геометрических характеристик простых элементов течения — коэффициентов геометрической формы (обратная ему величина — коэффициент гидравлического сопротивления).

Ниже приведены формулы для пяти распространенных геометрических элементов, позволяющие определить напряжение сдвига  $\tau$  (в МПа), скорость сдвига  $\dot{\gamma}$  (в  $\text{с}^{-1}$ ), перепад давления  $\Delta P$  (в МПа) и коэффициент геометрической формы  $K$  (в  $\text{м}^3$ ) для случаев, когда расплав моделируют ньютоновской (индекс „н”) и неньютоновской (индекс „нн”) жидкостями (рис. 3.29) поясняет условные обозначения в формулах).

Цилиндрический канал длиной  $l$  и радиусом  $R = D/2$ :

$$\tau = \Delta P \cdot r / (2l); \dot{\gamma}_n = 4Qr / (\pi R^4); \dot{\gamma}_{nn} = [(n+3)(Q/f_\kappa) / R](r/R)^n; \Delta P_n = 8\eta Ql / (\pi R^4);$$

$$\Delta P_{nn} = 2^n(n+3)Q / (\pi R^{n+3}m); K_n = \pi R^4 / (8l);$$

$$K_{nn} = \pi R^{n+3} / [(n+3)(2l)^n].$$

Плоская щель  $B \gg H$ :

$$\tau = \Delta P \cdot y / l; \dot{\gamma}_n = 12Qy / (BH^3);$$

$$\dot{\gamma}_{nn} = [2(n+2)(Q/f_\kappa) / H](2y/H)^n;$$

$$\Delta P_H = 12\eta Ql/(BH^3); \Delta P_{HH} = [2^{n+1}(n+2)Q/(BH^n + 2m)]^{1/n}; K_H = BH^3/(12l);$$

$$K_{HH} = BH^n + 2/[(n+2) \cdot 2^{n+1}l].$$

Произвольная форма канала:

$$\tau = (\Delta P \cdot y/l)(f_K^2/\Pi); \dot{\gamma}_H = 2Q\Pi/f_K^2;$$

$$\Delta P_H = 2\Pi^2\eta Ql/f_K^3; \Delta P_{HH} = [(n+3)\Pi^{n+1}Q/(2f_K^n + 2m)]^{1/n};$$

$$K_H = f_K^3/(2\Pi^2); K_{HH} = 2f_K^{n+2}/[(n+3)\Pi^{n+1}l].$$

Цилиндрический кольцевой канал:

$$\tau = \Delta P \cdot y/l; \dot{\gamma}_H = 6Qy/(\pi R_m H^3);$$

$$\dot{\gamma}_{HH} = [2(n+2)(Q/f_K)/H](2y/H)^n; \Delta P_H = 6Q\eta l/(\pi R_m H^3);$$

$$\Delta P_{HH} = [2^n(n+2)Q/(\pi R_m H^n + 2m)]^{1/n}; K_H = \pi R_m H^3/(6l);$$

$$K_{HH} = \pi R_m H^{n+2}/[(n+2)(2l)^n].$$

Конический круглый канал:

$$\tau = \Delta P_{mj} r_{mj} (2l_j); \dot{\gamma}_H = 4Q r_{mj} / (\pi R_{mj}^4);$$

$$\Delta P_H = 8Q\eta l / (\pi R_{mj}^4), \quad l = \sum l_j;$$

$$\Delta P_{HH} = [(n+3) \cdot 2^n Q / (\pi R_{mj}^{n+3} m)]^{1/n};$$

$$K_H = \pi R_{mj}^4 / (2l_j); \quad K_{HH} = \pi R_{mj}^{n+3} / [(n+3)(2l_j)^n].$$

В этих формулах  $Q$  – объемная скорость впрыска (расход, производительность);  $\eta$  – вязкость;  $f_K$  – площадь сечения канала;  $\Pi$  – периметр сечения канала. Индекс „ $m_j$ ” означает, что искомые величины относятся к элементарным участкам канала, индекс „ $m$ ” при искомым величинах относится ко всему каналу; формула для  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$  в потоке расплава.

Покажем на примере простого цилиндрического элемента (канала) методику определения  $K$  и  $\dot{\gamma}$ . В цилиндрическом канале (рис. 3.30) движется поток расплава, в котором на расстоянии  $r$  от оси выделено кольцо толщиной  $dr$ . Сила сдвига  $P_{сдв}$ , действующая на поток, по закону Ньютона будет равна  $P_{сдв} = \eta_{эф} 2\pi r l_{ц} (dv/dr)$ , где  $\eta_{эф}$  – эффективная вязкость расплава;  $dv/dr$  – градиент скорости сдвига. Сила давления  $P_d$  равна  $P_d = \pi r^2 \Delta P$ , где  $\Delta P = P_1 - P_2$  – перепад давления на длине канала  $l_{ц}$ .

Исходя из условий равновесия при установившемся движении, т.е. приравняв  $P_{сдв} = P_d$ , получим  $dv = \Delta P r dr / (2\eta_{эф} l_{ц})$ . Элементарный объемный расход  $dQ = \pi r^2 dv$ . После интегрирования  $dQ$  и необходимых подстановок получаем:  $K = \pi R^4 / (8l_{ц})$ ,  $\dot{\gamma} = 4Q / (\pi R^4)$ . Приведенные рассуждения сделаны с учетом многих упрощающих допущений (стационарность и ламинарность потока расплава, смачиваемость стенок канала расплавом, число  $Re \ll 2000$  и др.).

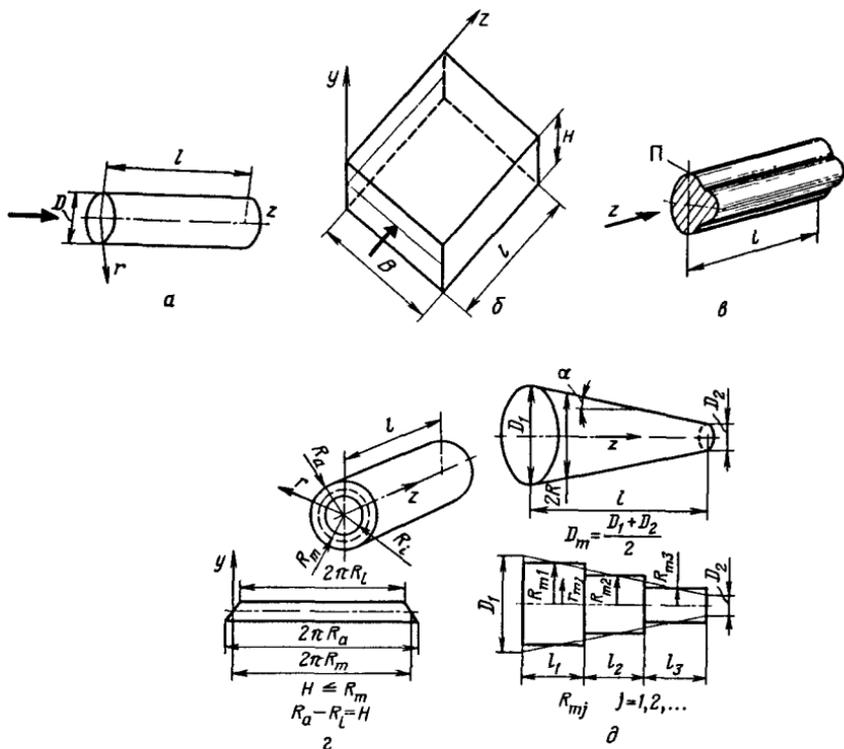


Рис. 3.29. Конфигурация и условные обозначения размеров (к табл. 3.4) распространенных простых геометрических элементов (каналов):

а — цилиндрический; б — плоская щель; в — произвольная форма поперечного сечения; г — цилиндрический кольцевой; д — конический круглый

Известна также возможность оценки величины  $K$  по обобщенному критерию  $K = VH^3f/(12L)$ , где  $V$  и  $H$  — максимальный и минимальный размеры сечения канала соответственно;  $f$  — характеристика потока расплава, зависящая от отношения  $H/B$  и формы сечения (рис. 3.31).

Перепады давления, рассчитанные в каждом из элементов литникового канала и полости формы, суммируются, после чего возможно сделать вывод о работоспособности формы (см. выше).

В случае отсутствия данных об ИХ для оценки величины  $P$  на основании практического опыта можно принимать:  $P = 0,65P_{\text{пасп}}$  (для поршневых машин) и  $P = 0,5P_{\text{пасп}}$  (для червячных машин-автоматов), где  $P_{\text{пасп}}$  — паспортная характеристика давления впрыска.

В литьевых формах с уравновешенной литниковой системой, когда процесс заполнения всех полостей формы заканчивается одновременно, может быть определена мощность впрыска:  $N = Q \sum_{i=1}^n \Delta P_i$ , где  $Q$  — объемная скорость впрыска.

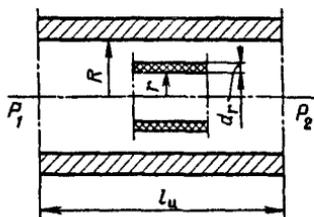
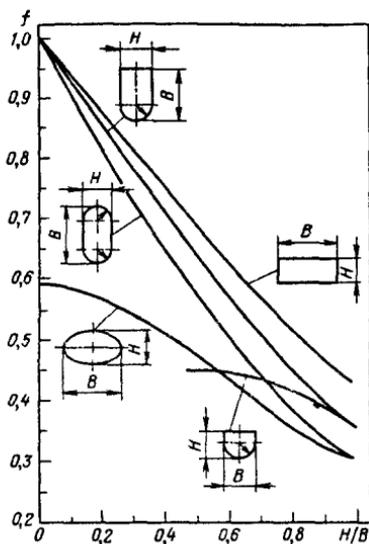


Рис. 3.30. Схема к определению  $K$  цилиндрического элемента (канала)

Рис. 3.31. Графики для определения характеристики  $f$  различной формы поперечных сечений элементов (каналов)



### 3.6. Системы термостатирования

#### 3.6.1. Назначение и классификация

Система термостатирования формы для литья под давлением ответственна за равномерное, интенсивное охлаждение отливки по всему ее объему. Это чрезвычайно сложно, если учесть неравномерное распределение массы в реальных изделиях, многогнездность большинства форм, другие факторы. Основные тепловые процессы, циклически повторяющиеся и происходящие при охлаждении отливок — теплопередача от расплава к поверхности металлической формы, а затем — теплоотдача от нагретого металла к хладагенту, отвод теплоты хладагентом и теплоотдача от формы в окружающую среду (дополнительная особенность, относящаяся к горячеканальным формам, рассмотрена в разд. 3.5.3).

Скорость и равномерность охлаждения изделия влияет на образование надмолекулярной структуры, степень кристалличности (для кристаллизующихся термопластов), величину и характер внутренних напряжений в отливках и их последующую релаксацию. По возможности одновременное окончание охлаждения отливки по всей ее поверхности устраняет главную причину коробления изделия. Время охлаждения, достаточное для обеспечения безопасности (с точки зрения механического повреждения, извлечения изделия) должно быть технологически обосновано, оно составляет, как известно, главную часть технологического цикла.

Система термостатирования должна регулировать температуру формы, поддерживая ее на заданном уровне.

В зависимости от требуемого интервала поддержания температуры формы, мощности и производительности оборудования различают следующие типы термостатирующих систем (приборов): водоциркулирующие с прямым водяным охлаждением по способу смешивания; маслоциркулирующие с непрямым водяным или воздушным охлаждением; компрессорно-охлаждающий с водяным и воздушным охлаждением; градирня (охлаждение испарением).

Эти системы предназначены для циркуляции воды (основной распространенный идеальный хладагент, пригодный при переработке практически всех термопластов, но при температурах не более 80 °С) или масла (веретенное „Индустриальное-20”), силиконовой смазки, этиленгликоля (рекомендуются при переработке поликарбоната, стеклонаполненных полиамидов).

Температурные ограничения для воды связаны с осаждением солей на стенках каналов, что резко меняет тепловой баланс формы. Система охлаждения формы является той органической частью системы термостатирования, через которую оказывается воздействие на охлаждаемую отливку. Именно эта система охлаждения является одной из основных, обеспечивающих работоспособность форм.

Классификация систем охлаждения отражает несколько признаков. Известны варианты охлаждения отливок вне формы (на съёмных деталях – на воздухе и в ваннах с охлаждающей жидкостью) и в форме (охлаждая непосредственно оформляющие детали формы или менее эффективно – при косвенном их охлаждении путем контакта с охлаждающими плитами и другими деталями). В последнем случае выделяют системы с независимым регулированием температуры охлаждения матрицы, пуансона, знаков, шиберов и т.д. (по необходимости) и с общим – для всей формы или для каждой полуформы в отдельности.

Главный классификационный признак – конструктивные особенности охлаждающих элементов: каналы (круглого, прямоугольного, поперечных сечений), полости (круглого, прямоугольного, конического или по конфигурации внутренней полости изделия сечений), комбинированные варианты; дополнительный признак – расположение этих охлаждающих элементов (параллельное, пересекающееся, спиральное и т.д.) в зависимости от конфигурации и особенностей конструкции изделий.

### *3.6.2. Конструктивные особенности систем охлаждения*

**Охлаждение плоских изделий.** Для охлаждения таких изделий, как правило, используют каналы (в виде замкнутого контура), расположенные в обеих полуформах. На рис. 3.32 показан типовой пример расположения каналов. Их разветвленность зависит от габаритов изделия и гнездности формы (рис. 3.33).

**Охлаждение изделий – тел вращения.** Для охлаждения наружных и внутренних поверхностей круглых изделий используют разнообразные способы. Для охлаждения матриц, формирующих наружные поверх-

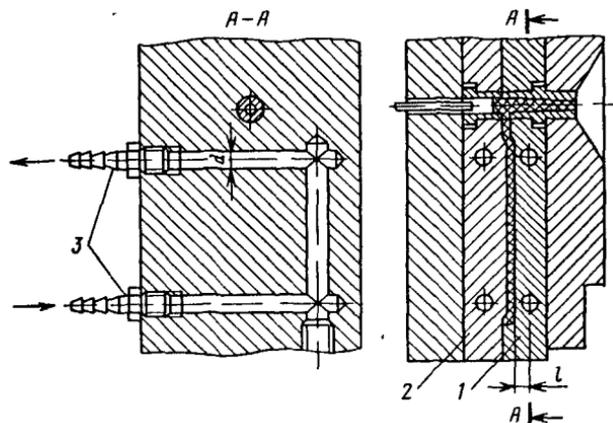


Рис. 3.32. Конструкция канального охлаждения формы для плоских изделий:  
 1 — неподвижная полуформа; 2 — подвижная полуформа; 3 — ниппели

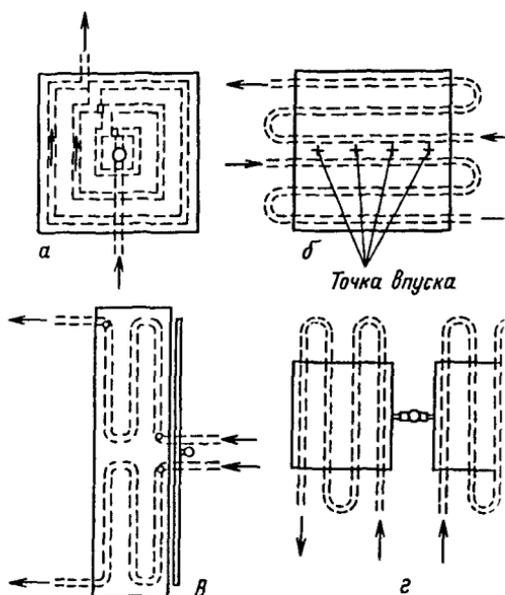


Рис. 3.33. Варианты расположения каналов охлаждения в формах для плоских изделий:  
 а — с центральным литником; б — точечные впуски в многогнездную форму; в — с боковым щелевым впуском (заложен змеевик); г — с боковым точечным впуском

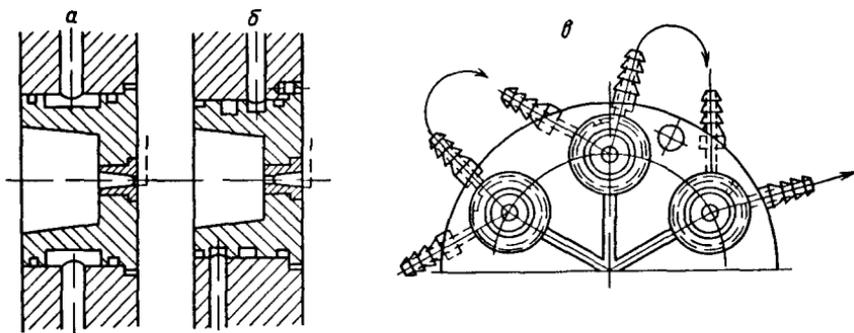
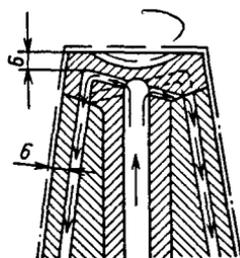


Рис. 3.34. Варианты расположения каналов охлаждения в матрицах:

а — кольцевой канал; б — винтовой канал; в — схема последовательного охлаждения гнезд

Рис. 3.35. Расположение каналов охлаждения в составном пуансоне



ности, этого достигают, пропуская хладагент через: просверленные в матрицах или обоймах матриц каналы (каналы сквозные, с заглушками, глухие); трубчатые змеевики, уложенные в теле матриц; винтовые или кольцевые каналы в матрицах или обоймах матриц и т.д. (рис. 3.34).

В пуансонах, формирующих внутренние поверхности изделия, выполняют охлаждающие каналы или полости — в зависимости от размеров пуансонов. Каналы просверливают и в обоймах пуансонов (в многогнездных формах) или дополнительных плитах. Полости фрезеруют. На рис. 3.35 показан пример конструирования каналов охлаждения в составном пуансоне. Каналы охлаждения пуансонов в многогнездных формах, как правило, соединяются последовательно или параллельно (см. рис. 3.36). Охлаждение длинных и тонких пуансонов требует особых конструкторских решений. Применяют так называемое „пальцевое“ охлаждение, причем теплоотдающие поверхности отверстий „пальцев“ делают развитыми, например шлицевыми, в отверстия вставляют плоские перегородки или трубки (рис. 3.37), а также витые перегородки или поперечные ребра в достаточно широких пуансонах (рис. 3.38), что способствует турбулизации потока хладагента и интенсификации теплообмена. Оценка поверхности теплообмена при таком сложном ее характере и явно нестационарном типе теплообмена с достаточной степенью точности практически невозможна, и здесь главное — опыт конструктора.

Работоспособность системы охлаждения определяется тем, насколько равномерна и стабильна температура оформляющих поверх-

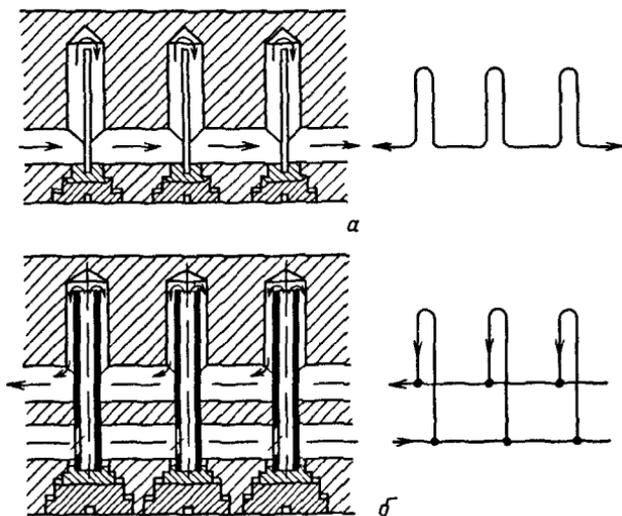


Рис. 3.36. Схемы соединения каналов охлаждения в пуансонах многогнездных форм:  
а — последовательное; б — параллельное

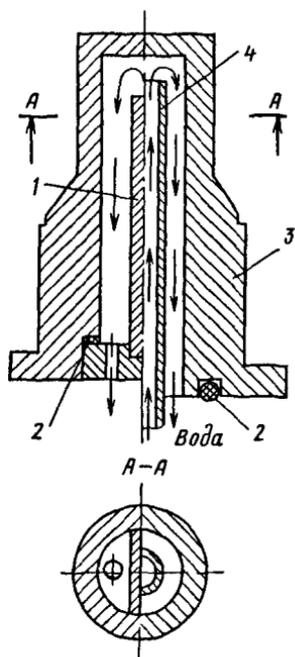
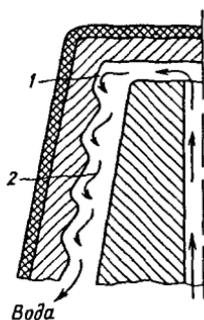


Рис. 3.37. „Пальцевое“ охлаждение длинных и тонких пуансонов (слева — перегородка в отверстии, справа — трубка):

1 — перегородка; 2 — прокладки; 3 — пуансон; 4 — трубка

Рис. 3.38. Схема конструкции охлаждения сборного пуансона, способствующая турбулизации потока хладагента:

1 — витая поверхность; 2 — ребро



ностей. Для изделий из пластмасс, к которым предъявляются высокие требования качества, важно обеспечивать разность температур на поверхности каждой (подвижной и неподвижной) полуформы в пределах 1–2°C. Для изделий неотвественного назначения допускается разность температур даже в пределах 10°C. Чаще всего достаточно создать разность температур не более 5°C.

Интенсивность охлаждения и его равномерность зависят от расположения каналов охлаждения относительно гнезда формы, от поперечного сечения каналов и расстояния между ними и от них до оформляющей поверхности. Трудности с расположением каналов возникают в связи с тем, что они должны огибать такие детали формы, как выталкиватели, направляющие колонки и т.п. По опыту конструирования и изготовления форм диаметры охлаждающих каналов принимают равными 8–10 мм, в самых узких местах они должны быть не менее 6 мм, а сечение – не менее 25–30 мм<sup>2</sup>. Наибольшая величина сечения канала не должна превышать 280–300 мм<sup>2</sup>. При больших сечениях резко увеличивается потребность в охлаждающей жидкости.

Длина каналов должна быть минимальной с тем, чтобы разница температуры хладагента на входе и выходе из канала не превышала 2–3°C.

Каналы диаметром или шириной (при прямоугольных сечениях) до 12 мм должны находиться от поверхности формы на расстоянии, примерно равном диаметру или ширине канала. Наиболее благоприятное расстояние между каналами охлаждения – от одного до полутора диаметров канала. Поэтому при температуре формы выше 70°C рекомендуется устанавливать теплоизолирующие прокладки между формой и плитами литейной машины.

Нарушение или ухудшение работоспособности (приводящее к увеличению фактического цикла литья по сравнению с расчетным значением) может происходить также при недостаточно интенсивном охлаждении или плохо термически сбалансированных полуформах (не удается соблюсти одинаковой их температуры или требуемой спецификой расположения отливки в форме разницы температур). Стремление к интенсификации охлаждения за счет увеличения проходного сечения каналов приводит к чрезмерному ослаблению соответствующих деталей формы и разрушению их при воздействии динамических нагрузок.

Нарушение работоспособности системы охлаждения даже при рациональной ее конструкции может быть связано с разгерметизацией охлаждающих каналов и полостей из-за коррозии металла или зарастания проходного сечения нерастворимыми осадками, выпадающими из воды. Попадание охлаждающей жидкости на оформляющие поверхности недопустимо, так как это приводит к браку; должна быть гарантирована герметичность или, по крайней мере, условия, при которых протечка не ведет к попаданию охлаждающей жидкости в рабочую зону.

### 3.6.3. Расчет системы охлаждения

Задачи расчета системы охлаждения определяются следующим образом: устанавливают количество тепла, отдаваемое расплавом в форме; находят расход хладагента (чаще всего – воды), задаваясь допустимой разностью температур его на входе и выходе из системы охлаждения (или – наоборот); определяют скорость движения хладагента, исходя из задаваемых, выбранных диаметров охлаждающих каналов или размеров полостей; определяют коэффициент теплоотдачи от формы к хладагенту, критерии, характеризующие процесс теплообмена; рассчитывают площадь теплоотдающей поверхности, длину и количество каналов или поперечное сечение полостей, расстояние между каналами. При необходимости корректировки размера выбранного диаметра каналов или размеров полости решение задач в указанной выше последовательности повторяется.

Рассмотрим методику расчета системы охлаждения.

Количество тепла  $Q_M$  поступающего в единицу времени в форму от охлаждающихся в ней изделий, равно:

$$Q_M = mc(T_p - T_K)/T_{ц}$$

где  $m$  – масса отливки, кг;  $c$  – теплоемкость термопласта, кДж/(кг·град);  $T_{ц}$  – время цикла формования изделия, с;  $T_p$  – температура поступающего в форму расплава, К;  $T_K$  – температура, до которой охлаждаются изделия в форме, К.

Время  $T_{ц}$  приближенно можно рассчитывать по следующей формуле:

$$T_{ц} \approx 1,3 \tau_{охл}; \quad \tau_{охл} = - \left( \frac{1}{\lambda} \right) \left( \frac{\delta^2}{4a} \right) \ln \left[ \frac{4}{\pi^2} (T_K - T_{\phi}) / (T_p - T_{\phi}) \right],$$

где  $\delta$  – половина толщины стенки изделий, м;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $T_{\phi}$  – температура формы, К;  $\tau_{охл}$  – время охлаждения изделия в форме.

Массовый расход охлаждающей воды  $G$ , кг/с, необходимый для отвода тепла  $Q_M$ , поступающего в форму с материалом, равен:

$$G = Q_M / [c_B(T_{в,к} - T_{в,в})],$$

где  $c_B$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $T_{в,в}$ ,  $T_{в,к}$  – температура воды на входе и выходе из формы соответственно, К.

Приведенные ниже расчетные формулы ориентированы на канальную конструкцию системы охлаждения. Скорость течения воды в каналах формы  $v_B$  равна:

$$v_B = 4G / (\rho_B \lambda d^2),$$

где  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Количество тепла  $Q_F$ , которое способна отвести система охлаждения от формы в единицу времени, составляет

$$Q_F = Kf(T_{\phi} - \tilde{T}_B),$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи от изделия к охлаждающей среде, кДж/(м<sup>2</sup>·м·К);  $f$  – площадь (для круглых каналов  $f = \pi d l_{\Sigma}$ ) поверхности охлаждающих каналов, м<sup>2</sup>;  $l_{\Sigma}$  –

суммарная длина каналов, м;  $\bar{T}_B = 0,5(T_{B,K} + T_{B,H})$  — среднее значение температуры воды в форме, К.

Конструкция системы охлаждения удовлетворительна, работоспособна, если она отводит от формы количество тепла  $Q_F$ , не меньшее, чем поступает в форму с материалом  $Q_M$ , т.е.  $Q_F \geq Q_M$  при том, что диаметры (размеры) каналов находятся в диапазоне  $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ .

Коэффициент теплопередачи  $K$  определяется тепловым сопротивлением стенки формы и коэффициентом теплоотдачи от формы к воде:

$$K = [(\delta_M/\lambda_M) + (1/\alpha)]^{-1},$$

где  $\lambda_M$  — теплопроводность металла формы, кДж/(м·с·К);  $\delta_M$  — характерное расстояние от изделия до канала системы охлаждения, м.

При турбулентном течении жидкости в круглой трубе теплообмен определяется следующей критериальной зависимостью:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}; \quad Nu = \alpha d/\lambda_B; \quad Re = (v/v_B)d,$$

где для воды при температурах, близких к комнатной,  $Pr \approx 2,4$ ;  $\lambda_B$  — теплопроводность воды, кДж/(м·с·К);  $v_B$  — кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с.

После необходимых подстановок получаем, что величина теплового потока  $Q_F$  зависит от диаметра (размера) канала охлаждения:

$$Q_F = Ad/(B + C + d^{1,8}),$$

где  $A = \pi l_{\Sigma}(T_{\phi} - \bar{T}_B)$ ;  $B = \delta_M/\lambda_M$ ;  $C = 32(v_B \rho_B \pi)^{0,8}/\lambda_B$ .

Эта зависимость приведена на рис. 3.39. Кривая „а” показывает, что возможен вариант, когда даже  $Q_F^{\max} < Q_M$ , т.е. при любых  $d$  конструкция системы охлаждения неудовлетворительна. В варианте „б” условие  $Q_F > Q_M$  выполнимо в диапазоне диаметров  $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ .

Полезно оценить, насколько отличается фактическое значение  $d$  от значения  $d_*$ , соответствующего  $Q_F^{\max}$ . Для этого берется производная от  $Q_F$  по  $d$ , приравнивается к нулю и разрешается относительно  $d$ .

Получаем:  $Q_F^{\max} = 0,502AB^{-0,44}C^{-0,55}$ ;  $d_* = 1,13(B/C)^{0,35}$ . Общая схема алгоритма расчета представлена на рис. 3.40.

Суммарная длина охлаждающих каналов  $l_{\Sigma} = f/\Pi = f/\pi d$ , где  $\Pi$  — периметр.

Число охлаждающих каналов  $n_k = l_{\Sigma}/l_1$ , где  $l_1$  — ширина плиты с охлаждающими каналами (устанавливается по чертежам).

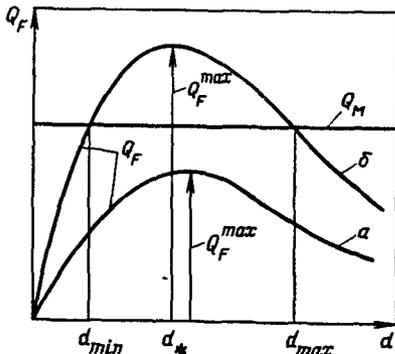


Рис. 3.39. Зависимость теплового потока  $Q_F$  от диаметра канала  $d$

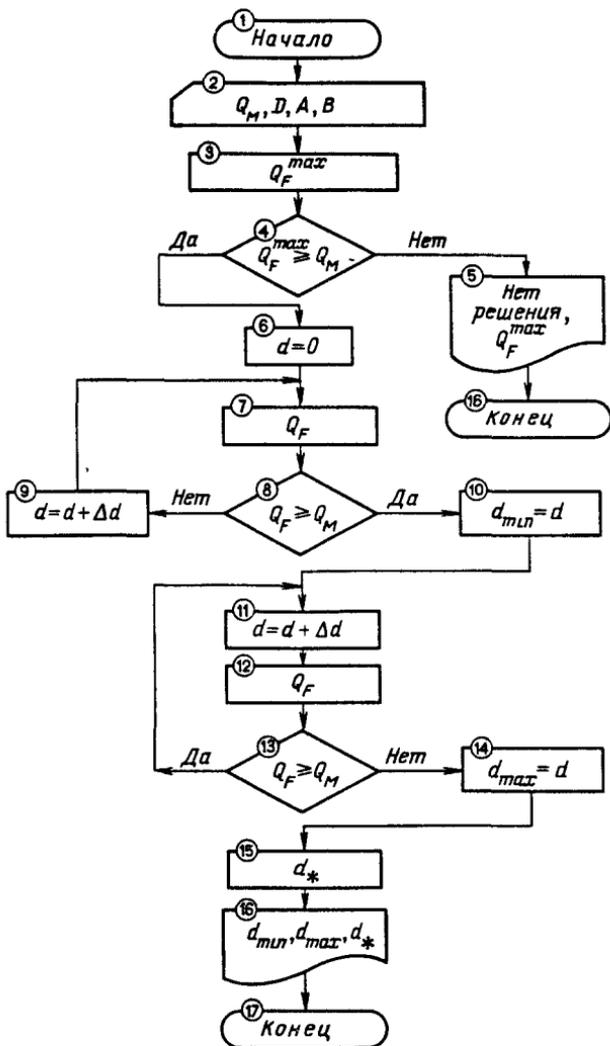


Рис. 3.40. Схема алгоритма расчета диаметров каналов системы охлаждения

### Расстояние между каналами

$$l_{к,к+1} = 2 \ln \left\{ (T_{к,к+1}/T) \pm [(T_{к,к+1}/T)^2 - 1]^{1/2} \right\} / [\alpha_{\phi} P / (\lambda_{\phi} T)]^{1/2},$$

где  $T_{к,к+1}$  — температура в середине промежутка между каналами формы;  $T = T_{к,к+1} - 0,5$ ;  $\alpha_{\phi}$ ,  $\lambda_{\phi}$  — коэффициент теплоотдачи, теплопроводности материала формы соответственно;  $P = 2(b+h)$ ,  $f = bh$  ( $b$  — ширина просвета между каналами,  $h$  — высота просвета).

### 3.7. Системы выталкивания

#### 3.7.1. Назначение, классификация и конструктивные особенности

Назначение системы выталкивания – удаление без повреждения отливки из формы за возможно короткое время и возврат формы в исходное положение. Удаление (извлечение из матрицы, а с пуансона – сталкивание, сброс), может быть связано с отделением (отрывом) литников от изделия; оно реализуется в результате возвратно-поступательного перемещения подвижной полуформы (основное движение) и, при необходимости, перемещений специальных деталей или приводов, кинематически связанных с подвижной полуформой (дополнительные движения).

Проблемы при выталкивании изделий связаны с выбором рациональной схемы конструкции системы. Для этого надо учитывать: характер усадки разных элементов изделия; прилипание (адгезию) поверхности изделия к форме; другие усилия, прижимающие изделие к поверхности формы. Благодаря усадке изделие, как правило, без затруднений извлекается из гнезда матрицы (усадка направлена „в тело” изделия, между ним и стенкой формы проникает воздух), но удерживается на пуансоне, знаке (на внутренней поверхности изделия возникают напряжения растяжения, так как пуансон препятствует усадке). Силы прилипания (адгезии) изделия к форме зависят от особенностей материалов пары, шероховатости поверхностей пары, величины остаточного давления в форме. Выталкиванию препятствует и разность давления – атмосферного и возникающего между изделием и пуансоном.

В итоге результирующее усилие, прижимающее изделие к поверхности формы, должно быть преодолено силой, удаляющей изделие (полное осевое усилие, преодолевающее силы трения, вызываемые результирующим усилием, а также расходуемое на перемещение деталей выталкивающей системы). Важным является обеспечение такого усилия, при котором не возможны повреждения отливки (смятия поверхностей под выталкивателями; прогиб, растяжение или срезание стенок, перпендикулярных направлению сталкивания; задиры поверхностей; гофрирование стенок и т.д.). Здесь важнейшим фактором является температура изделия в момент начала удаления его из формы, а кроме того – величины коэффициента трения, адгезии, допускаемые напряжения материала при температуре извлечения изделия.

Система выталкивания состоит из деталей, образующих „камеру” для размещения выталкивателей, собственно выталкивателей, деталей сброса и возврата системы в исходное положение.

Чрезвычайно разнообразны по конструкции и принципу действия выталкиватели и выталкивающие устройства: стержневые, плоские, трубчатые, кольцевые, „грибковые”, пружинные выталкиватели; сталкивающие плиты; сталкивающие планки и полуматрицы, кассеты, съемные детали; противовакуумные устройства; пневматические

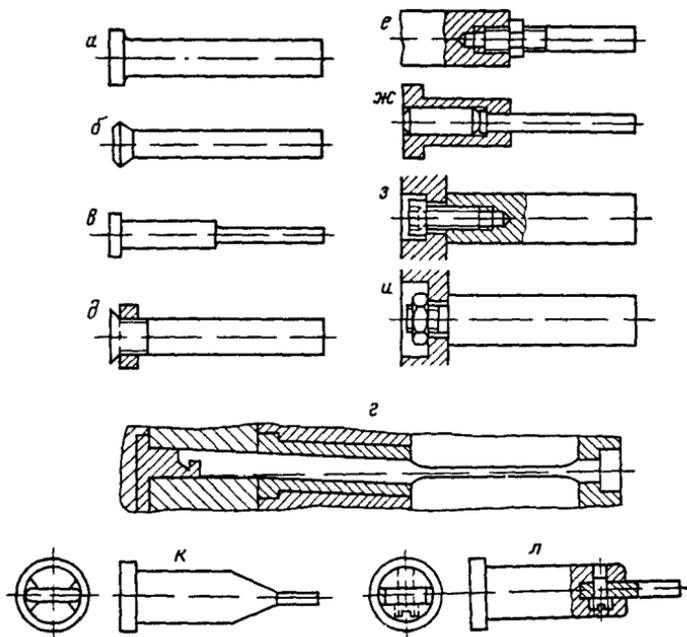


Рис. 3.41. Стержневые (а—и) и плоские (к, л) выталкиватели:

а, б — гладкие; в — ступенчатые; г — комбинированные гибкие; д — с гайкой; е, ж — с держателями; з, и — резьбовые; к — цельные; л — составные

устройства; гидравлические устройства; детали системы двойного сталкивания и др. Рассмотрим некоторые конструктивные особенности выталкивателей.

На рис. 3.41 представлены основные типы стержневых и плоских выталкивателей. Отверстие, в котором перемещается выталкиватель, выполняют по качеству H7, а длину отверстия принимают из расчета  $l=2d+5$ , мм ( $d$  — диаметр выталкивателя).

Для стержневых выталкивателей диаметром менее 3 мм длина отверстия  $l$  должна быть в пределах  $(5 \div 6) d$ . Меньшая длина направляющего отверстия может вызвать перекосы и проникание расплава за выталкиватель, большая длина — привести к значительным потерям энергии на трение и заклиниванию выталкивателя. Комбинированный гибкий выталкиватель имеет участок с ослабленным сечением (что делает его гибким) и участок, оформляющий в отливке поднутрение. Благодаря наклону направляющей втулки при движении вперед гибкий выталкиватель отклоняется в сторону, освобождая поднутрение, и выталкивает отливку.

Стержневые выталкиватели, действующие на торцы боковых стенок изделия, называют торцовыми. Их располагают на расстоянии

0,2–0,5 мм от внутренней поверхности с тем, чтобы выталкиватель не задевал за боковую поверхность пуансона.

Различные типы плоских выталкивателей могут быть выполнены как цельными, так и составными. Возможно применение очень тонких плоских выталкивателей, но только с направляющими.

В ряде случаев во избежание повреждения отливки при сталкивании ее с пуансоном применяют такие выталкиватели, которые воздействуют на всю торцовую поверхность отливки. К ним относятся трубчатые и планочные выталкиватели, плиты и кольца съема.

Трубчатые выталкиватели обычно применяют для снятия круглых изделий небольших диаметров с тонкими стенками. Кольца съема (как правило – цилиндрические) применяют для тонкостенных высоких изделий с небольшой конусностью. Их применяют в многогнездных формах, где каждое гнездо имеет собственный выталкиватель, установленный в общей плите съема. Типовая схема выталкивания дана на рис. 3.42.

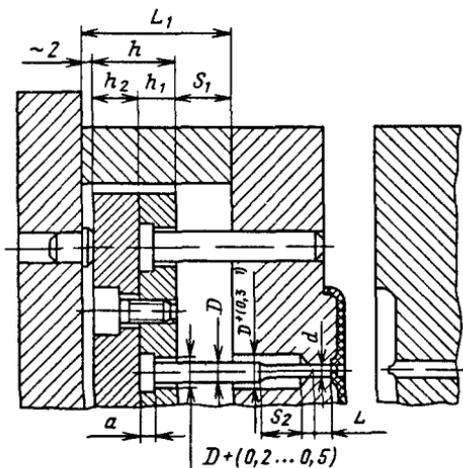


Рис. 3.42. Типовая схема механического выталкивания

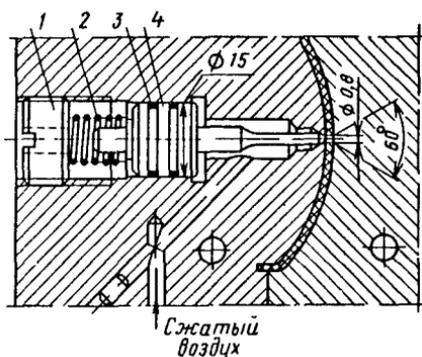


Рис. 3.43. Пневматическая система выталкивания:

1 – пробка; 2 – пружина; 3 – уплотнительное кольцо; 4 – игольчатый клапан

Плиты съема особенно часто применяют, когда при выталкивании требуется преодолеть значительные усилия (эластичные материалы, небольшие поднутрения на внутренних поверхностях и т.д.), когда извлекается нежесткое тонкостенное, легко деформируемое изделие. Плита позволяет равномерно распределить усилие съема на большую поверхность и тем самым обеспечить минимальное давление на ее единицу. Плиты съема имеют еще одно существенное преимущество перед стержневыми и плоскими выталкивателями: они позволяют конструктору более маневренно располагать каналы и полости для охлаждения формы. Разнообразие конструкций непосредственно связано с многообразием изделий, их габаритами, сложностью, а также зависит от гнездности форм. Особенно много различных вариантов механических систем выталкивания.

Перемещение плит выталкивателей и плит съема производится непосредственно с помощью упора машины, опорной плиты и хвостовика формы. Плиты съема и вообще выталкивающая система могут располагаться не только в подвижной, но и в неподвижной полуформах; это несколько усложняет конструкцию деталей, ответственных за перемещение, — применяют рычаги, закрепленные в подвижной полуформе; планки, телескопически связанные с неподвижной полуформой, пружины и рычажно-параллелограммный механизм.

Пример пневматической системы выталкивания показан на рис. 3.43. Сжатый воздух подводят через грибковый или игольчатый клапан. Пневматический выталкиватель чаще всего размещают в центре отливки, его необходимо интенсивно охлаждать. Игольчатый клапан применяют в формах для изделий со сложной наружной конфигурацией.

Для работы пневматического выталкивателя необходим сжатый воздух давлением 4–6 атм. Его можно подводить через клапан, приводимый в движение вручную или рычагом, установленным на подвижной части формы. Клапаны могут управляться от реле времени.

В автоматических формах для повышения надежности работы применяют комбинированные механо-пневматические системы, полностью устраняющие возможность „зависания” отливок на знаках, пуансоне или выталкивателях. С этой же целью применяют и многоступенчатое выталкивание (двойное, тройное). Очередность выталкивания обеспечивают пружины, храповики, кулачки, шариковые фиксаторы. Вообще полезно даже в случае выталкивания с помощью простых выталкивателей подпружинивать их; пружины дают дополнительный импульс движению, а это повышает надежность срабатывания системы, обеспечивая безусловный сброс изделия.

Возврат выталкивающей системы осуществляют пружиной, толкателем, кулачковым диском и др. (рис. 3.44).

В формах с раздвижными полуматрицами необходимо полное удаление выталкивателей на определенной стадии замыкания формы,

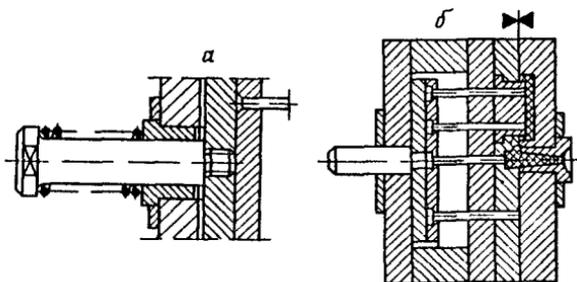


Рис. 3.44. Варианты конструкций возврата выталкивающей системы:  
 а — пружиной; б — толкателем

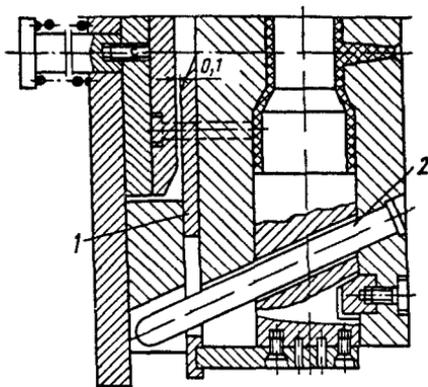


Рис. 3.45. Механизм принудительного возврата выталкивателей поперечными планками 1, соединенными с ползуном 2

иначе происходит столкновение полуматриц с выталкивателями и поломка формы. Для предотвращения столкновения применяют механизм опережающего возврата выталкивателей, например, кулачковый.

Пружина возвращает выталкиватели в начале замыкания формы, что необходимо при литье с арматурой, а также в тех случаях, когда выталкиватель должен освободить путь для боковых подвижных оформляющих частей формы (полуматриц, знаков и т.д.).

Возврат выталкивателей может производиться с помощью поперечных планок, соединенных с ползуном (рис. 3.45). Во время замыкания формы возврат обеспечивается под действием центральной пружины, которая установлена на хвостовике поперечной планки 1, перемещаемой наклонным пальцем 2. Если пружина не возвратит выталкиватели, их переместит планка 1, упираясь скошенной поверхностью в плиту выталкивателей.

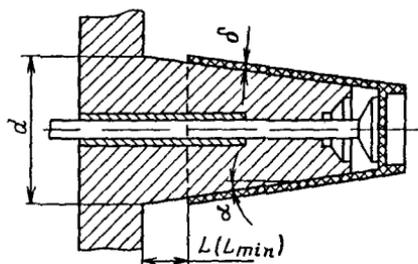
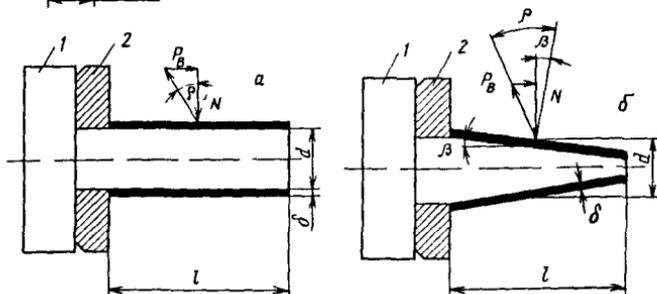


Рис. 3.46. Схема выталкивания конического изделия с дном (к определению хода выталкивателя  $L_{min}$ )

Рис. 3.47. Схемы действия сил при выталкивании цилиндрического (а) и конического (б) изделий:

1 — пуансон (знак); 2 — сталкивающая плита; 3 — изделие



### 3.7.2. Расчет перемещений выталкивающей системы и усилий выталкивания изделий

Определение величины перемещения (хода) выталкивающей системы должно учитывать ограничения хода выталкивания машины-автомата. Для полного сталкивания, например, глубокого изделия с пуансона может понадобиться ход, превышающий возможности машины; тогда определяют минимально допустимый ход  $L_{min}$  (рис. 3.46):  $L_{min} = dS/(200tg\alpha)$ , где  $d$  — наибольший диаметр пуансона,  $S$  — усадка материала изделия;  $\alpha$  — угол наклона образующей пуансона. В простейшем случае, когда изделие цилиндрическое, для определения усилия выталкивания определяют величину деформации изделия (уменьшения толщины стенки за счет сжатия, усадки объема)  $\epsilon = 3S/100$ ; растягивающее напряжение в отливке  $\sigma_p = \epsilon E$ ; удельное давление отливки на пуансон  $P_{уд} = \sigma_p 2\delta/d$  ( $\delta$  — толщина стенки изделия). Тогда усилия выталкивания (съемы)  $P_в = f P_{уд} f_б$  ( $f$  — коэффициент трения пластмассы по стали,  $f_б$  — площадь боковой поверхности отливки), а это выражение равно и силе трения  $F_{тр}$ . При расчетах следует величину  $E$  выбирать при температуре, соответствующей температуре извлечения отливки из формы.

Величину  $P_{уд}$  находят и другим путем, используя понятие относительного натяга в цилиндрических неподвижных посадках:

$$P_{уд} = S/[d(C/E + C_1/E_1)],$$

где  $E, E_1$  — модуль упругости термопласта и материала пуансона (знака) соответственно;  $C = \mu + [(K^2 + 1)/(K^2 - 1)]$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $K = D/d$ ;  $D$  — наружный диаметр изделия.

Поскольку  $E_1 \gg E$ , то величиной  $C_1/E_1$  можно пренебречь. Тогда

$$p_{уд} = (S/d)(E/C), \text{ где } C = \{\mu + [(K^2 + 1)/(K^2 - 1)]\}.$$

Сила трения определяется по известной формуле

$$F_{тр} = f p_{уд} f_6 = f p_{уд} \pi dl = f \sigma_p 2\pi l,$$

где  $l$  — длина изделия или длина части знака, находящаяся в контакте с изделием.

Усилие выталкивания (полное осевое усилие) будет равно  $P_B = F_{тр}$ . Опыт показывает, что для большей надежности выталкивания изделий из автоматических форм желательно, чтобы  $P_B \geq 1,15F_{тр}$ .

Схемы на рис. 3.47 поясняют действие сил при выталкивании изделий:  $N$  — нормальная сила от усадки изделия, сжимающая пуансон, знак;  $\text{tgr} = f$ . Для изделия с конической внутренней поверхностью

$$P_B = f p_{уд} f_6 = f \sigma_p 2\pi l \delta \text{tg}(\rho - \beta),$$

где  $\beta$  — угол, дополняющий до нормали к поверхности (при  $\beta = \rho$   $P_B = 0$ ), зависящей от силы адгезии к поверхности.

Удаление резьбовых изделий из формы требует предварительного свинчивания резьбоформирующих знаков или вывинчивания изделия из резьбоформирующих гнезд. Сопrotивление этому оказывает сила трения, возникающая при вращении знака в пластмассовой резьбе (или наоборот).

Резьба пластмассового элемента сжимается от усадки, но эта усадка не свободная, и в теле изделия возникают внутренние напряжения. Можно условно принять, что эти напряжения подчиняются на упругом участке зависимости  $\sigma - \epsilon$  закону Гука, причем  $\epsilon$  имеет то же значение, что и усадка, поскольку удлинение невозможно из-за сжатия материала изделия в форме.

Рассматривая равновесие сил и напряжения, получаем, что момент трения отвинчивания  $M_{тр} = fSEV$ , где  $V$  — объем резьбовой части изделия. Величина  $M_{тр}$  является исходной для расчета размеров привода свинчивания.

### 3.8. Системы перемещения и центрирования

Точность перемещения подвижной полуформы связана с точностью центрирования обеих полуформ. Это перемещение обеспечивается механизмом смыкания машины-автомата; ход механизма (и, следовательно, ход разъема полуформ, достаточный для извлечения изделий) установлен паспортом оборудования (см. разд. 3.3.1).

Рассмотрим конструктивные особенности системы перемещения деталей, оформляющих боковые отверстия, поднутрения на наружных и внутренних поверхностях отливок. Эти детали (раздвижные полуматрицы, составные пуансоны, знаки) перемещают с помощью приводов — механического, гидравлического, пневматического. Их пере-

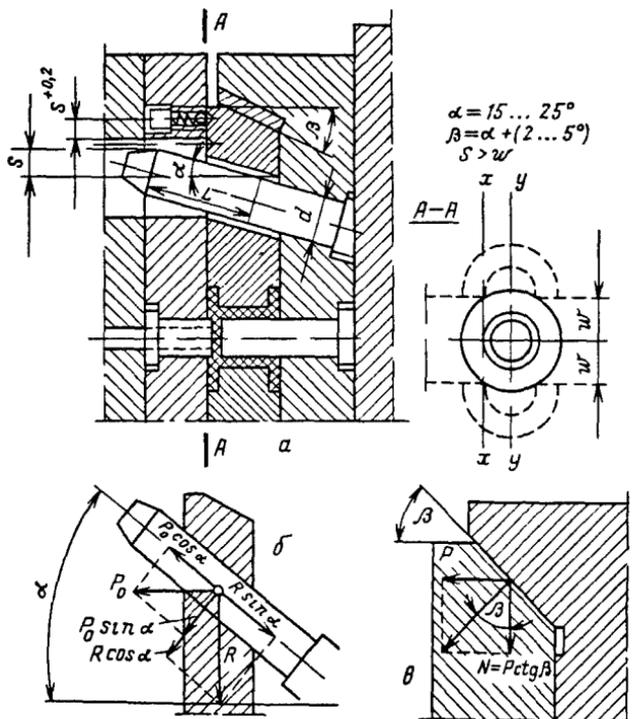


Рис. 3.48. Схема механического привода перемещения подвижного элемента с помощью наклонной колонки (а), распределение сил в колонке (б) и на поверхности клина (в). Пояснения в тексте

щение связано с соблюдением заданной точности движения, возвращением в исходное состояние, т.е. с центрированием соответствующих сопрягаемых деталей. Вариантов разнообразных конструкторских решений много.

При оформлении наружных поднутрений чаще всего используют наклонную колонку (палец) (рис. 3.48). Величина хода  $S$  рассчитывается относительно плоскости  $x-x$ , причем  $S > w$  (см. формулы на рис. 3.48). Рабочая длина наклонной колонки  $L = S \sin \alpha$  ( $\alpha$  — угол наклона). Из диаграммы сил видно, что суммарное усилие, действующее на колонку, равно  $R = P_0 \cos \alpha$  (где  $P_0$  — усилие размыкания); чем меньше  $\alpha$ , тем меньше  $P_0$  и изгибающее усилие  $P_0 \sin \alpha$ , и больше усилие  $N$ , прижимающее подвижный элемент к поверхности отливки. Для более сильного прижима угол  $\alpha$  выбирают в пределах  $15-25^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ , с уменьшением  $\alpha$  увеличивается  $L$ .

Число наклонных пальцев зависит от размеров подвижных элементов. Если они узкие, с длинными направляющими, применяют один

палец, а для широких с короткими направляющими – два пальца с максимально возможным расстоянием между ними.

Если отливка при размыкании формы остается в неподвижной ее части, подвижные элементы также располагают в неподвижной части формы, а наклонные пальцы – в подвижной. В некоторых формах наклонные пальцы являются одновременно и оформляющими знаками.

Клиновое или шиберное устройство перемещения в отличие от колонок позволяет начать перемещение подвижного элемента со значительным запаздыванием. Благодаря этому появляется возможность снять отливку с пуансона до начала движения подвижного элемента, расположенного со стороны, противоположной пуансону.

Во многих случаях для привода подвижных элементов используют пружины, особенно когда усилия извлечения знаков незначительны. Пружины используют только для извлечения знаков из отливки, а для их возврата в исходное положение применяют опорные клинья. В механизмах перемещения боковых знаков применяют толкатели и механизмы с боковыми направляющими.

Гидропривод используют для извлечения из отливки крупных подвижных элементов при значительных усилиях, для получения большого хода при длинных оформляющих знаках, когда применение механического привода затруднено из-за конструктивных особенностей формы. Для гидравлического привода используют гидроцилиндры двойного действия, чаще всего включаемые в гидросистему и систему управления литейной машины.

Применение гидравлического привода для знаков упрощает конструкцию формы. Оформление поднутрений на внутренней поверхности отливки осуществляется сегментами, составными пуансонами, наклонными толкателями и т.п.

Оформляющие сегменты образуют поднутрения небольшой глубины. Сегменты и механизмы их перемещения занимают немного места в форме по сравнению с ползунами.

Принцип действия сегментного механизма: сегменты, охватывающие всю отливку или отдельные ее части, перемещаются вместе с ней по мере размыкания формы; при движении они одновременно расходятся и освобождают поднутрения. Движение под углом к оси формы обеспечивается специальными наклонными направляющими; коническая или клиновидная обойма запирает сегменты в закрытой форме, а ход их ограничивается упорами. Сегменты могут приводиться в движение прямыми или наклонными толкателями, пружинами, с помощью цепной передачи и другими способами. При этом сегменты выдвигаются под действием толкателей, установленных в плитах выталкивателей. Так как направление толкателей параллельно оси формы, то сегменты имеют направляющие, благодаря которым обеспечивается их наклонное движение. Чем меньше угол скоса сегментов, тем больше усилие для их перемещения и меньше величина расхождения. Чтобы происходило свободное движение сегментов в направляющих, угол наклона направляющих должен быть  $\alpha = 10 \div 15^\circ$ .

Особые подвижные элементы предназначены для оформления резьбы, в основном внутренней, так как наружная резьба чаще всего образуется раздвижными полуматрицами. Перемещение подвижных элементов при оформлении резьбы всегда сложно и включает либо два прямолинейных движения, либо представляет собой сочетание вращательного и прямолинейного движений (в первом случае чаще используют прерывистую резьбу). Подвижные элементы не должны смещаться после раскрытия формы, поэтому в крайних положениях их фиксируют – с помощью шариков, пальцевых фиксаторов, пружинных или пневматических предохранителей.

Система центрирования непосредственно влияет на качество изделий. Она должна обеспечить точное центрирование пуансона относительно матрицы в момент смыкания полуформ и при впрыске. Неблагоприятные смещения могут происходить из-за несимметричной конфигурации изделия и неравномерности заполнения полости, несимметричной плоскости разъема формы, дефектов крепления формы к плитам машины, износа направляющих колонн машины и т.д. Эти смещения вызывают значительные поперечные силы, действующие на центрирующие детали, а также дополнительные силы трения на контактных поверхностях. Для расчета размеров центрирующих колонок и втулок необходимо определять такие силы. На рис. 3.49 показаны схемы, позволяющие определять необходимые поверхности давления от поперечных сил на пуансоны – для круглой и прямоугольной отливок.

В форме для круглой отливки поверхность давления  $F_1$  – это проекция параболы на плоскость, параллельную оси пуансона. Тогда поперечная сила  $Q_1 = F_1 P = 2/3 d_1 h P$  (см. рис. 3.49, а). В форме для прямоугольной отливки поверхность давления  $F_2$  практически совпадает с боковой стороной пуансона, тогда поперечная сила  $Q_2 = F_2 P = ahP$  (см. рис. 3.49, б).

Выбор того или иного способа центрирования зависит от величины поперечных сил, допустимой несоосности пуансона и матрицы, формы изделия и технологических возможностей изготовления формы.

Положение частей формы обеспечивается направляющими колонками и планками, коническими или наклонными поверхностями, поперечными валиками, коническими цапфами и т.д.

Направляющие колонки не только центрируют пуансон и матрицу, но по ним перемещаются плиты формы при замыкании и размыкании. Они должны обладать достаточной жесткостью и прочностью, чтобы взаимное смещение частей формы не вызвало в них упругой деформации, превышающей допустимую величину. Поэтому необходимо правильно выбрать диаметр колонки, обеспечить необходимую посадку колонок в плите соответствующей толщины (толщина плиты берется большей или равной  $1,5d$ , где  $d$  – диаметр колонки), соосность колонок и направляющих втулок, а также взаимную параллельность колонок и их перпендикулярность основанию. Конструкции направля-

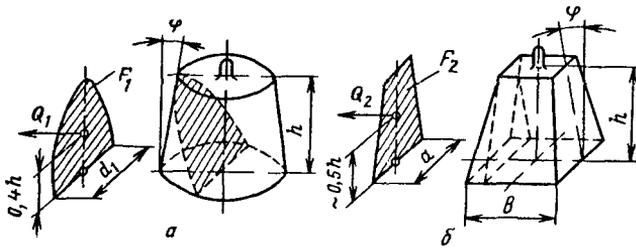


Рис. 3.49. Определение поверхностей давления от поперечной силы на пуансоны:  
 а — для круглой отливки; б — для прямоугольной отливки

ющих колонок стандартизованы по ГОСТ 22072–76, а втулок — по ГОСТ 22073–76; втулки центрирующие — по ГОСТ 22075–76 и др.

Для направления и фиксации частей крупных литейных форм применяют направляющие планки, привинчиваемые к боковинам формы. Обычно используют четыре планки, расположенные по четырем сторонам или углам формы. Их преимущества: точность направления, высокая несущая способность, возможность смены изношенных планок без разборки формы, малая зависимость от теплового расширения плит.

Применение конических поверхностей для центрирования оформляющих деталей формы обеспечивает высокую точность фиксации и позволяет использовать их в формах с повышенной поперечной нагрузкой (рис. 3.50). Во время впрыска на коническую поверхность

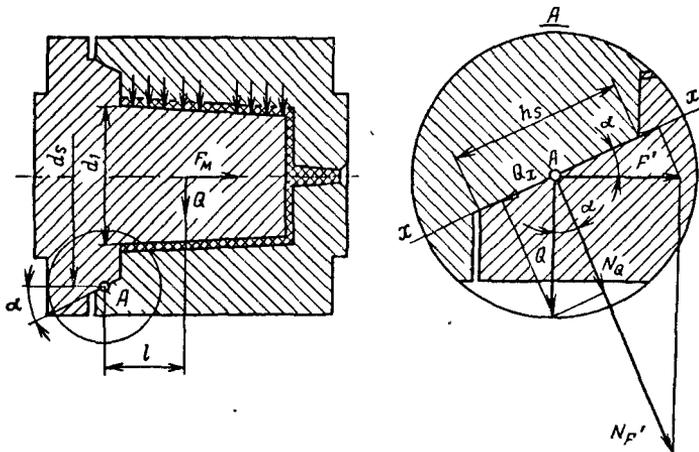


Рис. 3.50. Схема распределения сил в форме с фиксацией конической поверхностью. Пояснения в тексте

действует сила  $F' = F_M - F_T = F_M - (\pi d_1^2/4)P$ , где  $d_1$  — наибольший диаметр конического пуансона. Поперечная сила  $Q$ , действующая на точку  $A$  дополнительно к силе  $F'$ , уточняет условия отсутствия размыкания формы:  $F' \geq Q2l/d_s$ . Высота фиксирующего конуса  $h_s$  рассчитывается при условии, что все давление воспринимается поверхностью конуса.

При этом возможны два случая: коническая поверхность передает всю силу  $F_M$  или она передает часть усилия замыкания  $F'$  и поперечную силу  $Q$ . Для первого случая

$$h_s \geq F_M / (\pi d_s \sin \alpha [\sigma_{см}]), \text{ мм},$$

а для второго случая

$$h_s \geq (F' + Q \sin 2\alpha) / (\pi d_s \sin \alpha [\sigma_{см}]), \text{ мм},$$

где  $[\sigma_{см}]$  — допускаемое напряжение на смятие.

## ЭКСТРУЗИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТ

### 4.1. Общее устройство экструзионных головок и калибрующих устройств

Назначение экструзионного формующего инструмента – оформление подготавливаемого экструдером расплава полимера в непрерывное изделие с постоянным (реже переменным) по длине поперечным сечением заданной формы.

Расплав сначала оформляется в виде непрерывного профиля, поперечное сечение которого весьма близко к окончательному; эту функцию выполняет первый, необходимый во всех случаях элемент экструзионного инструмента – головка. Придание конечной конфигурации изделию и охлаждение его, достаточное для сохранения приобретенной конфигурации в течение времени транспортировки до устройства, обеспечивающего окончательное охлаждение, выполняется вторым элементом – калибрующим устройством. Наличие этого элемента не всегда обязательно. При изготовлении, например, рукавных пленок методом раздува калибрующие устройства отсутствуют; при производстве листов функции калибрующих устройств выполняют валковые машины.

Основные конструктивные элементы головок рассмотрим на примере головки для производства изделия трубчатой формы с треугольным поперечным сечением (рис. 4.1). Любая головка имеет формующий канал 12; его поперечное сечение повторяет форму поперечного сечения изделия. Наружная поверхность формируемого в этом канале изделия оформляется одной или несколькими деталями, называемыми мундштуком 11 (менее распространенные названия этой детали – матрица, фильера). Если поперечное сечение изделия полое, то внутренняя поверхность его оформляется дорном 15. Мундштук и дорн являются сменным инструментом головки, поскольку конфигурация их зависит от изготавливаемого в данный момент изделия. Дорн крепится к корпусу 7 головки посредством дорнодержателя 6. Изображение дорнодержателя сбоку показано на виде Б. Центральная его часть 6, к которой крепится дорн, соединена с его наружным кольцом 4 посредством двух или более ребер 5 дорнодержателя (в данном случае четырех).

подавляющее большинство головок имеет устройства для регулирования зазора формирующего канала. Как правило, это обеспечивается четырьмя (минимум тремя) болтами 19. Переходный канал 18 предназначен для плавного преобразования круглого (в данном случае кольцевого) на входе поперечного сечения в требуемое поперечное сечение формирующего канала.

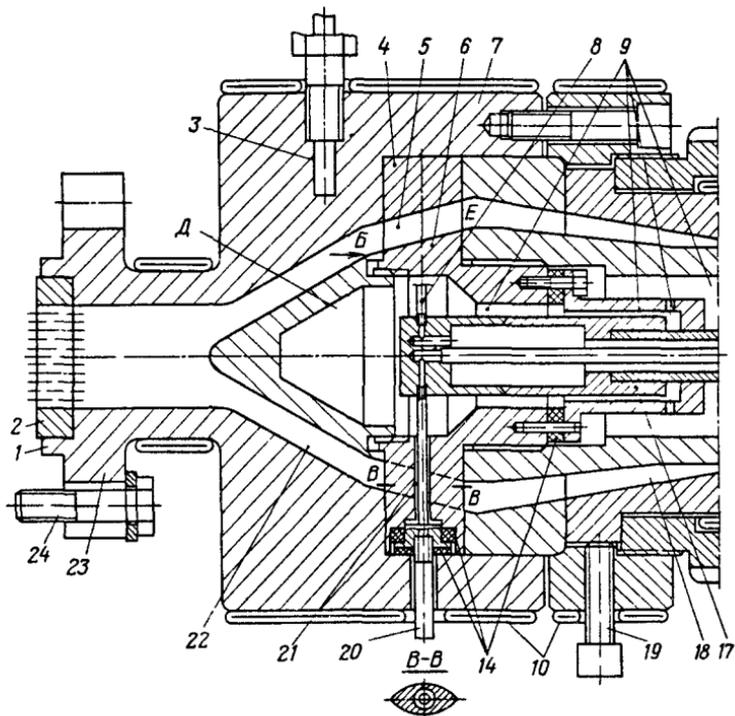
На входе в подводящий канал 22, как правило, устанавливается решетка 21; решетка в ряде случаев служит опорным элементом для одной сетки или пакета устанавливаемых перед ней сеток. Одно из

назначений решетки и сеток – фильтровать расплав, другое – создавать дополнительное гидравлическое сопротивление, обеспечивающее необходимое для удовлетворительной пластикации полимера давление перед червяком (в том случае, если собственное гидравлическое сопротивление каналов головки оказывается недостаточным для этого).

Часто внутрь полого изделия необходимо вводить в какой-либо агент (например, воздух под давлением для калибровки трубы, тальк для предотвращения слипания гонкостенного рукава из резиновой смеси до ее вулканизации и т.д.) или просто сообщать полость изделия с атмосферой. Это осуществляется через специальные отверстия 21 (в данной конструкции выполняются в ребрах дорнодержателя). В описываемой конструкции, например, эти отверстия используются для подачи и отвода охлаждающей воды в калибрующее устройство 13,

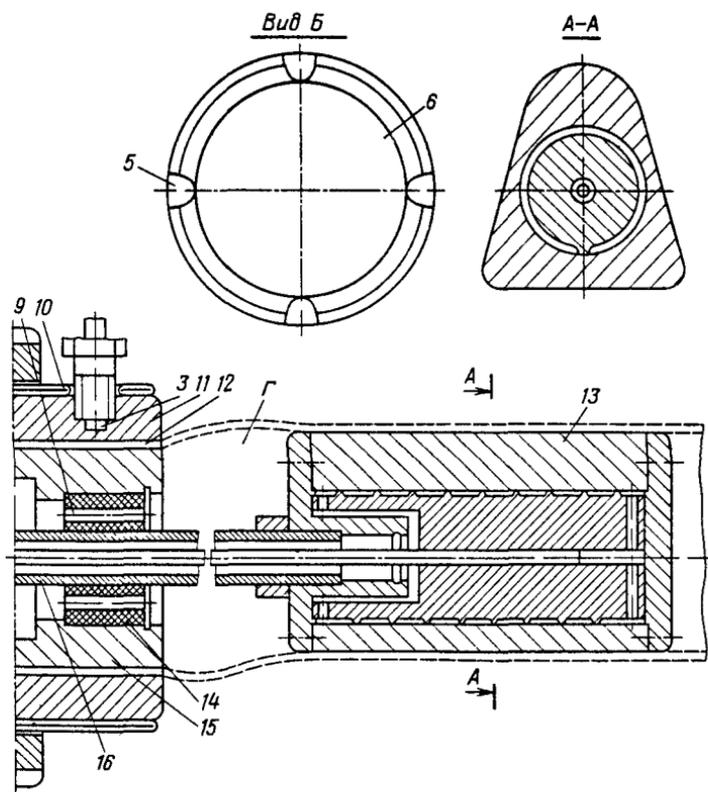
Рис. 4.1. Конструкция головки для изготовления полого профиля:

1 – центрирующий бурт фланца 23 головки; 2 – решетка; 3 – термомпарь; 4 – наружная кольцеобразная часть дорнодержателя; 5 – ребра дорнодержателя; 6 – центральная часть дорнодержателя; 7 – корпус головки; 8 – трубка отвода жидкости, охлаждающей калибрующее устройство; 9 – каналы, сообщающие полость Г с полостью Д и атмосферой; 10 – электронагреватели; 11 – мундштук; 12 – формирующий канал; 13 – калибрующее устройство; 14 – теплоизолирующие вставки и прокладки; 15 –



укрепленное на головке. Подводящая 20 и отводящая 8 воду трубки проходят через два диаметрально расположенных ребра дорнодержателя. Третье из четырех ребер используется для выполнения в нем отверстия (на рис. 4.1 не показано), сообщающего с атмосферой полость головки  $D$  и через систему каналов 9 полость  $\Gamma$  формируемой заготовки расплава (показана штриховыми линиями) на участке между головкой и калибрующим устройством. Сообщение с атмосферой предотвращает развитие в полости  $\Gamma$  разрежения или избыточного давления, приводящих к нежелательной деформации заготовки. Заполненные воздушным воздухом каналы 9 в совокупности с теплоизолирующими прокладками и вставками 14 существенно уменьшают нежелательный теплообмен между горячей головкой и деталями 8, 20, 17 и 16, осуществляющими подвод и отвод охлаждающей воды.

Головка, как правило, имеет обогрев (иногда охлаждение). Чаше



дори; 16 — штанга калибрующего устройства и отвода от него охлаждающей жидкости; 17 — основание штанги 16; 18, 22 — подводящий канал; 19 — болт для радиального смещения мундштука относительно дорна; 20 — трубка подвода жидкости, охлаждающей калибрующее устройство; 21 — радиальное отверстие в дорнодержателе; 23 — фланец головки; 24 — болты, крепящие головку к фланцу цилиндра экструдера

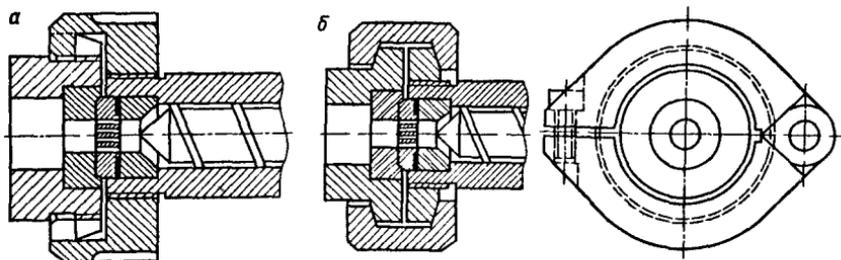


Рис. 4.2. Конструкции затворов, соединяющих головку с цилиндром:

*а* — затвор байонетного типа; *б* — затвор в виде полукольцевых стяжных элементов

всего это электрообогрев хомутовыми нагревателями сопротивления 10, надеваемыми на тело головки, однако для крупногабаритных головок с прямоугольной внешней конфигурацией (или близкой к ней) в последнее время стали использовать патронные цилиндрические электронагреватели (принципиально такие же, как и в прессовых формах), вставляемые в отверстия в теле головки, как это показано, например, на рис. 4.18, *а*. Теплопотери в окружающую среду в последнем случае значительно меньше (в 4 ÷ 5 раз); наружная поверхность головки в этом варианте имеет лишь теплоизоляцию.

Корпус головки (*а* иногда и мундштук, как на рис. 4.1) должен иметь отверстия для установки в них приборов теплового контроля (термометров сопротивления или термопар 3) в соответствии с числом независимо регулируемых зон обогрева (охлаждения). Иногда в канал головки в области входа в нее или у входа в формующий канал вводят датчики давления и температуры расплава. Способы крепления головок к цилиндрам экструдеров показаны на рис. 4.2.

Принцип действия калибрующих устройств заключается в том, что их рабочие поверхности контактируют с одной или несколькими поверхностями скользящего по ним изделия, придают ему окончательные конфигурацию и размеры. Рабочие органы устройств (т.е. те детали их, которые имеют поверхности контакта с изделием) могут быть выполнены в виде массивных металлических охлаждаемых водой блоков, как это показано на рис. 4.1, набора диафрагм или вращающихся профилирующих валков. Прижим их к изделию осуществляется за счет собственного веса или пружин, а также давлением сжатого воздуха. Например, на рис. 4.1 калибровка и охлаждение осуществляются при скольжении внутренней поверхности изделия (показано штриховой линией) по охлаждаемой наружной поверхности устройства 13.

#### 4.2. Классификация экструзионного инструмента

Головки отличаются большим разнообразием типов и конструкций, которые могут быть классифицированы следующим образом.

По направлению выхода изделия:

1) прямоточные головки (например, на рис. 4.1) с направлением выхода изделия вдоль оси червяка (головки для труб, шлангов, стержней);

2) угловые головки, осуществляющие поворот потока расплава и соответственно изменяющие направление выдачи изделия на определенный угол по отношению к оси червяка (головки для покрытия проводов, кабелей и каких-либо сердечников изоляцией или защитной оболочкой, головки для рукавной пленки, головки для экструзии с раздувом и др.).

Прямоточные головки просты по конструкции, условия течения расплава в их каналах, как это будет показано ниже, максимально благоприятны. В связи с этим при выборе конструкции им следует отдавать предпочтение, однако в приведенных в пункте 2 примерах их использование невозможно. Например, при наложении слоя полимера на сердечник из дерева направление ввода сердечника в головку должно совпадать с направлением выхода изделия из нее, так что ввод расплава в головку неизбежно должен быть осуществлен под некоторым углом к этому направлению. Трубчатая заготовка расплава для последующего ее формования в изделие методом раздува должна выдаваться из головки в вертикальном направлении вниз, чтобы сила собственного веса не приводила к существенному искажению конфигурации заготовки за время ее выдачи, вместе с тем направление оси пластикационного цилиндра экструдера (а следовательно, ввода расплава в головку), как правило, горизонтальное.

По конфигурации формующей щели:

1) плоскощелевые;

2) головки с кольцевым поперечным сечением канала (головки для цилиндрических стержней, трубные головки, головки для экструзии с раздувом, головки для получения рукавной пленки);

3) профильные головки, имеющие сложный контур поперечного сечения формующего канала и различающиеся по конфигурации поперечного сечения изделия (рис. 4.3) на головки для изделий открытого типа, закрытого типа, смешанного типа, специальные головки и головки для изделий из вспененных материалов.

Особенностью плоскощелевых головок является необходимость очень существенного преобразования конфигурации поперечного сечения потока расплава: круглое сечение канала головки на входе в нее преобразуется, например, в плоский щелевой канал с высотой 1 мм и шириной иногда более 1 м на выходе. При этом возникает проблема равномерного распределения потока повсей ширине щели, которая решается специфическими для этого типа головок приемами.

Для кольцевых головок, как и для головок, формующих изделия типа приведенных на рис. 4.3, б и в, обязательно наличие такой детали, как дорн, формующий одну или несколько полостей в изделии (см. рис. 4.1). Очевидно в данном случае, что дорн не должен касаться рабочих поверхностей переходного и формующего каналов, и в связи с этим возникает проблема его крепления в канале, конструктивное

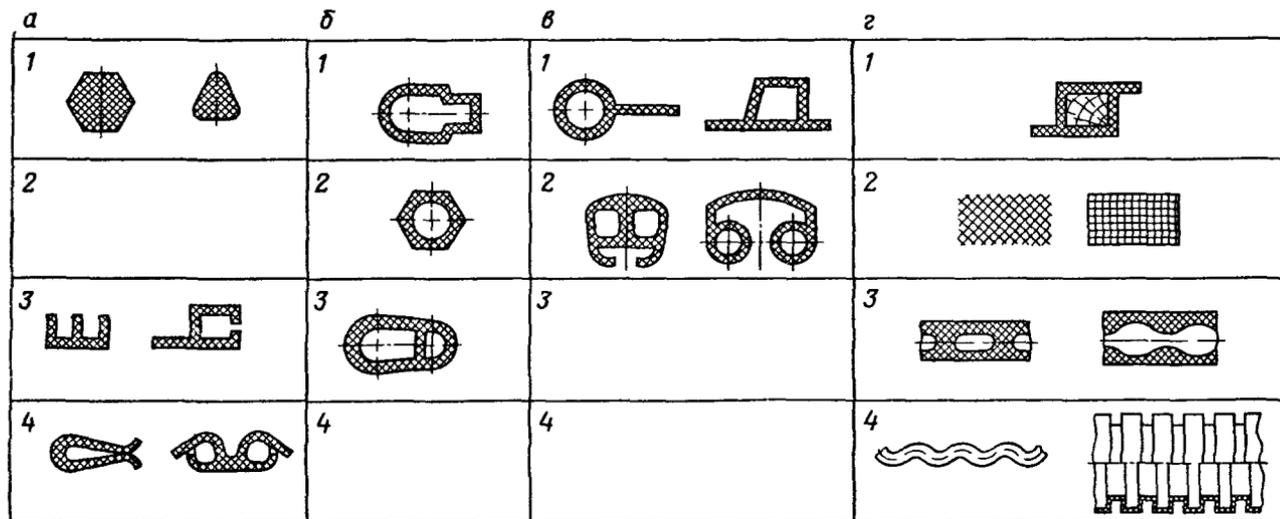


Рис. 4.3. Классификация профильных экструзионных изделий:

а — изделия открытого типа (1 — массивные профильные; 2 — сложной формы равноотличинные; 3 — сложной формы без поднутрений и с поднутрениями; 4 — с касанием образующих полость стенок); б — изделия закрытого типа (1 — равноотличинные с одной полостью; 2 — разноотличинные с одной полостью; 3 — с двумя и более полостями); в — изделия смешанного типа (1 — без поднутрений; 2 — с поднутрениями; 3 — с касанием стенок); г — специальные изделия (1 — образованные из двух и более материалов — профили из двух и более полимерных материалов, профили с сердечником из стеклопластика или дерева, профили с продольно или спирально заформованным армирующим прутком из полимера или металла и др.; 2 — сетеподобные с открытыми ячейками; 3 — с переменной толщиной стенок в продольном сечении; 4 — изогнутые в продольном направлении, т.е. в направлении экструзии, трубы, прутки и т.п.)

решение которой просто только на первый взгляд (например, ребра дорнодержателя в конструкции на рис. 4.1) и может быть неоднозначным в зависимости от типа полимера и формуемого изделия. Такой проблемы нет у головок для изделий открытого типа (см. рис. 4.3, а), так как элемент головки, формирующий у изделия незамкнутую полость, если он выполнен в виде самостоятельной детали, может и должен иметь контакт с рабочей поверхностью мундштука вплоть до выхода из него.

Общей особенностью головок третьего типа (по отношению к первым двум) в рамках данного классификационного признака является большая сложность конфигурации поперечного сечения формуемого изделия и, следовательно, геометрии рабочей поверхности переходного канала. Правильный выбор этой геометрии является наиболее ответственным этапом работы конструктора при проектировании головки и должен осуществляться не только с точки зрения обеспечения оптимальных условий течения расплава в переходном и формирующем каналах, но и с учетом конкретных возможностей изготовления подобных сложных поверхностей.

Представленная на рис. 4.3 классификация профильных изделий со сложной конфигурацией сечения выполнена таким образом, что каждой группе их (и в рамках группы – преимущественно каждой подгруппе) соответствует тип головки или калибрующего устройства, имеющий ту или иную конструктивную особенность. Особенности головок для изделий групп "а" и "б" уже рассмотрены выше. Головки для группы "в" сочетают в себе эти особенности.

Подгруппы изделий "а-1", "а-2" и "б-1" составляют исключение из общего правила, заключающееся в том, что могут быть сформованы с использованием головки, конфигурация сечения формирующего канала которой принципиально отлична от сечения изделия и, что важно, может быть гораздо более простой. Так, например, изделия группы "а-1", "б-1" и "а-2" могут быть сформованы на головках с сечением формирующего канала в виде круга, кольца и плоской щели (или также кольца) соответственно. Придание окончательной, требуемой конфигурации выходящей из головки заготовке расплава в этом случае осуществляется на калибрующем устройстве, конструкция которого должна обеспечивать выполнение этой операции. Пример рассматриваемого варианта приведен на рис. 4.1: выходящая из кольцевого формирующего канала заготовка "надевается" на калибрующее устройство, конфигурация которого показана в разрезе А – А.

Конструкция головок для изделий типа "а-4" ничем принципиально не отличается от головок для типа "а-3", однако смыкание элементов профиля и надежный их взаимный прижим в месте контакта, как показано на рис. 4.3, должны обеспечиваться специальной конструкцией калибрующего устройства.

Группа изделий "г" характеризуется тем, что в рамках каждой ее подгруппы соответствующий тип головки должен иметь как бы дополнительные, специальные конструктивные элементы. Так, для подгруп-

пы "2-1" головки должны иметь устройство для подачи (и протяжки через ее канал) сердечника или спиральной арматуры; то же относится и к группе "2-5". Изделия типа "2-2" и "2-3" формируются на головках, дорн и мундштук которых имеют вращательное или возвратно-поступательное движение друг относительно друга и, следовательно, соответствующий привод этих элементов.

Изделия типа "2-4" могут формироваться на головках для обычных прутков или труб, но калибрующие устройства должны иметь подвижные элементы с их приводом для формирования волн на прутке и гофров на трубе.

По типу термостатирования корпуса головки:

- 1) с рубашками для обогрева (или охлаждения) жидкостями;
- 2) с электрическим обогревом нагревателями омического сопротивления или индукционного типа.

Из экструдера в головку материал подается, как правило, при той температуре, при которой он должен выдавливаться из формирующего канала, так что сколько-нибудь значительного нагрева или охлаждения материала в головке происходить не должно. Общий тепловой баланс головки в этом случае определяется двумя составляющими: тепловыделениями в материале вследствие рассеивания работы его деформирования в каналах и теплоотдачей в окружающую среду. Если первая составляющая намного меньше второй (что, как правило, имеет место при экструзии термопластов, так как вязкость их расплавов относительно невелика, а температура головки должна быть намного больше температуры окружающей среды), то применяют второй тип термостатирования, более компактный и простой в обслуживании. Если же эти составляющие близки по значению или вторая превосходит первую (что характерно, например, для экструзии высоковязких резиновых смесей), то применяют первый тип термостатирования, который с равной эффективностью может осуществляться как подводом, так и отводом тепла от тела головки.

По общей конструкции корпуса головки:

- 1) литые;
- 2) сварно-литые;
- 3) разъемные, изготовленные механической обработкой из поковок и проката.

Тот или иной тип в данном случае выбирается преимущественно в зависимости от габаритов головки, а также с учетом программы производства (единичный экземпляр, несколько штук, мелкая серия) и конкретных технологических возможностей. В настоящее время применяется преимущественно третий тип корпусов.

По способу крепления к цилиндру экструдера:

- 1) с фланцевым соединением (головки съемные или откидные на петлях);
- 2) с байонетным соединением;
- 3) со стягиваемыми накладными полукольцами.

Выбор того или иного типа крепления, а также типа привода кре-

пежных устройств (механического или ручного) определяется, во-первых, габаритами головки, во-вторых, требуемой частотой съема головки.

По максимальному давлению в головке, обеспечивающему рабочую производительность:

1) головки низкого давления (до 6 МПа) для стержней диаметром более 5 мм, толстых труб и листов и других толстостенных профилей;

2) головки среднего давления (6–20 МПа) для стержней диаметром 3–5 мм или труб и профилей с толщиной стенки около 1 мм;

3) головки высокого давления (свыше 20 МПа) для производства пленок, вытяжки нитей и т.д.

#### 4.3. Факторы, определяющие конструктивное оформление головок

Конструкция и проходные сечения каналов головки и, следовательно, общее ее конструктивное оформление зависят от реологических свойств расплавов полимеров и определяемых этими свойствами специфических гидродинамических явлений, а также от характера взаимосвязи экструдера с головкой. Рассмотрим эти факторы более подробно.

**Характер взаимосвязи экструдера с головкой.** Фактическая производительность экструдера, снабженного конкретной головкой, определяется этим фактором.

**Рабочие характеристики экструдера и формирующего инструмента.** Эти характеристики представляют собой графики в координатах давление – производительность.

Уравнение рабочей характеристики дозирующей зоны червяка экструдера при допущении ньютоновского поведения расплава полимера имеет следующий вид:

$$Q = \alpha N - \beta p / \mu_{\text{эф}}, \quad (4.1)$$

где  $Q$  – производительность;  $\mu_{\text{эф}}$  – эффективная вязкость расплава в канале червяка;  $p$  – давление на выходе из канала червяка (т.е. на входе в головку);  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, значения которых зависят от геометрии канала конкретного типа червяка.

Таким образом, рабочая характеристика экструдера, в соответствии с уравнением (4.1), в координатах  $Q - p$  представляет собой прямую линию с отрицательным наклоном (рис. 4.4).

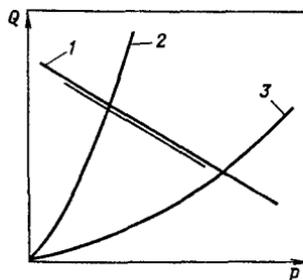


Рис. 4.4. Рабочие характеристики экструдера (1) и головок с относительно малым (2) и большим (3) гидравлическим сопротивлением. Удовлетворительная область рабочей характеристики экструдера показана сдвоенной линией

Естественно, не все режимы работы экструдера, соответствующие его рабочей характеристике, являются удовлетворительными. Область малых давлений соответствует неудовлетворительной температурной однородности расплава и возможному появлению воздушных включений в нем из-за неудовлетворительного уплотнения плавящегося в канале червяка гранулята полимера, зона повышенных давлений – неконтролируемому перегреву расплава и возможным пульсациям производительности. Как правило, максимальные давления, соответствующие нижней точке удовлетворительной области рабочей характеристики, не превышают 30 МПа.

Уравнение, определяющее рабочую характеристику головки, также в ньютоновском приближении имеет вид

$$Q = k_n D / \mu_{эф}, \quad (4.2)$$

где  $k_n$  – коэффициент, зависящий от геометрической формы каналов головки (константа головки).

Величина  $\mu_{эф}$ , как известно, для расплавов полимеров является убывающей функцией скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , которая, в свою очередь, прямо пропорциональна величине  $Q$ . Таким образом, в соответствии с уравнением (4.2), рабочая характеристика головки представляется кривой, исходящей из начала координат (см. рис. 4.4). Решение уравнений (4.1) и (4.2), графически представляемое точкой пересечения рабочих характеристик (рабочей точкой), дает значение производительности и развиваемого при этом давления на входе в головку для конкретного сочетания экструдера и головки.

При проектировании головки конструктор должен знать:

- 1) будет ли рабочая точка соответствовать предполагаемой производительности;
- 2) будет ли рабочая точка лежать в пределах удовлетворительной области рабочей характеристики конкретного экструдера, для которого проектируется головка (например, рабочая точка для головки 3 на рис. 4.4 лежит вне этой области, так что в данном случае следует ожидать при производстве изделия пульсаций производительности экструдера и как следствие – продольной разнотолщинности изделия);
- 3) величину давления, развивающегося в элементах головки, для определения прочности этих элементов.

Первая и третья задачи могут решаться, например, в допущении ньютоновского поведения расплава полимера при рассчитанной константе головки  $K_n$  совместным решением уравнений (4.1) и (4.2). Следует, однако, иметь в виду, что уравнение (4.1) описывает рабочую характеристику только зоны дозирования, а не всего канала червяка, содержащего несколько функциональных зон, принципиально отличных друг от друга по состоянию материала в них. Получено оно к тому же при существенных допущениях, снижающих его точность (например, допущения об изотермичности течения в канале червяка). По этой причине использовать его для определения производительности и

давления, соответствующих рабочей точке, можно лишь при грубых, прикидочных оценках. В этом случае предпочтительно использование конкретной, определенной экспериментально на данном полимере, удовлетворительной области рабочей характеристики экструдера.

Найденное таким образом положение рабочей точки на характеристике шнека дает ответ одновременно и на второй вопрос. В случае несоответствия положения рабочей точки удовлетворительной области рабочей характеристики экструдера должна быть изменена конфигурация каналов проектируемой головки с целью изменения ее константы. Определение константы головки или создаваемого ею перепада давления входит в задачи гидравлического расчета, который будет рассмотрен далее.

**Условие равенства скоростей расплава во всех точках выходного поперечного сечения формующего канала.** Это одно из важных условий (а в некоторых случаях главное), определяющих размерное соответствие и качество получаемого изделия. Действительно, если в рассмотренной (рис. 4.1) конструкции головки по каким-либо причинам скорость выхода расплава в верхней части формующего канала больше, чем в нижней, то за данный отрезок времени в верхней части будет экструдирован участок профиля большей длины, чем в нижней части. Это приведет, во-первых, к утолщению верхней части профиля, во-вторых, к образованию в этом месте гофров и складок. Второй недостаток может быть исправлен принудительным отбором экструдированного профиля со скоростью, равной скорости выхода расплава в верхней части канала; неизбежная при этом вытяжка и утонение нижней части профиля приводят к дефекту поперечной разнотолщинности его, который может быть устранен только увеличением высоты формующего канала в этом месте (например, соответствующей дополнительной обработкой рабочей поверхности мундштука или, как видно из рис. 4.1, смещением мундштука 11 относительно дорна 15 вниз посредством болтов 19). Методы и приемы выравнивания потока основываются на результатах гидродинамического анализа течения расплава в каналах головок, являются одной из задач гидравлического расчета и будут рассмотрены ниже.

При экструзии разнотолщинных и сложных профилей практически никогда не удастся обеспечить полностью выравненного расхода по всему формующему сечению, и такие изделия всегда изготавливают при скорости принудительного отвода экструдата  $V_{пр}$ , несколько превышающей скорость выхода профиля из головки  $V_3$ . Отношение этих скоростей  $k_v$  называется коэффициентом вытяжки, поскольку вследствие указанной разности скоростей происходит вытяжка профиля с утонением его стенок и уменьшением линейных размеров поперечного сечения примерно в  $\sqrt{k_v}$  раз.

Чем больше предполагаемая конструктором головки неоднородность скоростей выхода расплава из формующего канала (неоднородность экструзии), которую он уже не может устранить каким-либо приемом при проектировании головки, тем большую степень вытяжки экструзи-

дата он должен планировать и учитывать ее при определении размеров формующего канала. Однако необходимо иметь в виду, что существуют максимально достижимые значения  $k_v$ , определяющиеся следующими факторами. Во-первых, развивающиеся в экструдате на участке вытяжки (на участке между головкой и калибрующим устройством) нормальные напряжения растяжения не должны превышать предела прочности расплава. Во-вторых, развивающиеся в экструдате при вытяжке высокоэластические (обратимые) деформации фиксируются в формуемом профиле при быстром охлаждении его на калибрующем устройстве и далее в охлаждающей ванне. Эти деформации при последующей эксплуатации профиля, особенно при повышенных температурах, могут частично реализоваться, что приведет к существенному уменьшению продольного размера профиля (а если вытяжка была существенно неодинакова в различных местах сечения, то и к искривлению профиля). Наконец, в-третьих, при больших значениях  $k_v$  существенно искажается конфигурация мелких элементов сечения профиля (канавки, перемычки, ребра и др.).

Исходя из первого и третьего факторов, как правило, недопустимы значения  $k_v > 2$ . Исходя из второго фактора, практикой для отдельных материалов рекомендуются следующие коэффициенты вытяжки (в%), гарантирующие удовлетворительность качества изделия при условии применения упомянутых конструктивных методов выравнивания потока:

|                              |    |                                      |    |
|------------------------------|----|--------------------------------------|----|
| Полиэтилен низкой плотности  | 15 | Ацетобутират целлюлозы               | 10 |
| Полиэтилен высокой плотности | 20 | Поливинилхлорид непластифицированный | 10 |
| Полистирол и его сополимеры  | 10 | Поливинилхлорид пластифицированный   | 15 |
| Полиамид                     | 20 |                                      |    |

Соответствующие размеры поперечного сечения формующего канала при его конструировании должны приниматься больше таковых у изделия в  $\sqrt{k_v}$  раз. Однако в процессе вытяжки сечение экструдата уменьшается в разных направлениях неодинаково, причем точно предусмотреть характер этой неоднородности невозможно. Можно только отметить, что толщина стенок тонкостенных профилей имеет преимущественное уменьшение по сравнению с линейными размерами, поэтому в первом приближении можно считать, что у тонкостенных профилей изменяется только толщина в  $k_v$  раз, а у толстостенных или монолитных – как толщина, так и линейные размеры в  $\sqrt{k_v}$  раз.

**Свариваемость потоков.** Свариваемость отдельных потоков расплава, на которые разбивается общий поток перемычками решетки, ребрами дорнодержателя и другими преградами, – также одно из необходимых условий получения доброкачественного изделия. Для сваривания необходимо достаточное давление в расплаве и эффективная деформация поверхностей контакта сливающихся потоков. Гидравлическое сопротивление формующего канала, как правило, оказывается достаточным для обеспечения необходимого давления, а требу-

емая деформация поверхностей контакта обеспечивается монотонным уменьшением площади поперечного сечения подводящего канала в три – пять раз. В ряде случаев для усиления эффекта деформирования перед переходным каналом  $l_8$  (см. рис. 4.1) или непосредственно в нем предусматривают местные сужения или какие-либо другие конструктивные элементы.

**Огрубление поверхности.** Огрубление поверхности экструдированного изделия – одно из специфических нежелательных явлений, присущих расплавам полимеров. Учет этого явления совершенно необходим при конструировании головок, особенно в высокоскоростных процессах наложения кабельной изоляции и производства пленок. Явление выражается в том, что по достижении некоторой скорости выдавливания поверхность выходящего из головки изделия, будучи до этого совершенно гладкой, становится шероховатой, а при дальнейшем повышении скорости возникают и прогрессируют нерегулярности самой формы экструдата, имеющие определенную периодичность: чаще всего (например, на прутке) – периодические кольцевые утолщения. Иногда эти утолщения имеют винтовую конфигурацию; при этом поверхность утолщений может быть шероховатой, "рваной" или, наоборот, глянцевой с плавными контурами.

Возникновение этого явления обусловлено следующими тремя факторами: проявление расплавом свойства упругости; наличие у расплава вполне определенной величины прочности при сдвиге; наличие адгезионной прочности, т.е. прочности связи расплава, текущего в канале, с его стенками.

Прочность при сдвиге или адгезионная прочность могут быть оценены значениями предельных напряжений сдвига  $\tau_c$  или  $\tau_a$  соответственно. При течении расплава в его объеме возникает некоторое распределение напряжений сдвига. В этом объеме можно выделить поверхности, характеризующиеся одинаковыми значениями напряжений сдвига. При этом существует поверхность, на которой напряжения сдвига максимальны; при течи в каналах это, как правило, поверхность контакта расплава со стенкой канала.

По мере роста расхода в канале напряжения сдвига в расплаве возрастают, и если максимальные напряжения  $\tau_{max}$  при этом превышают значение  $\tau_c$ , то возникает разобшение объемов потока по поверхности действия  $\tau_{max}$ . Если же напряжения в расплаве непосредственно у стенки канала превышают значение  $\tau_a$ , то возникает разобшение потока со стенкой канала: прилипание расплава к стенке сменяется скольжением по ней.

При учете отмеченного выше механизма процесса, приводящего к периодическим нерегулярностям конфигурации экструдированного изделия, можно представить приближенно следующим образом. С ростом расхода в расплаве растут напряжения и вызванные ими упругие, обратимые деформации. При некотором расходе значение  $\tau_{max}$  превышает, например,  $\tau_a$ , связь потока со стенкой нарушается и накопленные в расплаве упругие деформации резко уменьшаются

(практически исчезают полностью), что приводит к проскальзыванию потока по стенке в направлении к выходу канала, приводящему к практически мгновенному увеличению расхода. Этому соответствует возникновение утолщения на выдавливаемой из канала струе расплава. Исчезновению упругих деформаций соответствует уменьшение напряжений в потоке, в том числе и  $\tau_{\max}$ , которые становятся меньше  $\tau_a$ . Прилипание расплава к стенке восстанавливается, после чего вследствие продолжающегося течения в расплаве вновь начинается развитие упругих деформаций и рост  $\tau_{\max}$ , причем продолжается это до момента достижения  $\tau_{\max} > \tau_a$  и, следовательно, до повторного акта проскальзывания. Этот автоколебательный процесс периодического проскальзывания, сменяющегося прилипанием, и есть причина периодических утолщений и утонений экструдированной трубы, причем образование утолщений происходит в момент проскальзывания.

Если условие  $\tau_{\max} > \tau_a$  возникает на стенке формирующего канала вплоть до выходного сечения его, то и проскальзывание простирается вплоть до выходного сечения, и поверхность экструдата в местах утолщения получается шероховатой. Однако это условие может возникать не на всей длине формирующего канала, а только на входе в него, или, чаще всего, в предшествующем ему переходном канале, так как общий уровень напряженного состояния расплава в этих местах более высокий. В этом случае и область проскальзывания не распространяется до выхода из головки, однако наличие этого проскальзывания также приводит к пульсациям расхода и, следовательно, площади поперечного сечения струи, поверхность которой в этом случае получается гладкой.

Если же адгезия расплава к стенке канала достаточно велика, то чаще всего возникает не условие  $\tau_{\max} > \tau_a$ , а условие  $\tau_{\max} > \tau_c$ . Сопровождающее его явление во всем подобно описанному с той разницей, что разобшение (проскальзывание) происходит не непосредственно на стенке канала, а по некоторой поверхности в объеме расплава, лежащей вблизи стенки. Экструдат, очевидно, и в этом случае имеет периодические утолщения, однако поверхность его гладкая.

Какого-либо строгого теоретического количественного описания этого явления, позволяющего прогнозировать условия его возникновения, сейчас нет. Такой приблизительный прогноз возможен на основе изложенных ниже сведений, полученных экспериментальным путем. При обработке экспериментальных данных исходили из предположения о том, что поскольку развивающиеся в расплаве напряжения сдвига  $\tau$  однозначно связаны реологическим уравнением со скоростями сдвигового деформирования его  $\dot{\gamma}$ , то значениям  $\tau_a$  или  $\tau_c$  можно однозначно поставить в соответствие значения  $\dot{\gamma}_a$  или  $\dot{\gamma}_c$ , т.е. такие скорости сдвига у стенки канала, при которых начинает развиваться явление огрубления поверхности. Независимо от первопричины огрубления это значение скорости сдвига было названо критической скоростью сдвига  $\dot{\gamma}_K$ .

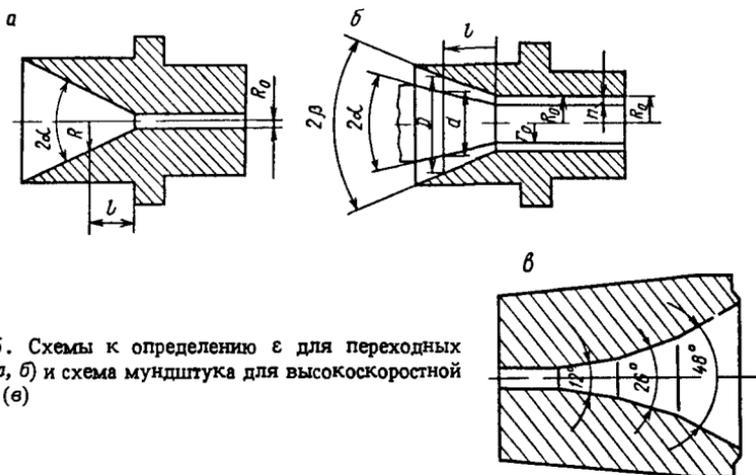


Рис. 4.5. Схемы к определению  $\varepsilon$  для переходных каналов (а, б) и схема мундштука для высокоскоростной экструзии (в)

Экспериментами установлено, что критическая скорость сдвига практически не зависит от длины формирующего канала при отношениях длины к максимальной высоте его, больших пяти-восьми, т.е. таких, которые имеют место в экструзионной практике. Однако она оказывается сильно зависимой от интенсивности уменьшения площади поперечного сечения переходного канала. Была установлена зависимость

$$\dot{\gamma}_k = f(\varepsilon, T), \quad (4.3)$$

где  $\varepsilon = dr_r/dl$  — интенсивность уменьшения гидравлического радиуса  $r_r$  поперечного сечения входной зоны по длине ее  $l$ ;  $T$  — температура расплава;  $r_r = F/\Pi$ ;  $F$  — площадь поперечного сечения;  $\Pi$  — его периметр.

Эта зависимость для переходных каналов без дорна имеет вид

$$\dot{\gamma}_k = M(T)(2\varepsilon)^{-u(T)}, \quad (4.4)$$

где  $M(T)$  и  $u(T)$  — константы, присущие конкретному материалу и зависящие от температуры.

В этих каналах величина  $\varepsilon$  однозначно определяется только одним геометрическим параметром: углом конической поверхности мундштука, образующей переходный канал. В каналах с дорном (рис. 4.5) величина  $\varepsilon$  определяется двумя параметрами — углами конических поверхностей мундштука и дорна, поэтому в формулу (4.4) для таких каналов введен дополнительный член, учитывающий характер уменьшения  $r_r$ :

$$\dot{\gamma}_k = M[2\varepsilon + N(\operatorname{tg}\theta)^\nu]^{-u}, \quad (4.5)$$

где  $\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg}[(\alpha + \beta)/2]$  — тангенс угла наклона средней линии щели к оси головки (см. рис. 4.5);  $N, \nu$  — константы материала, зависящие от температуры (примеры значений их для двух материалов приведены в табл. 4.1).

Величину  $\varepsilon$  для конических переходных каналов можно найти из следующих соотношений:

без дорна (рис. 4.5, а)

$$R = R_0 + l \operatorname{tg} \alpha; r_r = \pi R^2 / (2 \pi R) = R/2 = (R_0 + l \operatorname{tg} \alpha) / 2; \quad (4.6)$$

$$\varepsilon = dr_r / dl = 0,5 d(R_0 + l \operatorname{tg} \alpha) / dl = 0,5 \operatorname{tg} \alpha;$$

с дорном (рис. 4.5, б)

$$r_r = \pi (D^2 - d^2) / [4 \pi (D + d)] = (D - d) / 4 = [R_0 - r_0 + l (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)] / 2; \quad (4.7)$$

$$\varepsilon = dr_r / dl = (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha) / 2.$$

Для поперечных сечений переходных и формующих каналов более сложного профиля значения  $\varepsilon$  на всей длине  $l$  формующего канала могут быть определены построением графика  $r_r(l)$  с последующим графическим дифференцированием его.

Таким образом, формулы (4.4), (4.5) накладывают ограничения на углы переходной зоны. Необходимо отметить, что диапазон допустимых значений этих углов очень широк: от значений  $45 \div 60^\circ$ , определяющихся явлением, описанным в следующем разделе, до минимальных значений, составляющих  $8 - 10^\circ$ . Конкретное значение углов в пределах этого диапазона зависит, очевидно, преимущественно от скорости экструзии расплава из данной головки  $v_3$  (или расхода через нее  $Q$ , что по существу одно и то же). Действительно, условие качества поверхности экструдата с точки зрения рассматриваемого явления таково:

$$\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_k, \quad (4.8)$$

где  $\dot{\gamma}$  — фактическая скорость сдвига в данном канале;  $\dot{\gamma}_k$  — критическая скорость сдвига для этого же канала, определяемая, например, по формулам (4.4) — (4.7).

Величина  $\dot{\gamma}$ , как известно, прямо пропорциональна расходу в этом канале [см., например, формулу (4.14) и сопутствующий текст], т.е., как правило, расходу  $Q$  через головку в целом. С точки зрения максимальной производительности процесса целесообразно принимать по возможности максимально возможное значение  $Q_{\max}$ , которое имеет

Таблица 4.1. Значения констант  $M$ ,  $\mu$ ,  $N$ ,  $\nu$

| Материал                             | $T, K$ | $M, c^{-1}$ | $\mu$ | $N$   | $\nu$ |
|--------------------------------------|--------|-------------|-------|-------|-------|
| Полиэтилен высокого давления         | 393    | 318         | 0,786 | 1,25  | 0,328 |
|                                      | 413    | 300         | 0,749 | 0,695 | 0,682 |
|                                      | 433    | 182         | 0,722 | 0,55  | 0,853 |
| Поливинилхлорид непластифицированный | 448    | 380         | 0,272 | 5,0   | 1,98  |

три основных ограничения, перечисленных ниже. Таким образом, определение максимально допустимых значений углов переходного канала сводится к следующей процедуре:

- 1) определение значения  $Q_{\max}$  с учетом всех ограничений на него;
- 2) расчет по формулам типа (4.14) величины  $\dot{\gamma}$ , соответствующей этому  $Q_{\max}$ ;
- 3) вычисление  $\dot{\gamma}_k$  по условию (4.8), преобразованному, например, таким образом:

$$\dot{\gamma}_k = k \dot{\gamma}, \quad (4.9)$$

где  $k$  — некоторый коэффициент запаса ( $k > 1$ ; реально  $k = 1,15 + 1,3$ ), гарантирующий соблюдение условия (4.8) с учетом реальной точности формул (4.14) и (4.4) — (4.7);

- 4) вычисление по формулам (4.4) — (4.7) максимально допустимых значений углов  $\alpha$  и  $\beta$ , соответствующих найденной  $\dot{\gamma}_k$ .

Вычисление угла мундштука  $\alpha$  для головок без дорна по уравнению (4.4) не представляет проблемы, так как оно разрешимо относительно  $\alpha$  в явной форме. Для головок с дорном [уравнение (4.5)] два осложнения: во-первых, два неизвестных  $\alpha$  и  $\beta$ , во-вторых, уравнение (4.5) неразрешимо относительно  $\alpha$  или  $\beta$ ; необходимо задаваться соотношением между  $\beta$  и  $\alpha$  (например,  $\alpha = k\beta$ ;  $k = 0,9 \div 0,8$ ) и выполнять итеративную процедуру поиска  $\beta$  по (4.5) на ЭВМ, сканируя  $\beta$  в сторону уменьшения его от  $90^\circ$ .

Сущность отмеченных ограничений на  $Q_{\max}$  такова. Во-первых, это имеющийся в наличии тип экструдера, имеющий в соответствии с рабочей точкой на своей характеристике (см. рис. 4.4) при максимальной частоте вращения червяка определенную величину  $Q_{\max 1}$ .

Во-вторых, максимально допустимая скорость отвода экструдата  $v_{\text{пр}}^{\max 1}$  по условиям охлаждения его в калибрующем устройстве, определяющая величину  $Q_{\max 2}$  следующим образом:

$$Q_{\max 2} = v_{\text{пр}}^{\max 1} S, \quad (4.10)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения экструдруемого изделия.

Более детально сущность этого ограничения состоит в следующем. При протяжке профиля через калибрующее устройство возникает сила трения и тянущее усилие равно ей. Для обеспечения требуемой степени предварительного охлаждения профиля в калибре длина его, определяющая время контакта профиля с ним, должна возрасти с ростом  $v_{\text{пр}}$ ; при этом неизбежно возрастают сила трения и, следовательно, тянущее усилие, которое не должно превышать некоторого значения по условию прочности профиля. Этому значению усилия и соответствует величина  $v_{\text{пр}}^{\max}$ .

Существует еще одно значение  $v_{\text{пр}}^{\max}$  (уже по условию окончательного охлаждения профиля в расположенной за калибрующим устройством охлаждающей ванне), определяющее третье ограничение на расход  $Q_{\max 3}$ : время пребывания профиля в ванне  $t_{\text{охл}}$  должно быть достаточным для достижения требуемой степени охлаждения, следовательно, при имеющейся в наличии охлаждающей ванне длиной  $L$  скорость профиля не должна превышать

$$v_{\text{пр}}^{\max} = L/t_{\text{охл}}. \quad (4.11)$$

Величина  $Q_{\max 3}$  в отличие от предшествующих двух ограничений оказывается существенно зависимой от геометрии изделия, точнее – от толщины его, так как время  $t_{\text{охл}}$  интенсивно возрастает с ростом этой толщины.

Подход конструктора к учету этих ограничений при выборе  $Q_{\max}$  различен в зависимости от того, в решении какой из двух наиболее распространенных производственных задач он принимает участие.

Первая задача: освоить производство профиля на имеющемся в наличии экструзионном агрегате, т.е. при конкретных типе экструдера и конструкции охлаждающей ванны. В этом случае все три ограничения действительны, каждое из соответствующих значений  $Q_{\max i}$  должно быть спрогнозировано конструктором с той или иной степенью точности уже на первой стадии проектирования головки, и величина  $Q_{\max}$  должна быть выбрана равной минимальному значению из этих  $Q_{\max i}$ .

Вторая задача: спроектировать специализированный агрегат для изделия данного типа. В этом случае действительно только ограничение  $Q_{\max 2}$  (при выбранном типе калибрующего устройства), так как тип экструдера и длина ванны могут быть подобраны такими, чтобы  $Q_{\max}$  и  $Q_{\max 3}$  превышали значение  $Q_{\max 2}$ . Вместе с тем именно прогноз  $Q_{\max 2}$  в настоящее время наиболее сложен и в значительной степени основывается на опыте конструктора, так как обеспечивающие приемлемую точность теоретические методы расчета теплового и силового взаимодействия профиля с калибрующим устройством с учетом прочности профиля пока отсутствуют.

В заключение необходимо выделить категорию профильных изделий, для которых второе ограничение отсутствует. Это профили, представляющие собой более или менее прочный сердечник (или продольную арматуру), на который при пропускании его через головку накладывается слой полимера: изделия "з-1" на рис. 4.3, продольно армированные шланги, изолируемые кабели и провода и др. У этих изделий тянущее усилие практически целиком воспринимается сердечником и проблема прочности отвердевшего в калибрующем устройстве слоя полимера оказывается не существенной. Максимальная скорость экструзии здесь лимитируется уже возможностями устройств для протяжки сердечника (провода, кабеля), системой управления процессом в целом и реально исполнимой длиной ванны, которая может достигать 30 м и более. Эта скорость может быть очень большой, достигаая, например, при изоляции тонких проводов 70–90 км/ч. Углы переходных каналов в этом случае имеют минимальные значения, вследствие чего возрастают их длина и, следовательно, габариты головки и ее гидравлическое сопротивление, что часто крайне нежелательно. В данной ситуации проектируют переходные каналы со ступенчато или монотонно уменьшающимся углом по мере приближения к выходу из канала (см., например, рис. 4.5, е), руководствуясь следующими соображениями.

Вследствие интенсивного уменьшения площади поперечного сече-

ния переходного канала в направлении к выходу из него скорость сдвига  $\dot{\gamma}$  так же интенсивно возрастает в этом направлении, и, проектируя канал с постоянным углом, необходимо вычислять его с учетом условия (4.9) по максимальному значению  $\dot{\gamma}$  на выходе из канала. При этом на всех предшествующих участках меньшие действующие значения  $\dot{\gamma}$  оказываются намного меньше величины  $\dot{\gamma}_k$ , определенной по условиям на выходе (эта разница между  $\dot{\gamma}$  и  $\dot{\gamma}_k$  тем больше, чем ближе участок канала ко входу в него), что и позволяет монотонно или ступенчато увеличивать угол в направлении ко входу в канал, определяя его на каждом участке по условию (4.9) и формулам (4.4) – (4.7). Такой прием позволяет существенно уменьшить длину канала.

**Отсутствие зон застоя ("мертвых зон").** В соответствии с формулами (4.4) и (4.5) при плоскорезанной входной зоне ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\varepsilon = \infty$ ) критическая скорость должна понизиться до нуля. Практически этого не происходит, и с ростом угла  $\alpha$  до определенного  $\alpha_k$  критическая скорость сдвига, уменьшаясь, стремится к определенному пределу. Это объясняется тем, что во входном конусе с углом  $\alpha_0$  образуется зона нетекучего полимера (зона застоя), ограниченная областью  $\alpha_k < \alpha < \alpha_0$ , которая автоматически поддерживает угол входа для текущей части полимера, равный  $\alpha_k$ . Застаивающийся в подобных зонах расплав вследствие длительного температурно-временного воздействия подвергается термодеструкции и, частично захватываясь текущим расплавом, приводит к порче изделия, поэтому углы наклона поверхностей каналов по отношению к основному направлению течения расплава как в зонах сужения, так и в зонах расширения не должны превышать значения  $\alpha_k$ . Совершенно аналогично зоны застоя могут иметь место при набегании расплава на препятствия, например в виде раскатателя дорнодержателя и его ребер (см. рис. 4.1). Следовательно, как передние (рассекающие поток), так и задние (с которых поток сходит) углы поверхностей этих деталей по отношению к направлению потока не должны превышать  $\alpha_k$ , значение которого для большинства материалов установлено практикой в диапазоне  $45 - 60^\circ$ .

В ряде конструкций головок конфигурация каналов столь сложна (например, кольцевые головки для экструзии многослойных рукавных пленок, угловые многоручьевые головки для формования изделий методом экструзии с раздувом), что на стадии их проектирования бывает сложно сделать однозначное заключение о возможном наличии или отсутствии зон застоя в тех или иных местах канала, даже несмотря на, казалось бы, гарантированное соблюдение указанного здесь ограничения на заходные и задние углы. В этом случае такое заключение должно быть сделано на стадии промежуточных испытаний выполненной в металле головки, и если зоны застоя будут обнаружены, то выполняется механическая доработка поверхности канала с целью их устранения. Конструктор же головки должен предвидеть на стадии ее проектирования возможность возникновения этих опасных мест в канале и принимать такие конструктивные решения, которые позволили бы выполнять последующую доработку.

Сейчас используется лишь один экспериментальный метод выявления зон застоя при испытаниях головки: если цвет экструдата на поверхности или в срезе неоднороден (имеются полосы более темного тона вследствие деструкции полимера или менее интенсивного и измененного цвета вследствие деструкции красителя), то зоны застоя есть. Однако таким изменениям цвета и тона экструдата соответствует значительная степень термодеструкции, часто намного превышающая допустимую. В этих случаях отсутствие таких изменений в экструдате не является гарантией отсутствия недопустимой степени термодеструкции и приходится использовать модификацию этого метода.

Существо ее в том, что к грануляту подаваемого в экструдер полимера добавляют специальные термочувствительные красители. Каждый из этих красителей имеет свой запас термостабильности: при определенном температурно-временном воздействии на него изменяет свой цвет. Подбирают такой краситель, запас термостабильности которого близок к таковому у полимера. Наличие в экструдате следов красителя с измененным цветом свидетельствует о том, что в какой-то из областей канала расплав пребывает недопустимо долго. Разработка головки и анализ цвета полимера, оставшегося в ее каналах, позволяет выявить эти области.

Как видно, изложенная здесь процедура доводки каналов головки чрезвычайно трудоемка. Разработанные в последнее время методы вычислительной математики, в частности, метод конечных элементов, позволили решать задачу о выявлении возможных зон застоя еще на стадии проектирования каналов головки. Так, при достаточном развитии метода конечных элементов появилась возможность проводить при выполнении гидравлического расчета определение поля скоростей расплава в каналах сколь угодно сложной геометрии. Вычисление как модуля, так и направления вектора скорости расплава в любой точке канала позволяет выявить места его с практически нулевым значением модуля скорости или места с замкнутым циркуляционным потоком (именно они являются зонами застоя). Изменяя конфигурацию канала и рассчитывая каждый раз на ЭВМ поле скоростей, добиваются исчезновения этих областей. Однако и здесь следует иметь в виду, что выполнение этой процедуры также очень трудоемко и требует очень высокой квалификации инженеров-математиков и программистов. Не случайно поэтому в настоящее время известны лишь отдельные случаи реализации этого подхода.

**Разбухание экструдата.** Увеличение (разбухание) толщины стенок и размеров поперечного сечения выходящего из головки изделия — также одно из важных в экструзионной технике явлений, во многом определяющееся вязкоупругой природой расплавов полимеров. Обусловлено оно реализацией на выходе из головки имеющейся в расплаве упругой деформации.

В зоне переходного канала с интенсивно изменяющимся поперечным сечением в связи с непрерывной перестройкой скоростного профиля потока в нем развиваются значительные сдвиговые напряже-

ния, приводящие к соответствующей запасенной расплавом упругой деформации. В зоне формирующего канала с постоянным поперечным сечением скоростной профиль стабилизируется, и доля запасенной упругой деформации, инициированная входным эффектом, постепенно реализуется, так что полная упругая деформация стремится к значению, соответствующему напряжению в стационарном потоке (последнее зависит только от скорости экструзии).

Степень реализации этой доли деформации к моменту выхода расплава из головки определяется соотношением характерного времени релаксации и времени пребывания полимера в канале постоянного сечения (время пребывания уменьшается с ростом скорости и уменьшением длины формирующего канала). Как показывает практика, при соотношениях длины формирующего зазора  $L$  к его высоте  $H$ , больших 15–20, и практически при любых скоростях экструзии имеет место почти полная реализация этой доли деформации. Сохранившаяся в расплаве упругая деформация реализуется на выходе из формирующего канала и приводит к увеличению сечения экструдата, определяя величину коэффициента разбухания  $\beta$  (отношения какого-либо размера поперечного сечения экструдата к соответствующему размеру сечения канала).

Из рассмотренного очевидно, что при увеличении длины формирующего канала до указанных соотношений коэффициент разбухания уменьшается до некоего минимального значения  $\beta_m$ . Последнее зависит только от величины напряжений в стационарном потоке (и, следовательно, от скорости сдвига и температуры расплава). Экспериментально установлено, что с ростом скорости сдвига интенсивность увеличения  $\beta_m$  падает, и последний становится максимальным и практически не зависящим от скорости сдвига при ее значениях, больших 20–15  $s^{-1}$ . Таким образом, в указанном диапазоне скоростей сдвига, который чаще всего (за исключением экструзии весьма толстостенных изделий) имеет место на практике, и с учетом того, что диапазон оптимальных температур экструзии обычно невелик,  $\beta_m$  можно считать с достаточной для инженерной практики точностью постоянным и зависящим только от материала.

В большинстве экструзионных процессов явление разбухания компенсируется соответствующей вытяжкой и нивелируется калибровкой. Однако в таких процессах, как, например, экструзия трубчатых заготовок для производства полых раздувных изделий, заготовка не подвергается калибровке и принудительной вытяжке. Между тем размеры заготовки должны быть строго согласованы с соответствующими размерами раздувной формы. Отсюда очевидна необходимость учета коэффициента разбухания при назначении диаметров дорна и мундштука раздувной головки, и поэтому на разбухании трубчатых экструдатов следует остановиться подробнее.

Опытным путем установлено, что коэффициенты разбухания наружного  $D_n$  и внутреннего  $D_v$  диаметров трубы при  $\kappa = D_v/D_n > 1/3$  можно считать с достаточной степенью точности равными. Далее, с уменьше-

нием этого отношения до нуля (пруток без отверстия)  $\beta$  достигает максимального значения  $\beta_{\text{пр}}$ , а при отношении  $\kappa$ , стремящемся к единице (толщина стенки трубы равна нулю), он стремится к минимальному значению, что и описывается следующей экспериментально полученной формулой:

$$\beta = (\beta_{\text{пр}}^2 - \beta_{\text{пр}} \kappa^2 - 0,1 \beta_{\text{пр}} \kappa)^{1/2}, \quad (4.12)$$

где  $\beta_{\text{пр}}$  — коэффициент разбухания прутка. Значения этого коэффициента для некоторых материалов при температурах переработки их экструзией с раздувом при  $\dot{\gamma} > 25 \text{ с}^{-1}$  и  $L/H > 20 \div 25$  таковы:

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| Полиэтилен низкой плотности          | 1,9       |
| Полиэтилен высокой плотности         | 1,8       |
| Полипропилен                         | 1,7       |
| Поливинилхлорид непластифицированный | 1,04–1,07 |
| Поливинилхлорид пластифицированный   | 1,05–1,15 |

#### 4.4. Гидравлический расчет головок

Задачи гидравлического расчета были сформулированы в разделе 4.3. В настоящем разделе рассмотрены только методы решения наиболее распространенной задачи гидравлического расчета, заключающейся, как уже отмечалось, в определении рабочей точки путем совместного решения уравнения производительности экструдера (или экспериментально найденной его рабочей характеристики  $Q - p$ ) и уравнения расхода через головку. Таким образом, эта задача сводится в данном случае к определению уравнения расхода через головку.

**Точный метод расчета.** Точный метод гидравлического расчета основан на уравнениях расхода расплава полимера через каналы той или иной конфигурации, полученных при принятии реологического уравнения, описывающего сдвиговое деформационное поведение расплава в форме степенного закона (см. с. 219). Примеры этих уравнений для круглых цилиндрического и конического каналов, для плоской щели с шириной поперечного сечения  $W$ , много большей его высоты  $H$ , а также для кольцевого канала приведены на с. 175–176. Там же приведены формулы для расчета скорости сдвига в этих каналах. Здесь следует только отметить, что каналы экструзионных головок, как правило, имеют довольно монотонные переходы в местах стыка участков с различной геометрией, так что влияние входных эффектов в данном случае столь незначительно, что этим влиянием можно пренебречь. При этом во всех формулах  $L_3$  обращается в  $L$ .

При показателе степени степенного закона, равном единице, указанные формулы описывают поведение ньютоновской жидкости; константа  $m$  в этом случае есть величина, обратная вязкости ньютоновской жидкости. Рассмотренные типы каналов являются наиболее распространенными.

Расчет состоит из следующих основных этапов.

Первый этап, общий для всех методов расчета, заключается в разбиении канала головки на ряд зон, характеризующихся постоян-

ным или монотонно изменяющимся поперечным сечением. Например, для рис. 4.1 это зоны цилиндрической и кольцевой конической частей подводящего канала, кольцевого конического переходного канала и кольцевого цилиндрического формирующего канала. Примем в общем случае число зон, равное  $k$ , порядковый номер зоны  $i$ , причем  $1 \leq i \leq k$ .

Второй этап – определение для каждой из принятых зон расчетных формул типа приведенных на с. 175–176, которые в общем виде могут быть представлены как

$$Q = K_i(m_i, n_i, \Gamma_i) \Delta p_i^{n_i}; \quad (4.13)$$

$$\dot{\gamma}_i = Qf(n_i, \Gamma_i), \quad (4.14)$$

где  $K_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления  $i$ -й зоны, зависящий от геометрии зоны  $\Gamma_i$  и реологических характеристик расплава  $m_i$  и  $n_i$ , в этой зоне при данной производительности  $Q$ ;  $\Delta p_i$  – перепад давления на полной длине зоны.

Для круглого цилиндрического канала, например (см. с. 175),

$$K = (\pi/2^n)(m/n + 3)(R^{n+3}/Ln).$$

При выборе расчетных формул конфигурацию большинства реальных каналов можно либо с некоторыми допущениями считать идентичной рассмотренным, либо рассматривать как их комбинацию.

Третий этап – определение констант  $m_i$  и  $n_i$  “степенного закона” для каждой зоны по имеющейся кривой течения полимера, для которого конструируется головка. Константа  $n$  определяется согласно форме степенного закона (см. с. 174) из представляемой обычно в логарифмических координатах кривой течения (рис. 4.6, кривая 1). Как видно, значения  $m$  и  $n$  зависят от того, на каком участке по скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  кривая течения аппроксимируется степенным законом, представляющим собой прямую линию в указанных координатах. Скорости сдвига в различных зонах большинства головок могут отличаться в десятки, сотни, иногда в тысячи раз, что диктует необходимость определения  $m$  и  $n$  для каждой зоны. Поэтому первой операцией является определение скоростей сдвига  $\dot{\gamma}_i$  для каждой зоны по формулам типа приведенных на с. 000, для чего нужно знать  $Q$  и  $n$ , точные значения которых на данном этапе пока неизвестны.

Значение  $Q$  следует принимать приближенно как  $Q_{\max}$  по известной рабочей характеристике экструдера. Далее, задаваясь константой  $n$ , лучше всего приблизительно определенной из верхнего участка

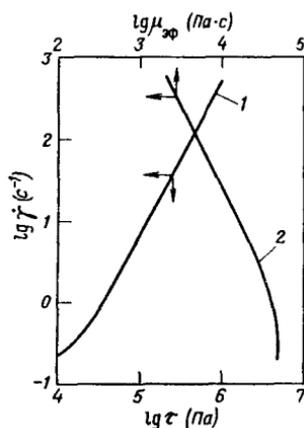


Рис. 4.6. Кривая течения (1) и соответствующая ей зависимость эффективной вязкости  $\mu_{\text{эф}}$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (2)

известной кривой течения как

$$n = \Delta \lg \dot{\gamma} / \Delta \lg \tau, \quad (4.15)$$

находят  $\dot{\gamma}_i$  по указанным формулам. После этого для каждой зоны из кривой течения при заданных  $\dot{\gamma}_i$  вычисляют уточненные значения  $n_i$  по формуле (4.15). Последней операцией является определение  $m_i$  как

$$m_i = \dot{\gamma}_i / \tau_i^{n_i}, \quad (4.16)$$

где  $\tau_i$  получают из кривой течения при известной уже  $\dot{\gamma}_i$ .

Четвертый этап – определение численных значений  $K_i$  по формулам типа (4.13).

Пятый этап – определение уравнения расхода через головку:

$$Q = K_{\Sigma} \Delta p_{\Sigma}^n, \quad (4.17)$$

где  $\Delta p_{\Sigma}$  – создаваемый головкой перепад давления;  $K_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления головки.

Уравнение расхода можно представить в форме (4.17), если найденные ранее значения  $n_i$  окажутся весьма близкими. В этом случае задача сводится к определению  $K_{\Sigma}$  из следующих соображений. На основании формулы (4.13) можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= (Q/K_1)^{1/n} \\ \Delta p_i &= (Q/K_i)^{1/n} \end{aligned} \quad (4.18)$$

---


$$\Delta p_k = (Q/K_k)^{1/n}$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^k \Delta p_i = \sum_{i=1}^k (Q/K_i)^{1/n},$$

$$\sum_{i=1}^k \Delta p_i = \Delta p_{\Sigma},$$

или иначе

$$Q = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^k (1/K_i)^{1/n}} \right]^n \Delta p_{\Sigma}^n. \quad (4.19)$$

Сравнивая выражения (4.17) и (4.19), видим, что

$$K_{\Sigma} = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^k (1/K_i)^{1/n}} \right]^n. \quad (4.20)$$

Далее уравнение (4.17) следует решить совместно с рабочей характеристикой экструдера и получить конкретные значения  $\Delta p_{\Sigma}$  и  $Q$ .

Найденное таким образом значение производительности, естественно, отлично от принятого  $Q_{\max}$  в третьем этапе, и поэтому следовало бы повторять все расчеты, начиная с третьего этапа, каждый раз с

вновь полученным значением производительности  $Q$  до достижения удовлетворительного соответствия двух ее последних рассчитанных значений. Однако изменение производительности во всем оптимальном интервале реальной рабочей характеристики червяка, как правило, не бывает больше чем в два–три раза. Между тем значения констант  $m$  и  $n$  практически во всех кривых течения промышленных термопластов при изменении скорости сдвига (пропорциональной  $Q$ ) в 10–50 раз остаются практически неизменными, поэтому в данном случае необходимость в указанном методе последовательных приближений отпадает.

Если определенные константы  $n_i$  оказываются сильно различными (различие значений констант  $n_i$  более чем на 0,2 может вызвать ошибку при определении  $K_{\Sigma}$  свыше 20%), то должен быть принят следующий путь расчета. После определения  $K_i$  по формулам типа (4.13) в соответствии с третьим и четвертым этапами, где в качестве  $Q$  также в первом приближении принимают  $Q_{\max}$ , рассчитывают  $\Delta p_i$  для каждой зоны канала и затем определяют  $\Delta p_{\Sigma}$ , зная которое, по рабочей характеристике экструдера находят  $Q$  во втором приближении. При определении  $Q$  в третьем приближении эту расчетную процедуру повторяют, принимая уже в качестве  $Q$  не  $Q_{\max}$ , а  $Q$  по второму приближению, и т.д. Расчет повторяют до получения совпадающих с требуемой точностью  $Q$  и  $\Delta p_{\Sigma}$ . Выполнение этого расчета, как видно, целесообразно проводить на ЭВМ.

Рассмотренный точный метод расчета имеет следующие недостатки. 1) невозможность совместного решения рабочей характеристики экструдера (4.1) и уравнения расхода через головку в явной форме относительно  $Q$ , если  $n_i$  существенно различные, что приводит к необходимости применения довольно трудоемкого метода последовательных приближений; 2) отсутствие приемлемых по простоте и точности формул расхода для каналов более сложной формы. Первый из этих недостатков несуществен, если при расчете используется ЭВМ. Вторым является принципиальным. В связи с этим при проектировании головок для изделий со сложной конфигурацией поперечного сечения часто используют приближенный метод гидравлического расчета – метод эффективной вязкости.

**Метод эффективной вязкости.** Метод базируется на следующем допущении: протекающий в том или ином канале головки расплав полимера является ньютоновской жидкостью, причем вязкость этой жидкости равна эффективной вязкости расплава  $\mu_3$ , определенной из реальной кривой течения данного полимера при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , равной ее значению у стенки канала  $\dot{\gamma}_{\text{ст}}$  при течении через него ньютоновской жидкости. Напомним, что эффективная вязкость  $\mu_3$  по определению есть отношение напряжения сдвига к соответствующей скорости сдвига, определенных в какой-либо точке кривой течения, т.е. при каком-либо значении скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ ; величина  $\mu_3$  существенно зависима от  $\dot{\gamma}$ .

При такой постановке в гидравлическом расчете могут быть исполь-

зованы формулы расхода (или перепада давления) и скорости сдвига у стенки канала, полученные не для степенной, а для ньютоновской жидкости. В настоящее время эти формулы известны для гораздо большего набора вариантов геометрии поперечного сечения каналов, чем для степенной жидкости; эта особенность и определяет основное преимущество метода эффективной вязкости по сравнению с точным методом расчета. Однако при этом следует иметь в виду, что ошибка расчетов по приближенному методу, оцененная по величине расхода, может достигать 10–15% по сравнению с точным методом расчета. К тому же, как будет видно ниже, в приближенном методе также приходится применять трудоемкую итерационную процедуру, несколько отличную, однако, от таковой в точном методе.

Первый этап расчета такой же, как и в точном методе.

Второй этап – определение для каждой из зон уравнений расхода, полученных для ньютоновской жидкости. В общем виде эти уравнения могут быть представлены как

$$Q = K_{ni} \Delta p_i / \mu_{zi}, \quad (4.21)$$

где  $K_{ni}$  – коэффициент гидравлического сопротивления  $i$ -й зоны, зависящий только от ее геометрии.

Математические выражения  $K_n$  для каналов различной конфигурации (рис. 4.7) приведены ниже:

$$\text{рис. 4.7, а: } K_n = \pi d^4 / (128L);$$

$$\text{рис. 4.7, б: } K_n = 3\pi D^3 d^3 / [128L(D^2 + Dd + d^2)];$$

$$\text{рис. 4.7, в: } K_n = [\pi(R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1)] / (6L \omega),$$

где  $\omega = \{ [2,3(R_1 - R_2)^2] / (R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1)^2 \} \cdot \lg [R_1 \delta_2 / (R_2 \delta_1)] - [(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)] / [(R_1 \delta_2 - R_2 \delta_1) \delta_1 \delta_2] - (\delta_1^2 - \delta_2^2) / (2\delta_1^2 \delta_2^2) \times (2\delta_1^2 \delta_2^2);$

$$\text{рис. 4.7, г: } K_n = [\pi(R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^3] / (12L);$$

$$\text{рис. 4.7, д: } K_n = bh^3 / (12l);$$

$$\text{рис. 4.7, е: } K_n = bh_1^2 h_2^2 / [6L(h_1 + h_2)];$$

рис. 4.7, ж:  $K_n = F^3 / (2L\Pi^3)$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения канала,  $\Pi$  – периметр поперечного сечения.

Так же, как и при точном расчете, возможна приближенная замена реальных каналов одним из приведенных на рис. 4.7 типов или их комбинаций.

Следует отметить, что последние формулы для канала с произвольной формой поперечного сечения также весьма приближительны и имеют оценочный характер. По одному из более точных методов предлагается вычислять коэффициент геометрической формы  $K_n$  по формуле

$$K_n = [BH^3 / (12L)] f, \quad (4.22)$$

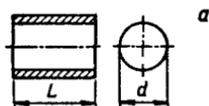


Рис. 4.7. Различные конфигурации каналов:

*a* — круглый цилиндрический; *б* — круглый конический с большим диаметром на входе; *в* — конический кольцевой с конической щелью; *г* — кольцевой; *д* — плоский щелевой; *е* — щелевой клиновидный; *ж* — цилиндрический с произвольным поперечным сечением

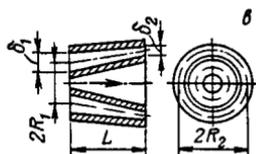
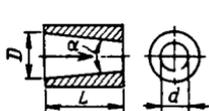
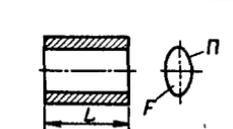
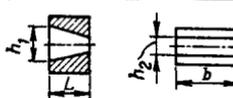
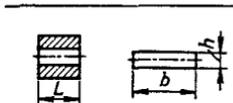
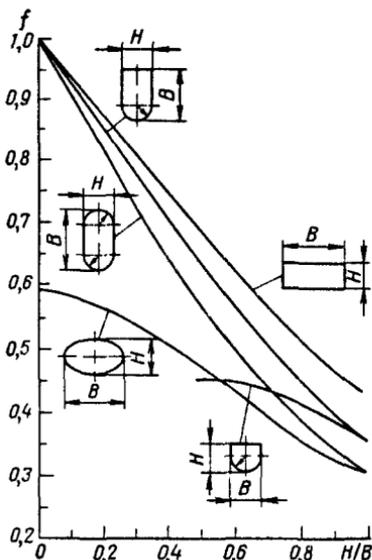
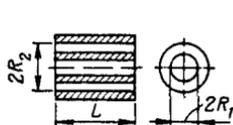


Рис. 4.8. Графики для определения константы  $K_H$  по формуле (4.22)



где  $B$  и  $H$  — максимальный и минимальный размеры сечения;  $f$  — характеристика потока, зависящая от формы сечения и фактора формы ( $H/B$ ).

Графики для определения  $K_H$  каналов некоторых типов конфигурации поперечного сечения приведены на рис. 4.8.

Третий этап — вычисление эффективной вязкости  $\mu_{э}$  для каждой зоны канала. Для этого прежде всего находят значения  $\dot{\gamma}_{стi}$  для каждой зоны по формулам типа

$$\dot{\gamma}_{стi} = Qf(\Gamma_i), \quad (4.23)$$

которые приведены ниже:

рис. 4.7, *a*:  $\dot{\gamma}_{ст} = 32Q/(\pi d^3)$ ;

$$\text{рис. 4.7, б: } \dot{\gamma}_{\text{сг}} = 256 Q / [\pi (D + d)^3];$$

$$\text{рис. 4.7, в: } \dot{\gamma}_{\text{сг}} = 6 Q / [\pi (R_1 + R_2) (\delta_1 + \delta_2)^2];$$

$$\text{рис. 4.7, г: } \dot{\gamma}_{\text{сг}} = 22,3 Q / [4\pi (R_1 + R_2) (R_2 - R_1)^2];$$

$$\text{рис. 4.7, д: } \dot{\gamma}_{\text{сг}} = 6 Q / (bh^2);$$

$$\text{рис. 4.7, е: } \dot{\gamma}_{\text{сг}} = 11,2 Q / [b(h_1 + h_2)^2];$$

$$\text{рис. 4.7, ж: } \dot{\gamma}_{\text{сг}} = 2 Q \Pi / F^2.$$

Так как фактическая производительность экструдера  $Q$  при работе с данной головкой пока неизвестна, то, как и в точном методе расчета, величину  $Q$  в первом приближении следует принимать как  $Q_{\text{max}}$  по известной рабочей характеристике экструдера. Затем по кривой течения при вычисленной таким образом  $\dot{\gamma}_{\text{сг}i}$  находят соответствующее ей значение  $\tau_i$  и, наконец,  $\mu_3$ , как их отношение.

Четвертый этап – определение уравнения расхода через головку, которое в данном случае на основании (4.21) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^k \Delta p_i = Q (\mu_{31} / K_{H1} + \dots + \mu_{3i} / K_{Hi} + \dots + \mu_{3k} / K_{Hk}) = \\ &= Q \sum_{i=1}^k (\mu_{3i} / K_{Hi}). \end{aligned} \quad (4.24)$$

Пятый этап – совместное решение уравнения (4.24) с рабочей характеристикой экструдера, в результате чего определяются значения  $Q$  и  $\Delta p_{\Sigma}$  в первом приближении. Однако вследствие сильной зависимости эффективной вязкости  $\mu_3$  от скорости сдвига точность найденных при этом значений  $Q$  и  $\Delta p_{\Sigma}$ , как правило, оказывается недостаточной. В связи с этим четвертый и пятый этапы повторяют, принимая во втором приближении в формуле (4.23) значение  $Q$ , вычисленное в первом приближении. Точность второго приближения чаще всего оказывается достаточной. Выполнение изложенной здесь расчетной процедуры целесообразно проводить на ЭВМ. Это становится не только целесообразным, но и необходимым, если совместное решение рабочих характеристик экструдера и головки в аналитическом виде получить невозможно.

При очень приближенных, оценочных расчетах  $\Delta p_{\Sigma}$  или  $Q$  возможно введение еще одного приближения, существенно упрощающего вид уравнения расхода через головку и, соответственно, процедуру расчета. Допущение заключается в том, что эффективная вязкость во всех зонах канала головки, несмотря на различие в них скоростей сдвига, считается постоянной и равной таковой в той зоне, которая представляет собой наибольшее гидравлическое сопротивление по сравнению с остальными, или, в соответствии с уравнением (4.17), имеет меньшую константу  $K_H$ .

В соответствии с этим приближением уравнение расхода (4.19) принимает вид

$$\Delta p_{\Sigma} = Q \mu_{\Sigma l} \sum_{i=1}^k K_{ni}^{-1}, \quad (4.25)$$

где  $\mu_{\Sigma l}$  — эффективная вязкость в той  $l$ -й зоне канала головки, которая имеет минимальное по сравнению с другими зонами значение  $K_n$ .

Определение рабочей точки (т.е. значений  $Q$  и  $\Delta p_{\Sigma}$ ) является типовой задачей гидравлического расчета, решаемой, как правило, при проектировании каждой головки. Различные приемы и методы гидравлического расчета, основанные на уравнениях расхода типа (4.13) или (4.21), могут использоваться также и при решении задач по вычислению размеров переходных или формирующих каналов в головках для изготовления листов, пленок, труб и изделий сложного профиля. Целью расчетов в данном случае является определение таких конфигураций и размеров каналов, которые обеспечивают требуемую геометрию поперечного сечения изделия, минимальную разнотолщинность листов и пленок, т.е., в общем случае, обеспечивают требуемое качество изделия.

#### 4.5. Плоскощелевые головки

Эти головки используются для получения листов и пленок, а также расплава в виде пленки с последующим нанесением его на какую-либо основу (бумагу, картон, ткань, фольгу и т.д.).

##### 4.5.1. Конструктивные варианты головок

Ширина экструдированных листов и пленок может достигать 1,5 и более метров. В связи с этим при проектировании плоскощелевых головок особенно важно максимально возможное удовлетворение следующих требований к конфигурации канала головки, являющихся в принципе общими для всех типов головок: 1) равенство гидравлических сопротивлений по всем линиям тока (траекториям движения) в канале всех входящих в него элементарных порций расплава); 2) минимально возможные длина канала и площадь его поверхности.

Выполнение первого требования, как будет показано ниже, обеспечивает соблюдение рассмотренного в разд. 4.3 условия равенства элементарных расходов во всех точках по ширине выходного поперечного сечения формирующего канала и, следовательно, получение равнотолщинного листа (пленки).

При выполнении второго требования усилия от давления расплава в канале, действующие на его стенки, минимальны. Требуемая жесткость конструкции головки и прочность ее элементов в этом случае обеспечиваются при минимальной металлоемкости, что очень важно, так как эти усилия в больших головках могут достигать 1 – 3 МН, а масса их может быть до 800 – 1500 кг.

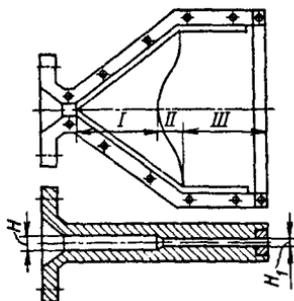


Рис. 4.9. Плоскощелевая головка треугольного типа

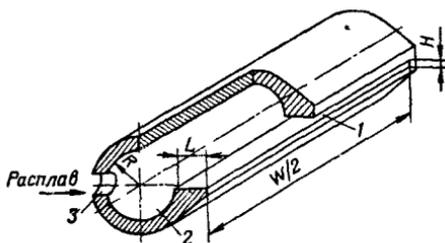


Рис. 4.10. Плоскощелевая головка коллекторного типа

Вместе с тем нужно отметить, что выполнение указанных требований особенно сложно именно в плоскощелевых головках.

По способу подвода расплава к формирующему каналу (т.е. по типу и конфигурации переходного канала) плоскощелевые головки можно разделить на два основных типа: 1) треугольные головки, в которых переходный канал выполнен в виде треугольной в плане и плоской или монотонно сужающейся по высоте щели (рис. 4.9); 2) коллекторные головки, в которых переходный канал выполняется в виде коллектора (распределителя), имеющего круглое или овальное поперечное течение (рис. 4.10).

Конструкция головки первого типа (см. рис. 4.9) называется треугольной. Здесь расширяющаяся входная зона I переходит в зону II выравнивания отмеченного выше гидравлического сопротивления по ширине формирующего канала и затем в зону формирующего канала III. Основным недостатком этих головок заключается в том, что площадь канала велика. Под воздействием давления в канале верхняя и нижняя относительно нежесткие стенки выпучиваются, что влечет за собой искажение конфигурации формирующего канала, тем более чувствительное, чем меньшую высоту он имеет.

В щелевых головках второго типа (коллекторных) расплав подводится к формирующей щели I шириной  $W$  и высотой  $H$  при помощи специальной трубы (коллектора 2 радиусом  $R$ ), расположенной параллельно фронту щели. Коллектор соединен с подводящим каналом 3 одним концом или серединой (как на рис. 4.10). Явление выпучивания стенок формирующего канала в данном типе менее существенно вследствие большей общей жесткости конструкции и существенно меньшей общей площади всего канала. К тому же с помощью соответствующего конструктивного приема (показанного ниже) вредное влияние выпучивания на размеры формирующего канала может быть практически устранено. Однако головки этого типа в отличие от предшествующего имеют потенциально возможные зоны застоя расплава ("мертвые

зоны") в концевых участках коллектора, поэтому переработка на них термочувствительных материалов (например, непластифицированного ПВХ) нежелательна.

#### 4.5.2. Методы выравнивания потока

Поскольку конфигурация канала плоскощелевых головок претерпевает сильную трансформацию – от круглого на входе до плоского на выходе, имеющего весьма большую ширину  $W$  и очень малую по сравнению с ней высоту  $H$ , – элементарные частицы расплава, подошедшие к формирующему каналу в различных местах, проходят перед этим различные пути (линии их тока имеют различную длину). Так, совершенно очевидно, что для представленных на рис. 4.9 и 4.10 конструкций расплав, выходящий из середины щели (для коллекторной головки это положение справедливо при центральном питании коллектора), имеет минимальную длину линий тока и максимальную скорость выхода из формирующего канала, а расплав, выходящий в концах щели, – максимальную длину и минимальную скорость (если не предприняты специальные меры для уравнивания скоростей). Эта разность скоростей приводит к поперечной разнотолщинности формируемого листа: как отмечалось в разд. 4.3, в местах формирующего канала с большей скоростью выхода формируется участок листа с большей толщиной.

Следует отметить, что при экструзии листов и пленок (т.е. в общем случае равнотолщинных в поперечном сечении изделий) условие равенства скоростей выхода  $V_3$  может быть заменено менее жестким условием постоянства удельного расхода расплава  $q$  по ширине формирующего канала. Под удельным расходом  $q$  здесь будем понимать расход расплава, приходящийся на единицу ширины щели формирующего канала; выражение для  $q$  имеет вид:

$$q = V_3 H, \quad (4.26)$$

где  $H$  – высота формирующего канала.

Для уяснения существа этого модифицированного условия примем к сведению, что экструдированный из головки расплав в виде листа поступает в калибрующее и охлаждающее устройство (как правило, валкового типа), принимающее его со скоростью  $V_{\text{пр}}$ , постоянной по всей ширине листа. Величина удельного расхода  $q$  может быть представлена также как

$$q = V_{\text{пр}} \delta, \quad (4.27)$$

где  $\delta$  – толщина листа.

Из (4.27) при учете  $V_{\text{пр}} = \text{const}$  видно, что для обеспечения поперечной равнотолщинности листа (т.е.  $\delta = \text{const}$ ), достаточным является лишь постоянство  $q$  по ширине листа (т.е.  $q = \text{const}$ ). Вместе с тем из (4.26) ясно, что требуемое условие  $q = \text{const}$  может соблюдаться также и в том случае, если  $V_3$  является некоторой функцией координаты

ширины канала  $w$ , т.е.  $V_3(w)$ . Это, однако, верно при условии, что высота формующего канала  $H$  также непостоянна по его ширине. Функция  $H(w)$  при этом должна иметь следующий вид:

$$H(w) = q / V_3(w). \quad (4.28)$$

Таким образом, равнотолщинный лист можно получать и в условиях непостоянства  $V_3$  и высоты формующего канала  $H$  по его ширине. При этих условиях для гарантированного устранения морщинистости листа скорость его приема должна быть несколько большей, чем максимальное значение  $V_3$ . Установленная здесь возможность вариации высоты формующего канала, как показано ниже, используется в практике конструирования и эксплуатации щелевых головок для достижения условия  $q = \text{const}$ .

Степень соблюдения условия выравнивания расхода  $q$  по ширине формующего канала количественно принято оценивать отношением

$$U = q_{\min} / q_{\max}, \quad (4.29)$$

где  $q_{\min}$  и  $q_{\max}$  — соответственно минимальное и максимальное значения удельных расходов на выходе из формующего канала.

Это отношение называют параметром однородности экструзии. Очевидно, что идеальной является ситуация  $U = 1$ .

При конструировании головок возможны два принципиально различных подхода с точки зрения обеспечения однородности экструзии.

Первый подход: проектируют головку с такими конфигурацией и размерами каналов, чтобы обеспечить значение параметра  $U$  не ниже допустимого  $[U]$ , заданного требованиями, предъявляемыми к листу (пленке).

Второй подход: проектируют головку с такими конфигурацией и размерами каналов, чтобы соблюдалось условие

$$U = 1. \quad (4.30)$$

Второй подход, как видно, более совершенен, однако конструкция и технология изготовления головок оказываются более сложными, чем при первом подходе.

Существо конструктивных решений при первом и втором подходах принципиально подобно и заключается в том, что переходному (и формующему) каналу придается такая форма, которая обеспечивала бы приблизительное или точное равенство гидравлических сопротивлений на пути от входа в головку до любой точки щели на выходе. При этом течение массы дросселируется (тормозится) в средней части поперечного сечения и усиливается по краям щели. К головкам такого типа относится показанная на рис. 4.9. Здесь в пределах зоны II канал имеет участки с различной высотой (меньшей на участке, ближнем к выходу), причем длина участка с меньшей высотой, измеренная вдоль линии тока, непрерывно уменьшается с ростом длины линии тока (т.е. с приближением к краям канала), обеспечивая тем самым равенство

гидравлических сопротивлений вдоль всех линий тока в зонах  $I-II$ ; отсюда очевидно постоянство давления и расхода по ширине формирующего канала (зона  $III$ ) на входе в него. Треугольные головки с таким видом выравнивающего устройства называются головками типа "рыбий хвост".

Выравнивание гидравлического сопротивления в рассмотренном примере достигается путем согласованного изменения длины переходного и формирующего каналов по ширине, имеющих различные высоты  $H$  и  $H_1$  соответственно. Этот способ гидравлической балансировки называется способом изменения длины канала. Однако возможен и другой способ балансировки, при котором граница раздела между зонами переходного  $I$  и формирующего  $III$  каналов проходит по прямой линии (зона  $II$  отсутствует), а дросселирование потока в средней части канала достигается за счет монотонного уменьшения высоты переходного  $H$  или формирующего  $H_1$  каналов от краев к середине. Этот способ называют способом изменения высоты канала. В практике конструирования применяют как тот, так и другой способы, однако иногда используют одновременно оба способа. Следует отметить, что второй способ более эффективен, чем первый, так как гидравлическое сопротивление каналов гораздо сильнее зависит от их высоты, чем от длины, что можно видеть, например, из формулы  $K_H$  для плоской щели (см. с. 176).

При реализации любого из этих способов возникает необходимость определения конкретного вида зависимости длины  $L$  или высоты  $H$  от координаты ширины  $w$  этого участка канала головки, за счет которого обеспечивается ее гидравлическая балансировка. Вид функций  $H(w)$  или  $L(w)$  может быть подобран экспериментально в ходе изготовления и многократных промежуточных испытаний головки. Это очень трудоемкая и дорогостоящая операция. Эти функции могут также быть определены с той или иной степенью точности на основе ранее рассмотренных точного или приближенного методов гидравлического расчета. В расчетные формулы, как видно, входят реологические характеристики полимеров, значения которых могут быть существенно различны для различных типов и марок. В связи с этим вид функций  $L(w)$  и  $H(w)$  оказывается зависящим от значений этих характеристик.

Строго говоря, головка, в которой реализованы эти функции для какого-либо конкретного материала, может обеспечить требуемое значение  $U$  при работе только на этом материале; иными словами, головка оказывается одноцелевой. К тому же необходимо отметить, что неточности, заложенные в самом методе расчета, неточности вычислений  $L(w)$  или  $H(w)$ , а также технологические неточности при реализации этих функций в металле приводят к необходимости дополнительной, корректировочной гидравлической балансировки, причем возможная степень коррекции, осуществляемой уже непосредственно при работе головки, должна монотонно изменяться от нуля до максимума. При наличии такой дополнительной балансировки появляется возможность переработки на одной головке множества сходных по реологи-

ческим характеристикам материалов. Устройства, которыми оснащаются плоскощелевые головки для гидравлической балансировки (ручной или автоматической) в процессе их эксплуатации, рассмотрены ниже после изложения методов расчета базовых размеров переходного и формующего каналов для треугольных и коллекторных головок.

#### 4.5.3. Расчет размеров каналов головок

**Треугольные головки.** Рассмотрим первый подход к выбору размеров канала головки, схема которого в плане приведена на рис. 4.11. Этот канал включает в себя переходный канал *A* длиной  $l_0$  с входом расплава в него в точке *O* и формующий канал *B* длиной  $L$  и шириной  $W$ . Высота переходного канала  $H$  по соображениям, изложенным в разд. 4.3, как правило, в 2,5 – 4 раза больше высоты формующего канала  $H_1$ . Так как величины  $H_1$  и  $W$  однозначно связаны с размерами формующего листа (или пленки), то на начальной стадии проектирования головки они, как и величина  $H$ , уже известны. Можно ориентировочно считать известной и величину  $L$ , так как она по условию стабилизации потока в формующем канале и минимизации разбухания экструдата (см. разд. 4.3) связана с  $H_1$  соотношением  $L \geq (8 + 15)H_1$ . Задача сводится, таким образом, к определению  $l_0$  или  $\alpha$ , что по существу одно и то же, так как  $l_0$ ,  $\alpha$  и  $W$  однозначно связаны соотношением

$$\cos \alpha = l_0 / [l_0^2 + (W/2)^2]^{1/2}, \quad (4.31)$$

и, возможно, к корректировке размеров  $L$ ,  $H_1$ ,  $H$  в пределах указанных здесь ориентировочных соотношений, если это окажется необходимым. При этом предпочтительными являются решения при минимально возможных  $l_0$  (или максимальных  $\alpha$ ) и  $L$ , так как распорное усилие от давления расплава в канале, габариты и металлоемкость головки в этом случае минимальны.

Первое ограничение на максимальное значение  $\alpha$  уже известно по условию отсутствия зон застоя:  $\alpha_{\max} < 45 + 60^\circ$ . Однако эта величина, как правило, намного превышает максимально допустимое значение  $\alpha$  по условию выравнивания потока на выходе из формующего канала. Именно это допустимое значение и определяется ниже при реали-

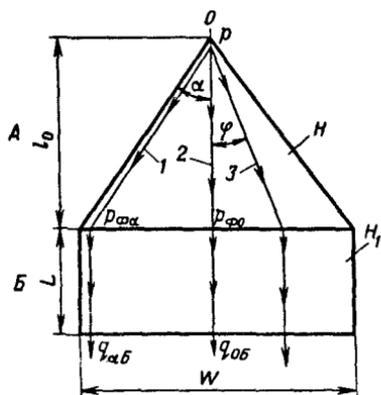


Рис. 4.11. Схема к расчету треугольных головок

зации первого из рассмотренных выше подходов к выбору размеров:  $U = [U]$  (см. с. 000).

Условно выделим вдоль по линиям тока 1 и 2 (см. рис. 4.11) два элементарных канала с единичной шириной. Применительно к данному случаю определение  $U$  (4.29) принимает следующий вид:

$$U = q_{\alpha B} / q_{0B}, \quad (4.32)$$

где  $q_{\alpha B}$ ,  $q_{0B}$  — удельные расходы на выходе из этих условных каналов.

Далее выполним следующее: записав выражения для  $q_{\alpha B}$  и  $q_{0B}$ , в которые войдет искомый параметр  $l_0$  (или  $\alpha$ ), введя их в отношение (4.32) и приравняв последнее к допустимой величине  $[U]$ , получим формулу для определения искомого параметра.

Условные каналы представляют собой плоскую щель, уравнение расхода через которую (см. гл. 3) имеет следующий вид:

$$q = k H^{n+2} (\Delta p / l)^n; \quad k = 1/2^{n+1} m / (n + 2), \quad (4.33)$$

где в общем случае  $H$  — высота канала;  $\Delta p$  — перепад давления на длине канала  $l$ .

Каждый из условных каналов имеет два участка  $A$  и  $B$  с различными высотами  $H$  и  $H_1$ , поэтому уравнение (4.33) можно записать только для какого-либо из этих участков, например для участка  $B$ :

$$q_{0B} = k H_1^{n+2} (p_{\phi 0} / L)^n; \quad q_{\alpha B} = k H_1^{n+2} (p_{\phi \alpha} / L)^n, \quad (4.34)$$

где  $p_{\phi 0}$  и  $p_{\phi \alpha}$  — давления на входе в участок  $B$  каждого из этих каналов, причем эти давления в общем случае не равны хотя бы по той причине, что длины этих каналов на участке  $A$  различны, а давление на входе в них  $p$  одинаково. К тому же  $p_{\phi 0}$  и  $p_{\phi \alpha}$  — величины неизвестные, выражения для них можно получить, записав уравнение (4.33) для участков  $A$ :

$$q_{0A} = k H^{n+2} [(p - p_{\phi 0}) / l_0]^n; \quad q_{\alpha A} = k H^{n+2} [(p - p_{\phi \alpha}) / (l_0 / \cos \alpha)]^n. \quad (4.35)$$

Разрешив (4.35) относительно  $p_{\phi 0}$  и  $p_{\phi \alpha}$  и введя полученные таким образом для них формулы в уравнения (4.34) при учете очевидных равенств  $q_{0A} = q_{0B}$  и  $q_{\alpha A} = q_{\alpha B}$ , получаем эти уравнения в следующей форме:

$$q_{0B} = p^n k (L / H_1^{(n+2)/n} + l_0 / H^{(n+2)/n})^{-n}; \\ q_{\alpha B} = p^n k [L / H_1^{(n+2)/n} + l_0 / (H^{(n+2)/n} \cos \alpha)]^{-n}, \quad (4.36)$$

Наконец, введя уравнения (4.36) в отношение (4.32) и приравняв его, в соответствии с концепцией первого подхода, величине  $[U]$ , получаем:

$$[1 + (l_0 / L) (H_1 / H)^{(n+2)/n}]^n / [1 + (l_0 / L \cos \alpha) (H_1 / H)^{(n+2)/n}]^{-n} = [U]. \quad (4.37)$$

Это выражение, будучи решено совместно с формулой (4.31), позволяет вычислять значение искомого параметра  $l_0$  (или  $\alpha$ ). Следует отметить, что при реальных в практике значениях  $[U] = 0,92 + 0,98$  значения

$\alpha$  по (4.37) получаются намного меньшими допустимых по условию . сутствия зон застоя; головки при этом в значительной мере не удовлетворяют требованиям, приведенным на с. 000. Этот недостаток не принципиален для головок малых размеров, однако для больших головок он недопустим, и поэтому они проектируются при реализации устраняющего этот недостаток второго подхода, детали которого для треугольных головок изложены ниже.

В соответствии с вторым подходом  $U = 1$ , т.е. удельные расходы  $q$  во всех точках на выходе из формирующего канала равны:

$$q_{\phi B} / q_{0B} = q_{\alpha B} / q_{0B} = 1, \quad (4.38)$$

где  $q_{\phi B}$  — удельный расход вдоль некоей произвольной линии тока  $3$  (см. рис. 4.11).

Если записать подобно (4.34) — (4.36) уравнения для  $q_{0B}$  и  $q_{\phi B}$  и взять их отношение, то получим выражение, подобное (4.37), которое, однако, согласно (4.38), будет равно единице, причем вместо параметра  $\cos \alpha$  в нем будет фигурировать функция  $\cos \varphi$ . Очевидно, что равенство этого выражения единице будет возможным только лишь в том случае, если какой-либо из входящих в него параметров геометрии канала также будет функцией переменной  $\varphi$ . Формально функциями  $\varphi$  могут быть  $H_1$ ,  $H$  или  $L$ . Иными словами, второй подход к проектированию головки возможен при гидравлической балансировке канала как способом изменения высоты переходного или формирующего канала [т.е. принятием  $H = H(\varphi)$  или  $H_1 = H_1(\varphi)$ ], так и способом изменения длины канала [т.е.  $L = L(\varphi)$ ]. При этом та или иная из этих функций может быть определена из подобного (4.37) выражения, равного 1.

В треугольных головках на практике используются все три варианта гидравлической балансировки. Пример варианта  $L = L(\varphi)$  приведен на рис. 4.9; определение вида этой функции несколько более сложно, чем двух других. Часто используется вариант  $H_1 = H_1(\varphi)$ , так как технологически более просто выполнить в металле с переменной по ширине высотой монотонный по длине формирующий канал, чем треугольный расходящийся переходный канал. Однако если конфигурация сечения плоского, относительно широкого изделия несколько более сложна, чем у простого листа (например, заготовка протектора автомобильной покрышки, имеющая определенным образом спрофилированные утонения по краям), то конфигурация формирующего канала оказывается уже достаточно сложной по причине требуемого сечения изделия, и в этом случае целесообразно использовать вариант изменения высоты переходного канала  $H = H(\varphi)$ .

**Пример.** Определим вид функции  $H_1(\varphi)$ , для чего предварительно зададимся значением высоты формирующего канала при  $\varphi = 0$ , примерно равным толщине формируемого листа (с учетом принятого коэффициента вытяжки), и обозначим его  $H_{10}$ . Значениями  $H$  и  $L$  также зададимся по изложенным выше соображениям, а величину  $\alpha$  примем максимально возможной по условию отсутствия зон застоя. Ширина формируемого листа  $W$  и коэффициент реологического уравнения  $n$  считаются известными.

Запишем уравнения (4.34) для данного случая следующим образом:

$$q_{0B} = kH_{10}^{n+2} (p_{\phi 0}/L)^n; \quad q_{\phi B} = k[H_1(\varphi)]^{n+2} (p_{\phi \varphi}/L)^n. \quad (4.39)$$

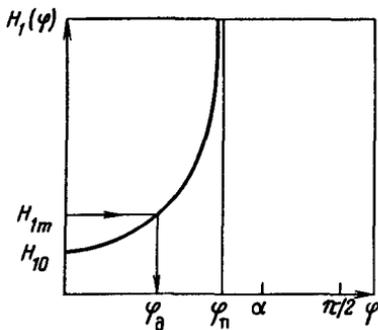


Рис. 4.12. Вид функции  $H_1(\varphi)$  согласно формуле (4.40)

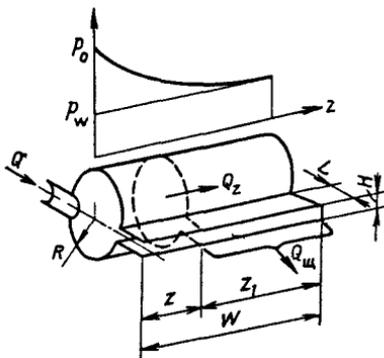
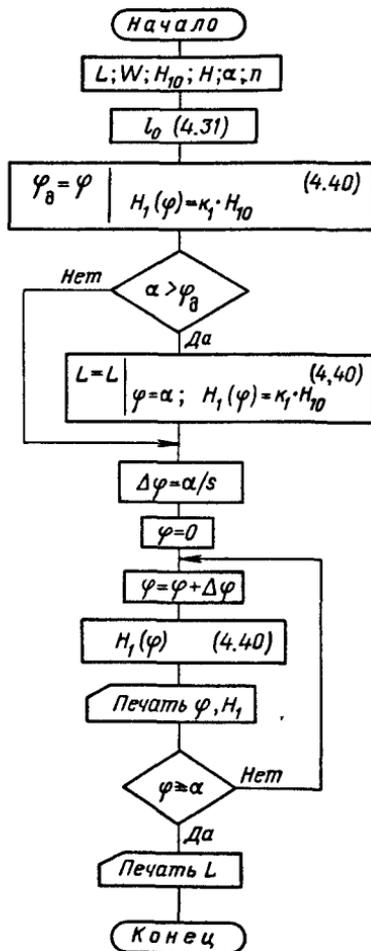


Рис. 4.13. Блок-схема алгоритма расчета размеров треугольной головки

Рис. 4.14. Схема к расчету коллекторных головок ( $W$  — половина ширины формирующего канала)

Уравнения (4.35) будут иметь такой же вид, однако во втором из них для  $q_{\phi A}$  вместо  $p_0 \alpha$  и  $\cos \alpha$  будут  $p_0 \varphi$  и  $\cos \varphi$  соответственно. Выполнив с уравнениями (4.34) и (4.35) процедуру, аналогичную процедуре при получении (4.36), получим выражения для  $q_{0B}$  и  $q_{\phi B}$ . Приравняв отношение этих выражений согласно (4.32) единице, получаем формулу для расчета  $H_1(\varphi)$ , которая, будучи разрешима относительно  $H_1(\varphi)$ , имеет следующий вид:

$$H_1(\varphi) = H(L/l_0)^{n/(n+2)} [(L/l_0)(H/H_{10})^{(n+2)/n} + 1 - 1/\cos \varphi]^{-n/(n+2)}. \quad (4.40)$$

Вид функции  $H_1(\varphi)$ , согласно (4.40), показан на рис. 4.12. Как видно из рисунка, существует некоторое предельное значение  $\varphi = \varphi_{\text{д}}$ , при котором  $H_1(\varphi)$  устремляется в бесконечность. При этом может оказаться, что  $\varphi_{\text{д}}$  меньше принятого максимального значения  $\varphi$ , равного  $\alpha$ . При проектировании головок целесообразно использовать функцию  $H_1(\varphi)$  на том ее участке, на котором максимальные значения  $H_{1\text{м}}$  не превышают  $(1,8 + 2)H_{10}$ ; в противном случае возможен коэффициент вытяжки у краев листа, больший двух, а это, как отмечено в разд. 4.3, недопустимо. Отсюда получаем еще одно ограничение на  $\alpha$ :

$$\alpha \leq \varphi_{\text{д}} \quad (4.41)$$

где  $\varphi_{\text{д}} = \varphi$  при

$$(H_{1\text{м}}/H_{10}) = k_1; \quad k_1 = 1,8 + 2. \quad (4.42)$$

Таким образом, вводя в (4.40)  $H_1(\varphi) = H_{1\text{м}} = K_1 H_{10}$ , можно вычислить величину  $\varphi_{\text{д}}$ . При этом из формулы (4.40) видно, что на величину  $\varphi_{\text{д}}$  можно влиять, изменяя длину формирующего канала  $L$ . Если при расчетах окажется, что  $\varphi_{\text{д}} < \alpha$ , то по (4.40) можно вычислить такое значение  $L$ , большее первоначально принятого, которое удовлетворяет условию  $\varphi_{\text{д}} = \alpha$ . После этого возможен уже расчет по (4.40) искомой функции  $H_1(\varphi)$ . Алгоритм этого расчета, который целесообразно выполнять на ЭВМ, приведен на рис. 4.13.

В заключение этого примера необходимо отметить, что рассчитанное новое значение  $L$  может оказаться столь велико, что гидравлическое сопротивление головки станет нежелательно (или недопустимо) большим. Таким образом, должно быть еще одно ограничение, выполнение которого необходимо при решении этой задачи. Оно может формулироваться различным образом в зависимости от конкретных условий. Например, давление на входе в головку  $p$ , которое можно рассчитать по формуле для  $q_{0\text{Б}}$  (4.36), где  $H_1 = H_{10}$ , не должно превышать 30 МПа, или рабочая точка должна быть в пределах рабочей характеристики экструдера и т.д. Если это ограничение первоначально в расчете не выполнено, то выполнения его можно добиться, например, вариацией  $\alpha$  (и, соответственно,  $l_0$ ). Модификацию приведенного на рис. 4.13 (или ему подобного) алгоритма с этим условием в той или иной форме целесообразно выполнить самостоятельно. Также самостоятельно целесообразно продумать возможность упрощения алгоритма на рис. 4.13.

**Коллекторные головки.** Первый подход к выбору конфигурации и размеров коллектора и формирующей щели методически аналогичен таковому для треугольных головок. Схема канала головки показана на рис. 4.14. Расплав из подводящего канала входит в коллектор с расходом  $Q$  и, растекаясь по двум ветвям коллектора (на рис. 4.14 показана одна из них), истекает из него через формирующий канал. В коллекторе при течении расплава вдоль него устанавливается некоторый перепад давления, поэтому давление, при котором расплав входит в формирующую щель, оказывается несколько большим со стороны щели, прилегающей к входу в коллектор (величина  $p_0$ ), и несколько меньшим с глухого, наиболее удаленного от входа конца коллектора (величина  $p_w$ ). Если размеры щели  $L$  и  $H$  по всей ее длине остаются неизменными, то из-за различия в величине давлений удельный расход  $q$  материала на удаленном участке  $q_w$  будет меньше, чем на расположенном напротив входа в коллектор  $q_0$ . Очевидно, чем меньше перепад давления по длине коллектора по сравнению с перепадом по длине формирующего канала, тем ближе к единице значение параметра однородности экструзии:

$$U = q_w/q_0. \quad (4.43)$$

Далее, перепад давления по длине коллектора  $p_0 - p_W$  тем меньше, чем больше радиус коллектора  $R$ . Отсюда два пути повышения  $U$ : увеличение  $R$  или  $L$ . Однако очевидно, что условию  $U = 1$  отвечают нереальные условия  $R \rightarrow \infty$  или  $L \rightarrow \infty$ . Какими же конкретно должны быть значения  $L$  и  $R$  для обеспечения условия первого подхода  $U = [U]$ , можно определить только при наличии соотношения, устанавливающего связь между  $L$ ,  $R$  и  $U$ . Вывод его приведен ниже.

Уравнение удельного расхода  $q$  в произвольном месте формующего канала с координатой  $z$  таково [см., например, (4.33)]:

$$q(z) = k_H [p(z)/L]^n; \quad k_H = (1/2^{n+1}) [m/(n+2)] H^{n+2}. \quad (4.44)$$

В соответствии с ним выражение для  $U$  можно записать следующим образом:

$$U \equiv q_{\min}/q_{\max} = q(W)/q(0) = (p_W/p_0)^n. \quad (4.45)$$

Если найти теперь выражения для  $p_W$  и  $p_0$ , включающие в себя  $R$  и  $H$ , и ввести их в (4.45), то получим искомую связь между  $R$ ,  $L$  и  $U$ . Ниже представлена попытка выполнения этой процедуры.

Расход вдоль канала коллектора  $Q_z$  есть функция координаты  $z$ , которая монотонно снижается до нуля в конце коллектора (при  $z = W$ ). Очевидно при этом, что производная  $dp/dz$ , пропорциональная  $Q_z$ , не постоянна по  $z$ , вследствие чего в уравнении расхода через круглый канал она не может быть заменена конечноразностным отношением  $(p_0 - p_W)/W$ . Таким образом, выражение для расхода  $Q_z$  в некотором произвольном сечении коллектора с координатой  $z$  имеет следующий вид:

$$Q_z = k_R (dp/dz); \quad k_R = (\pi/2^n) [m/(n+3)] R^{n+3}. \quad (4.46)$$

Из рис. 4.14 очевидно следующее равенство:

$$Q_z = Q_{\text{ш}}, \quad (4.47)$$

где  $Q_{\text{ш}}$  — расход из формующего канала на участке ширины его от  $z$  до  $W$ .

Расход  $Q_{\text{ш}}$  может быть определен как

$$Q_{\text{ш}} = \int_z^W q(z) dz. \quad (4.48)$$

Вводя в левую часть равенства (4.47) выражение (4.46), а в правую часть (4.48) и (4.44), получаем интегрируемое дифференциальное уравнение, устанавливающее связь между  $p$  и  $z$ :

$$k_R (dp/dz)^n = k_H / L^n \int_z^W p^n dz. \quad (4.49)$$

Продифференцировав левую и правую части (4.49) по  $z$  и сгруппировав затем сомножители, получим:

$$(dp/dz)^{n-1} d^2p/dz^2 = \alpha (-p^n); \quad \alpha = k_H / (nL^n k_R). \quad (4.50)$$

Введение в (4.50) замены вида

$$\varphi = dp/dz \quad (4.51)$$

позволяет разделить переменные в этом уравнении. Введем (4.51) в (4.50):

$$\varphi^{n-1} d\varphi/dz = \alpha(-p^n); \quad (4.52)$$

затем умножим левую часть (4.52) на отношение  $\varphi/(dp/dz)$ , которое, согласно (4.51), равно единице:

$$\varphi^n d\varphi/dp = \alpha(-p^n). \quad (4.53)$$

Разделяя в (4.53) переменные и выполняя интегрирование с последующей обратной подстановкой, получаем:

$$(n+1)^{-1} (dp/dz)^{n+1} = -\alpha (n+1)^{-1} p^{n+1} + c. \quad (4.54)$$

Постоянную интегрирования  $c$  определяем из условия, что на конце коллектора (т.е. при  $z = W$  и  $p = p_W$ )  $Q_z = 0$  и, следовательно, согласно (4.46),  $dp/dz = 0$ :

$$c = \alpha (n+1)^{-1} p_W^{n+1}. \quad (4.55)$$

Вводя (4.55) и (4.54), разделяя переменные и интегрируя при граничных условиях

$$p|_{z=W} = p_W; \quad p|_{z=0} = p_0, \quad (4.56)$$

имеем:

$$\alpha^{-1/n+1} \int_{p_W}^{p_0} dp / (-p^{n+1} + p_W^{n+1})^{-1/n+1} = \int_0^W dz. \quad (4.57)$$

Выполнив интегрирование в (4.57), можно было бы получить формулу, устанавливающую связь между  $p_W/p_0$  и параметром  $\alpha$ , который, как видно из уравнений (4.44), (4.46) и (4.50), зависит от  $R$  и  $L$ . Вводя эту формулу в (4.45), можно было бы вычислить такое значение  $\alpha$  (и, следовательно,  $R$  или  $L$ ), при котором  $U = [U]$ . Однако препятствием является то, что интеграл в левой части (4.57) — неберущийся. В связи с этим данную процедуру в несколько модифицированном виде следует выполнять с использованием ЭВМ. Один из примеров простейшего (но не самого экономного) ее исполнения приведен ниже.

**Пример.** Введя безразмерную переменную следующего вида

$$\xi = p/p_W; \quad \xi_0 = p_0/p_W, \quad (4.58)$$

представим (4.57) таким образом:

$$F(\xi_0) = \alpha^{1/(n+1)} (-W). \quad (4.59)$$

Здесь

$$F(\xi) = \int_1^{\xi} f(\xi) d\xi; \quad f(\xi) = (1 - \xi^{n+1})^{-1/(n+1)}. \quad (4.60)$$

Требуется найти такое значение верхнего предела интегрирования  $\xi = \xi_0$  в  $F(\xi)$ , при котором выполняется равенство (4.59). Поиск  $\xi_0$  сводится к циклической процедуре вычисления  $F(\xi)$  каждый раз с новым, большим значением верхнего предела интегрирования и проверке выполнения равенства (4.59); конец цикла — выполнение этого равенства или, возможно, превышение очередного значения  $F(\xi)$  над значением правой части (4.59). Шаг по  $\xi$  в циклической процедуре должен быть намного меньшим общего диапазона  $1 \leq \xi \leq \xi_0$ . Для сведения:  $\xi_0$  может иметь значения 1,3 — 1,05.

По найденному таким образом  $\xi_0 = p_0/p_w$  из (4.45) вычисляется  $U$  и сравнивается с принятым  $[U]$ . Если  $U < [U]$ , то принимается новое, меньшее значение  $\alpha$ , и вся процедура повторяется, образуя новый, внешний цикл. Блок-схема этого алгоритма расчета приведена на рис. 4.15. В этой схеме наряду с известными параметрами  $m, n, W, H$  задаются также в первом приближении величины  $R$  и  $L$ .

Имея найденное таким образом значение  $\alpha$ , по формулам (4.44), (4.46) и (4.50) можно определить размеры  $L, H$  и  $R$ . Однако (4.44), (4.46) и (4.50) представляют собой фактически лишь одно условие для определения трех неизвестных. Предлагается самостоятельно подготовить алгоритм по возможности однозначного их вычисления с привлечением для формулировки двух других недостающих условий той информации из этой главы, которая окажется полезной.

Наконец, также самостоятельно можно попытаться упростить блок-схему на рис. 4.15 (возможность этого имеется).

Второй подход, заключающийся в удовлетворении условия  $U = 1$ , состоит в следующем. Поскольку перепад давления по длине коллектора неизбежен, то в соответствии с видом зависимости  $p = p(z)$  следует изменять по координате  $z$  (вдоль ширины щели  $W$ ) либо высоту щели  $H$ , либо ее длину  $L$ , чтобы расход через единицу ширины щели  $q$  оставался постоянным по ширине канала. Основным при этом является уравнение (4.44), в котором, однако, для данного случая  $U = 1$ :

$$q = Q/2W = \text{const}, \quad (4.61)$$

где  $W$  — половина ширины щели (см. рис. 4.14);  $Q$  — полный расход.

Если в (4.44) подставить функцию  $p = p(z)$ , то в зависимости от принятого метода выравнивания потока получаем выражение  $L = L(z)$

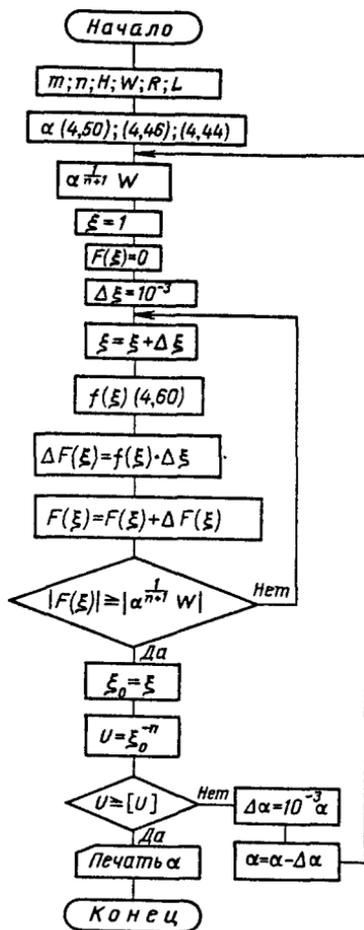


Рис. 4.15. Блок-схема алгоритма расчета размеров коллекторной головки

или  $H = H(z)$ . Задача, таким образом, заключается в отыскании функции  $p = p(z)$ .

Пусть  $Q_{щ}$  — расход через участок щели с текущей шириной  $z_1$  (где  $z_1$ , в отличие от предыдущего рассмотрения, с целью удобства принято равным нулю в конце коллектора, см. рис. 4.14). Расход через единицу ширины щели, по определению, равен

$$q = dQ_{щ} / dz. \quad (4.62)$$

Подставляя в формулу (4.61) формулу (4.62) и производя интегрирование при граничных условиях

$$Q_{щ} |_{z_1=0} = 0 \text{ и } Q_{щ} |_{z_1=z_1} = Q_{щ}, \quad (4.63)$$

получаем:

$$Q_{щ} = (Q/2W) z_1. \quad (4.64)$$

С другой стороны, расход через щель  $Q_{щ}$  равен расходу  $Q_z$  в сечении коллектора с координатой  $z_1$ , который определен формулой (4.46) (см. рис. 4.14). Приравнявая на основании этого (4.64) и (4.46) и разделяя переменные, имеем:

$$(2Wk_R/Q)^{1/n} dp = z_1^{1/n} dz_1. \quad (4.65)$$

Интегрируя уравнение (4.65) при граничных условиях

$$p |_{z_1=z_1} = p \text{ и } p |_{z_1=W} = p_W,$$

получаем искомую функцию  $p = p(z_1)$ :

$$p(z_1) = p_W - M[1 - (z_1/W)^{(n+1)/n}]; \quad (4.66)$$

$$M = 2^{(n-1)/n} n(n+3)^{1/n} / [(1+n)(\pi m R n^3)^{1/n}] W Q^{1/n}.$$

Уравнение расхода через единицу ширины щели (4.44) для данного случая таково:

$$q = \text{const} = Q/2W = (1/2^{n_1+1}) [m_1/(n_1+2)] (H^{n_1+2}/L^{n_1}) [p(z_1)]^{n_1}. \quad (4.67)$$

В нем реологические константы отличны от таковых в формуле (4.66), поскольку, как правило, скорости сдвига в щели на несколько десятичных порядков больше, чем в коллекторе. Поэтому при расчетах предварительно необходимо определить скорости сдвига по формулам на с. 000 для круглого канала и плоской щели и из кривой течения — две соответствующие им пары констант  $m$ ,  $n$  и  $m_1$ ,  $n_1$ .

Подставляя выражение (4.65) в формулу (4.67) и полагая  $L = \text{const}$  и  $H = H(z_1)$  или  $H = \text{const}$  и  $L = L(z_1)$ , имеем соотношение для определения последних. Величину  $p_W$  в уравнении (4.66) можно определить из зависимости (4.67), если записать ее для координаты  $z_1 = W$  и подставить в нее значение  $L_W$ , выбранное по общим для всех головок соотношениям, приведенным в разд. 4.3 ( $H_W$  при этом считается известной в соответствии с известной толщиной листа и принятой степенью вытяжки).

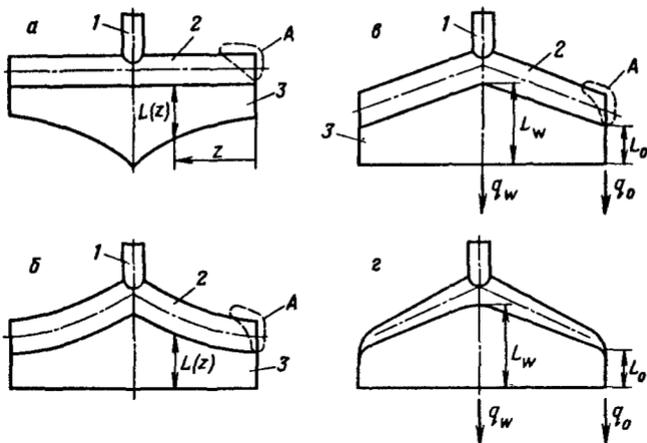


Рис. 4.16. Варианты конфигурации каналов коллекторных головок:

1 — подводящий канал; 2 — коллектор; 3 — формирующий канал. Пояснения в тексте

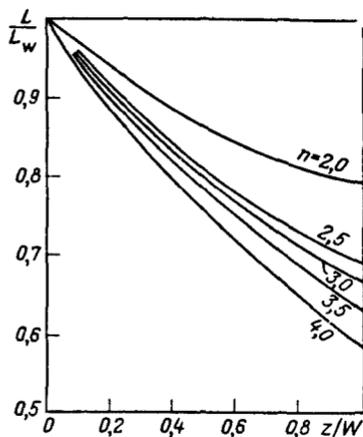


Рис. 4.17. График изменения длины формирующего канала по ширине щели коллекторной головки

Вид функции  $H(z)$  качественно подобен таковому для треугольных головок (см. рис. 4.12), однако есть принципиальное отличие: отсутствует значение аргумента, при котором функция устремляется в бесконечность. Вид определенной по (4.66), (4.67) функции  $L(z)$  приведен на рис. 4.16,а. Очевидно, что такой вариант конструктивного оформления канала неприемлем, так как выходное сечение формирующего канала не плоское. Вследствие этого неизбежно искажение линий тока на выходе, направление скоростей выхода расплава в различных точках по ширине щели различно, что приводит к искажению формы листа (появлению гофров). В связи с этим выполняют канал по варианту „б”, несмотря на то, что исполнение криволинейного коллектора более сложно.

На рис. 4.17 приведена зависимость  $L(z)$  для головки типа „б” на рис. 4.16. Этой зависимости соответствует конфигурация коллектора

для материалов с различной степенью псевдопластичности  $n$ . Как видно из рис. 4.17, кривизна кривых весьма невелика, особенно при  $n > 2,5$  (именно этот диапазон по  $n$  свойствен расплавам большинства термопластов), поэтому вполне допустимой является аппроксимация их прямыми, что значительно облегчает выполнение конструкции в металле. Пример канала с таким коллектором приведен на рис. 4.16, в. Полного выравнивания потока в этом случае добиться не удастся, однако, правильно выбрав размеры  $L_0$  и  $L_W$ , можно обеспечить максимально благоприятную для данного варианта ситуацию:  $q_0 = q_W$ . Например, задавшись значением  $L_W$  и вычислив отмеченным выше способом величину  $p_W$ , можно ввести ее в (4.66) и, положив в этом выражении  $z_1 = 0$ , вычислить  $p(0)$ ; наконец, введя  $p_0$  в (4.67), можно вычислить  $L_0$ .

Каналы коллектора по вариантам "а-в" на рис. 4.16 имеют один недостаток, который существен при экструзии материалов с низкой термостабильностью: из-за постоянной в направлении  $z$  площади их поперечного сечения и убывающего в этом направлении практически до нуля расхода скорости течения также интенсивно убывает, что приводит к очень большим временам пребывания в канале порций расплава, формирующих края листа. Кроме того, в зонах А неизбежен локальный застой расплава. Устраняют этот недостаток, выполняя коллектор, как показано на рис. 4.16, з, со скругленными торцами и монотонно уменьшающимся поперечным сечением.

Для более глубокого усвоения изложенного в данном разделе материала можно предложить самостоятельно получить формулы, подобные (4.66) и (4.67), для расчета функций  $L(z)$  или  $H(z)$  в случае сужающегося коллектора, вводя, например, дополнительное условие постоянства среднерасходовой скорости  $V_z$  по длине коллектора:

$$V_z = Q_z/s = \text{const.} \quad (4.68)$$

В этом случае площадь поперечного сечения коллектора  $s$  (и, следовательно, радиус его  $R$ ) оказывается функцией  $z$ , которую можно определить из (4.68), так как входящая в него величина  $Q_z = Q_{\text{ш}}$  и согласно (4.64), — известная функция  $z$ . Вводя определенную таким образом функцию  $R(z)$  в (4.65), можно встретить сложности при интегрировании которые разрешаются численными методами с использованием ЭВМ. Предлагается подготавливать блок-схему алгоритма расчета  $L(z)$  или  $H(z)$  на ЭВМ.

Вторым вариантом этого же задания для самостоятельного выполнения может быть рассмотрено несколько иное дополнительное условие — например, линейное уменьшение  $R$  коллектора по направлению к краям щели (этот вариант конфигурации канала более технологичен при изготовлении головки).

Возможен также и вариант задания применительно к каналу типа "з" на рис. 4.16. Именно: коллектор прямолинейен, но с уменьшающимся согласно с одним из двух отмеченных выше дополнительных условий сечением, разработать метод расчета такого значения  $L_W$  ( $L_0$  принять по соображениям разд. 4.3), при котором обеспечивается равенство  $q_0 = q_W$ .

Как уже отмечалось в конце разд. 4.5.2, головки, сконструированные и изготовленные даже при реализации подхода  $U = 1$ , в действительности часто не обеспечивают требуемой выравниваемости потока и следующим причинам: 1) в выражения для функций  $H(z)$ ,  $L(z)$  входят логические коэффициенты  $m$  и  $n$ , значения которых могут кол

баться от партии к партии материала (особенно первая из них) и могут оказаться существенно отличными при переходе на другую марку; 2) температура тела головки и, что особенно важно, деталей, образующих формующий канал, не идеально постоянна по ширине его; в связи с этим и вязкость расплава в этом канале не постоянна по его ширине; 3) сами методы расчета не идеально точны; 4) погрешности размеров каналов при их изготовлении и другие трудно учитываемые факторы (например, искажение формы при выпучивании давлением расплава или из-за температурных деформаций).

В связи с отмеченным каждая сколько-нибудь ответственная головка оснащается механизмами (устройствами) для дополнительной, корректировочной гидродинамической балансировки.

#### 4.5.4. Устройства для выравнивания потока

Конструктивно устройства для регулирования высоты щели в коллекторных головках не отличаются от таковых для треугольных. Для толстых листов они показаны на рис. 4.18. В варианте "а" рабочим органом устройства является набор ползунов 10, перемещаемых в вертикальном направлении шлицами 4, которые приводятся в движение резьбовыми втулками 5. При опускании одного из ползунов зазор между овальной поверхностью ползуна и рабочей поверхностью нижней половины головки уменьшается, что вызывает локальное уменьшение расхода  $q$  в этом месте ширины формующего канала, образованного губками 8 и 9. В варианте "б" локальное регулирование высоты канала обеспечивается горизонтальным смещением одного из ползунов 4, осуществляемым винтами 8.

Как видно, в том и другом вариантах невозможно осуществить монотонное изменение высоты канала по его ширине, оно оказывается ступенчатым вследствие конечного числа ползунов. На выходящем из формующего канала расплаве могут оставаться следы от места стыка двух соседних ползунов. Большие сложности возникают в изготовлении головки при тщательной подгонке ползунов по посадочным местам во избежание зазоров, в которые мог бы затекать расплав, подвергаясь при этом деструкции. Несколько лучшей является модификация варианта "а", в которой рабочий орган выполнен не в виде отдельных ползунов, а в виде сплошной планки 10, имеющей малую изгибную жесткость, благодаря чему с помощью шпилек 4 ей удается придавать желаемую конфигурацию. Очевидно, что возможный диапазон разностей высот канала, обеспечиваемых упругой планкой, намного меньше, чем обеспечиваемых ползунами. Поэтому упругая планка применяется в головках для относительно тонких листов, т.е. там, где эти малые разности высот тем не менее оказываются большими по отношению к полной высоте канала.

При экструзии тонких листов и пленок абсолютное значение изменения высоты щели вдоль ее ширины еще меньше, поэтому появляется возможность осуществить эти перемещения, не вводя подвижных

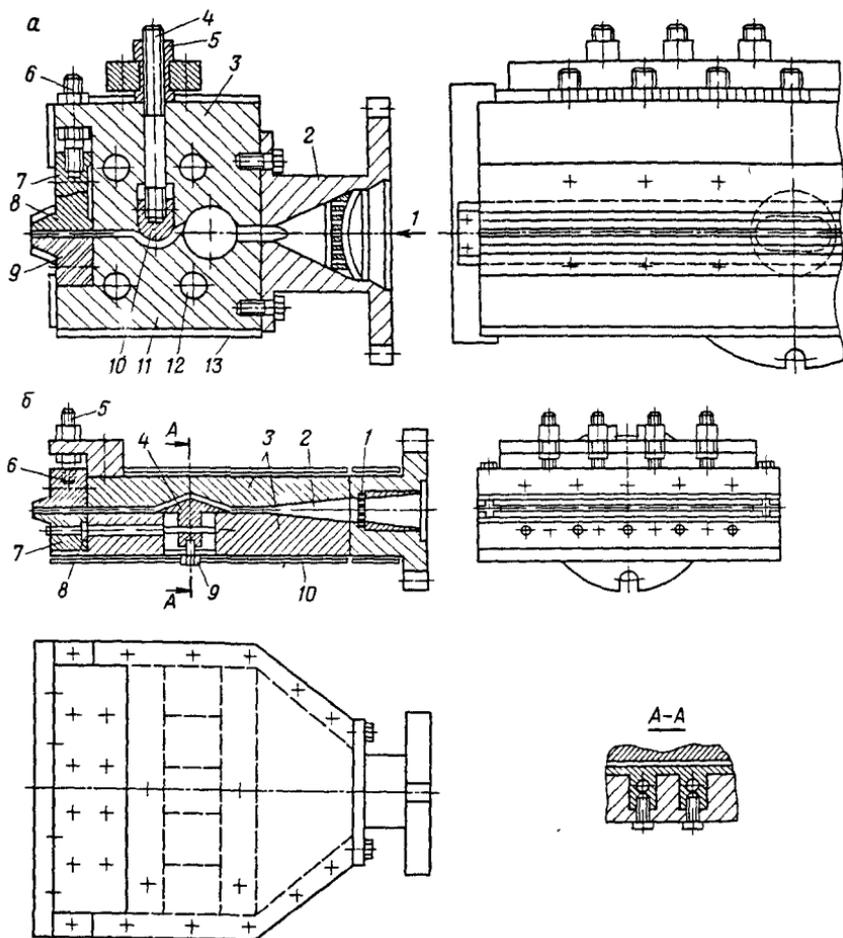


Рис. 4.18. Конструкции щелевых головок с устройствами для гидравлической балансировки:

а — коллекторная головка (1 — вход расплава из цилиндра экструдера; 2 — переходник; 3, 11 — верхняя и нижняя половины корпуса; 4 — шпилька, регулирующая положение дроссельной планки; 5 — резьбовая втулка; 6 — шпилька и резьбовая втулка, регулирующие положение верхней губки; 7 — фиксирующие верхнюю губку винты; 8, 9 — верхняя и нижняя губки формирующей щели; 10 — планка; 12 — отверстия под патронные электронагреватели; 13 — теплоизоляция); б — треугольная головка (1 — переходник с решеткой; 2 — распределительный треугольный канал; 3 — верхняя и нижняя половины корпуса; 4 — ползуны, регулирующие высоту щели канала; 5 — винт, регулирующий положение верхней губки (и, следовательно, толщину экструдруемого листа); 6, 7 — верхняя подвижная и нижняя неподвижная губки формирующей щели; 8 — винты, регулирующие положение ползунков; 9 — винты, фиксирующие положение ползунков; 10 — электрообогрев)

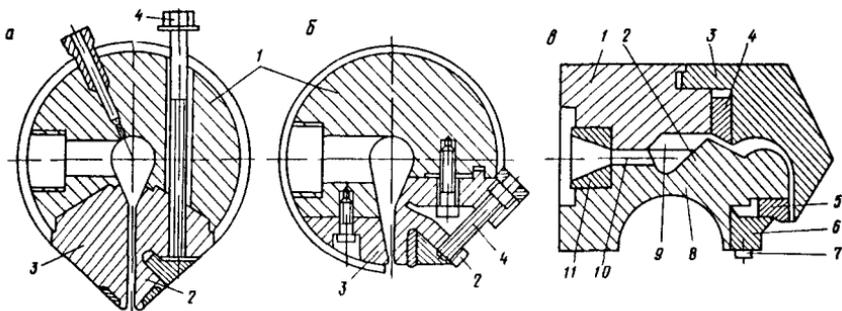


Рис. 4.19. Сечения головок с устройствами для регулирования высоты щели:

а, б: 1 — корпус головки; 2 — упруго деформируемая губка; 3 — неподвижная губка; 4 — винт регулировки высоты щели; в: 1 — верхняя половина корпуса; 2 — нижняя половина корпуса; 3 — верхняя неподвижная губка; 4 — подпорная упругая призматическая планка; 5 — нижняя губка; 6 — плита крепежная; 7 — болт крепления губки; 8 — мнимая ось поворота; 9 — коллектор; 10 — подводный канал; 11 — переходник

дросселирующих устройств, так как они являются причиной возникновения застойных зон. На рис. 4.19, а, б показаны такие конструкции. Регулируемой по высоте щели с помощью комплекта отжимных и подтягивающих болтов 4 в данном случае является сама формирующая губка 2. Различное в разных точках по ширине щели перемещение губки возможно за счет упругой деформации самой губки и относительно маложесткой тонкой переемычки, соединяющей ее с телом головки. Этим же способом в таких конструкциях осуществляется регулирование и общей толщины листа. Такой способ регулирования обеспечивает монотонность профиля канала головки, исключая местные выступы и впадины (места застойных зон) при подвижном дросселирующем элементе. Недостатком их является непостоянство высоты щели на выходе и, следовательно, наличие поперечной разнотолщинности экструдата, которую можно выравнять только соответствующей вытяжкой.

Уже упоминалось, что плоскощелевые головки обладают существенным недостатком, выражающимся в распираии стенок давлением расплава в канале. Коллекторные головки, особенно имеющие столь массивное и жесткое тело, как показанное на рис. 4.19, а, б, имеют этот недостаток в меньшей степени. Головки же типа показанной на рис. 4.19, в практически лишены этого недостатка. Профиль поперечного сечения нижней половины корпуса головки выполнен таким образом, что при действии давления расплава параллельность щели не искажается. Под действием давления нижняя половина 2 корпуса как бы поворачивается на некоторый угол вокруг горизонтальной оси, параллельной оси коллектора и расположенной в самом слабом месте сечения. Верхняя губка под действием давления перемещается по вертикали параллельно нижней губке 5. Таким образом, сохраняется как установленная высота щели, так и ее параллельность.

Гидравлическая балансировка с помощью рассмотренных устройств при отсутствии средств автоматизации – трудоемкая и дорогостоящая операция. Действительно, широкие головки могут иметь более 20 регулировочных винтов. Выставляя каждый из них вручную, необходимо контролировать результат после каждого единичного акта регулирования, отрезая образец его при экструзии и производя измерения. Ситуация осложняется тем, что сколько-нибудь значительное изменение положения одного из винтов изменяет расход  $q$  не только в месте канала непосредственно под этим винтом, но и в близлежащих местах, вызывая необходимость корректировки положения и в них. Очевидно, что балансировка должна выполняться в режиме непрерывной экструзии, так как работа в режиме "пуск (выдавливание участка листа) – останов (отрезание его и измерение толщины)" дает результаты измерений, отличные от таковых в рабочем, установившемся режиме. Расход материала во время балансировки (особенно на крупных установках с производительностью до 200 кг/ч и более) велик, причем часть его – необратимые потери. Правильная, наиболее экономная процедура балансировки – это преимущественно результат искусства и интуиции оператора.

Описанный процесс значительно упрощается и ускоряется, если установка оснащена датчиком и вторичным прибором для непрерывного измерения  $i$ , еще лучше, одновременной записи или вывода на дисплей в числовой или графической форме распределения толщины листа по ширине его. В данном варианте оператор практически сразу видит результат каждого единичного акта регулирования установки. Но и при этом балансировка вручную по времени занимает не менее 0,75 – 1 ч при расходе материала до 100 кг, а минимально допустимая разнотолщинность на тонких пленках составляет не менее 10%, что часто считается неудовлетворительным. Даже в тех случаях, когда такие пленки или лист проходят по качеству, эти 10% составляющий соответствующий резерв снижения материалоемкости производства.

Уже давно велись разработки систем управления с обратной связью, которые по сигналу датчика толщины пленки изменяли бы положение планки или ползуна в требуемом месте по ширине пленки и на требуемую величину. Основной проблемой являлась конструкция исполнительного устройства, осуществляющего смещение регулировочного винта (или, например, шпильки 4 на рис. 4.18, а). Усилия, необходимые для смещения, должны быть достаточно большими из-за противодействия упругой планки и давления расплава в канале головки, поэтому соответствующие габариты всех возможных механических приводов не позволяли разместить их в пределах межцентровых расстояний между шпильками или в непосредственной близости от них.

Относительно недавно найдено решение этой проблемы. Каждый регулировочный болт (или шпилька) помимо резьбовой части, с помощью которой выполняется грубая ручная настройка, имеет достаточно длинный полый участок, в который вставлены электронагреватель и термопара. Изменение температуры болта приводит к измене

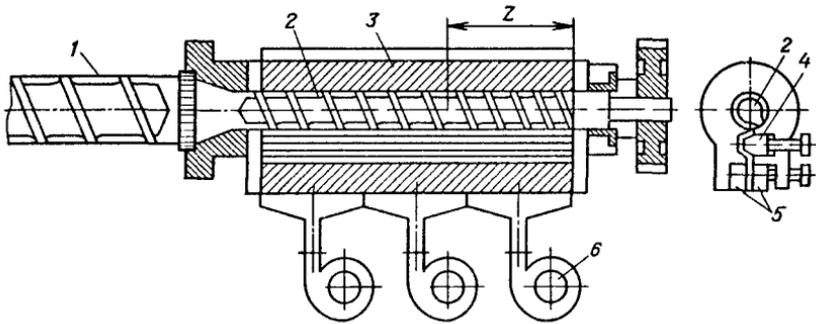


Рис. 4.20. Конструкция головки с распределительным шнеком в коллекторе:

1 — экструдер; 2 — распределительный шнек; 3 — корпус головки; 4 — подпорная планка; 5 — формирующие губки; 6 — вентиляторы теплового регулирования головки

нию его длины и, следовательно, положения планки или формирующей губки. Процессор, получая сигнал датчика толщины пленки в каком-либо месте, по ширине ее, сравнивает его с заданным значением и по величине их разности вычисляет разность температур, на которую надо охладить (или нагреть) соответствующий болт; затем он дает команду на уменьшение (или увеличение) электрического напряжения на нагревателе болта, которое также вычисляет, и прослеживая за изменением температуры болта до требуемой величины (по сигналу термопары), в дальнейшем поддерживает ее на нужном уровне. Если же через некоторый отрезок времени после достижения необходимой температуры болта сигнал датчика толщины свидетельствует о все еще неудовлетворительной ее величине, то цикл регулирования повторяется.

Как уже отмечалось, перепад давления по длине коллектора — основная причина, вызывающая неравномерность экструзии по ширине щели при постоянных ее  $H$  и  $L$ . Конструкции головок с распределительным червяком, установленным в коллекторе (рис. 4.20), не имеют отмеченного выше перепада давления при условии правильно выбранного закона изменения глубины канала нарезки червяка.

Рассмотрим, каков должен быть этот закон. Уравнение (4.64) справедливо и в этом случае. Пусть выполняется требуемое условие  $dp/dz = 0$ ; тогда в уравнении (4.1), определяющем обеспечиваемый червяком расход, остается одно первое слагаемое. Очевидно, расход  $Q_z$  в поперечном сечении канала нарезки червяка с координатой  $z$  должен быть равен расходу  $Q_{щ}$  через участок щели шириной  $z$  (см., например, рис. 4.14). Приравнявая уравнения (4.1) и (4.64), получаем искомую зависимость:

$$h = (Q_{щ}/W)[2/(\pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi)]z. \quad (4.69)$$

Геометрические соотношения таких шнеков подобны таковым для обычных шнеков. Задавшись из этих соотношений глубиной канала  $h_w$

на входе в коллектор, можно таким образом определить требуемую скорость вращения  $N$  шнека. Благодаря шнеку в таких головках полностью исключается возможность зон застоя в концевом участке коллектора и на стенках его, что позволяет использовать такие головки при производстве листов из термочувствительных материалов.

Здесь уравнение (4.1) принято в ньютоновском изотермическом приближении, для которого, как известно, параметр  $\alpha$  имеет следующее выражение:

$$\alpha = 0,5(\pi^2 D^2 h \sin \varphi \cos \varphi), \quad (4.70)$$

где  $D$  и  $\varphi$  — диаметр червяка и угол его винтовой нарезки.

## 4.6. Кольцевые головки

Кольцевые головки (с кольцевым поперечным сечением формирующего канала) подразделяют в соответствии с их назначением на следующие виды:

1) трубные (для получения труб, а также равнотолщинных профилей открытого и закрытого типа с относительно простой конфигурацией сечения подобно показанным на рис. 4.1 и рис. 4.3, а-2, 4.3, б-1, причем преобразование конфигурации сечения кольцевой заготовки, а для открытых профилей и разрезание ее вдоль по образующей выполняются на калибрующем устройстве);

2) раздувные (для получения заготовок расплава в виде цилиндрического рукава с целью последующего раздува их сжатым воздухом в форме);

3) пленочные (для получения расплава в виде тонкостенного рукава относительно большого диаметра с целью последующего раздува и вытяжки его до требуемой толщины стенки);

4) кабельные (для наложения изолирующего полимерного покрытия на проходящей сквозь головку провод или защитного покрытия на кабель, используются также для наложения тонких защитных покрытий на тросы, канаты и т.д.).

### 4.6.1. Трубные головки

Трубные головки имеют преимущественно прямоточную конфигурацию (см. рис. 4.1), удобную с точки зрения приема экструдированных труб, обеспечивающую практически полное равенство длин всех линий тока. Таким образом, сама конструкция головки предусматривает выравнивание потока на выходе из кольцевой щели. Поэтому заложена в конструкции возможность радиального смещения мундштука посредством отжимных болтов 19 с целью регулировки высоты щели формирующего зазора имеет только корректировочный смысл: компенсация незначительной неоднородности экструзии вследствие систематической разности вязкости расплава в различных точках поперечного сечения канала головки (эта неоднородность 248

вязкости может быть вызвана неоднородным распределением температуры в теле головки).

Конструкция головки, изображенной на рис. 4.1, традиционна. При проектировании таких головок следует обращать особое внимание на надежную теплоизоляцию элементов, подводящих в калибрующее устройство холодную воду, от деталей, оформляющих канал головки. Диаметр труб, изготавливаемых в головках такого типа, как правило, близок к диаметру червяка экструдера.

На одной трубной головке возможна экструзия труб различного диаметра и толщины в определенном диапазоне путем замены комплекта дорна и мундштука. В связи с этим элементы крепления мундштука и дорна в головке необходимо конструировать быстроразъемными. Так, на рис. 4.21 показан элемент крепления мундштука, приемлемый для головок малого и среднего типоразмеров. Мундштук 2 прижат комплектом фиксаторов 6 к детали корпуса головки 7. Каждый фиксатор имеет С-образный паз 4, в котором расположен винт 5, имеющий бурт 3. При вращении винта фиксатор перемещается наклонно вверх или вниз, прижимая или освобождая мундштук.

Практикой установлено, что для экструзии труб с диаметром от 20 до 1000 мм достаточно четырех типоразмеров головок: I – от 20 до 115 мм; II – от 125 до 400 мм; III – от 400 до 650 мм; IV – от 650 до 1000 мм.

Каждый из этих типоразмеров имеет свои особенности конструкции, которые обусловлены преимущественно различными приемами монтажа – демонтажа и чистки каналов в связи со значительным различием габаритов и массы как отдельных деталей, так и головок в целом.

Головки I типоразмера (пример на рис. 4.1) имеют вес, как правило, не более 300 – 400 Н. В связи с этим они монтируются на экструдер и снимаются с него, а также разбираются чаще всего без каких-либо подъемных или силовых съемных механизмов. Вес головок I или II типоразмеров, как правило, таков, что их можно крепить на цилиндр экструдера без дополнительных опор. Однако головки II и последующих типоразмеров должны иметь рым-болты (или отверстия под них) для транспортировки и монтажа с использованием подъемных механизмов. У головок же III и IV типоразмеров такие отверстия должны быть также и у отдельных наиболее крупногабаритных и тяжелых деталей, должны также иметься отверстия у деталей и для крепления механизмов и оснастки, используемых при разборке головок: при разборке приходится часто прикладывать очень большие усилия, так как разобщению соседних деталей препятствует материал, оставшийся в каналах.

Вес головок III и IV типоразмеров столь велик (например, головка для труб диаметром 600 мм весит около 25 кН), что их монтируют на специальных лафетах. Лафет подвижен и может откатываться от экструдера по специальным направляющим. На лафете предусматривается регулировка положения головки по высоте для обеспечения

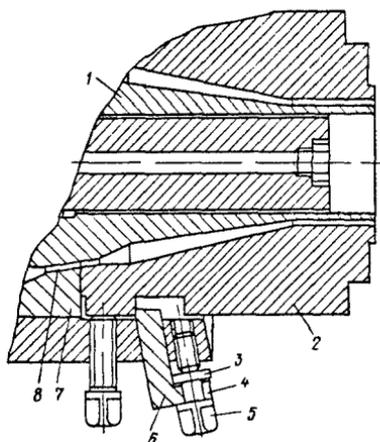
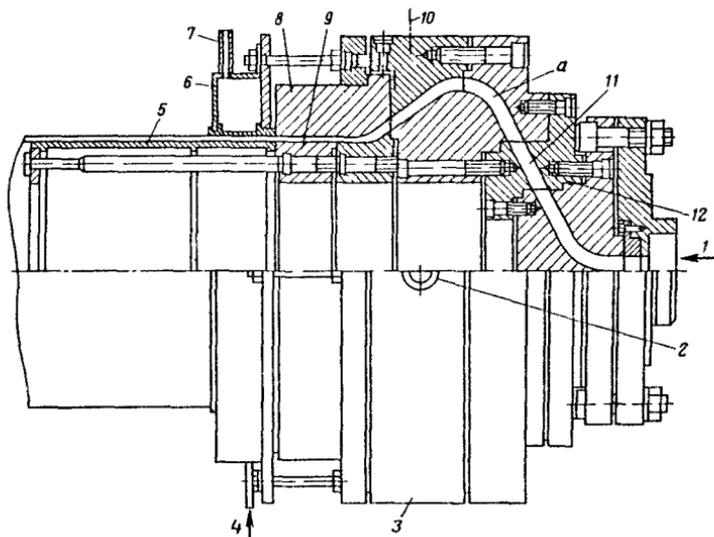


Рис. 4.21. Быстроразъемное крепление мундштука:

1 — дорн; 2 — мундштук; 3 — бурт винта с квадратной головкой; 4 — С-образный паз фиксатора 6; 7 — деталь корпуса головки; 8 — участок локального сужения переходного канала

Рис. 4.22. Конструкция головки для экструзии труб большого диаметра:

1 — вход расплава из экструдера; 2 — ось шарнирного крепления головки к лафету; 3 — корпус; 4 — вход воды; 5 — оправка дорна, поддерживающая трубу при транспортировке ее к охлаждающему устройству; 6 — водяная рубашка калибрующего кольца; 7 — выход воды; 8 — мундштук; 9 — дорн; 10 — отверстие под рым-болт; 11 — ребро дорнодержателя; 12 — дорнодержатель



соосности ее с цилиндром экструдера при креплении к нему. Крепление головки к лафету шарнирное; оно обеспечивает возможность поворота головки на  $90^\circ$  вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной оси головки. Перевод головки в вертикальное положение при этом повороте (формирующим каналом вверх, а местом присоединения к экструдеру вниз) необходим для использования имеющихся в цехе подъемных приспособлений при ее разборке.

Конструкция головки с калибрующим устройством для труб большого диаметра показана на рис. 4.22. Головка состоит из ряда деталей, конструкция и взаимное крепление которых таковы, что при отмечен-

ном выше вертикальном положении ее разборка может быть осуществлена последовательным поднятием каждой детали вверх. Особое внимание при конструировании таких головок уделяется максимально возможному уменьшению их веса. Именно поэтому здесь дорн выполнен полым. Полые дорны должны иметь внутренний электрообогрев (на рис. 4.22 нагреватели не показаны).

Увеличение диаметра канала в месте *a* (см. рис. 4.22) с последующим уменьшением до диаметра формирующего канала, казалось бы, нерационально, так как приводит к значительному увеличению габаритов и веса головки. Однако оно здесь оказывается необходимым для решения проблемы свариваемости отдельных потоков, на которые разбивается расплав ребрами *11* дорнодержателя *12*. Как отмечалось в разд. 4.3, интенсивная деформация поверхностей стыковки потоков достижима при интенсивном уменьшении диаметра канала и его высоты. Для головки на рис. 4.22 этого уменьшения диаметра невозможно достичь без предварительного его увеличения в месте *a*.

Проблема сварки потоков в равной степени относится к головкам всех типоразмеров, однако степень значимости ее неодинакова для различных материалов. Так, полиэтилен низкой плотности, ударопрочный полистирол имеют хорошую свариваемость и не требуется специальных приемов при конструировании головок для ее улучшения. Такова, например, головка на рис. 4.1. Высокомолекулярный полиэтилен высокой плотности, непластифицированный поливинилхлорид имеют плохую свариваемость. В конструкции на рис. 4.21 сварива-

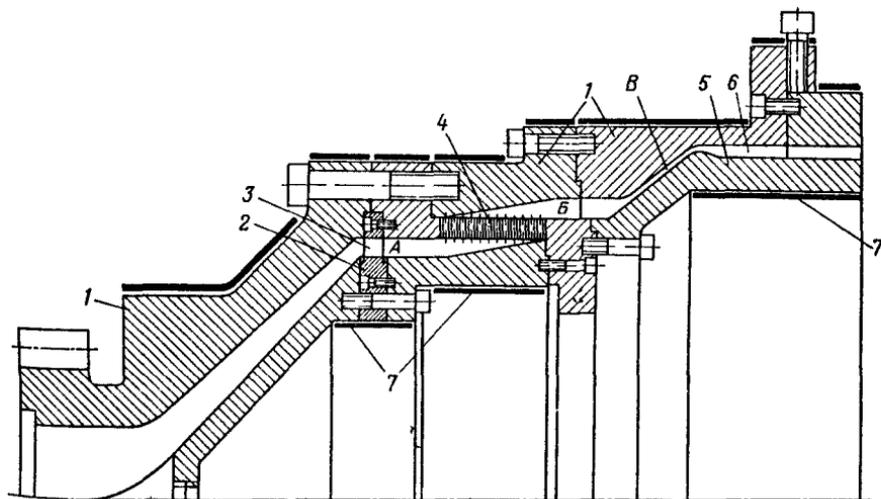


Рис. 4.23. Головка для труб большого диаметра:

1 — детали корпуса головки; 2 — дорнодержатель; 3 — ребра дорнодержателя; 4 — решетка; 5 — дорн; 6 — формирующий канал; 7 — электронагреватели дорна

емость улучшается введением в канал за ребрами дорнодержателя участка локального сужения его 8. Эффективным оказывается также введение решетки непосредственно за ребрами (например, на рис. 4.1 – в место *E* между двумя соседними деталями). Решетка представляет собой плоский диск с множеством мелких отверстий диаметром 1,5 – 2,5 мм в области кольцевого канала.

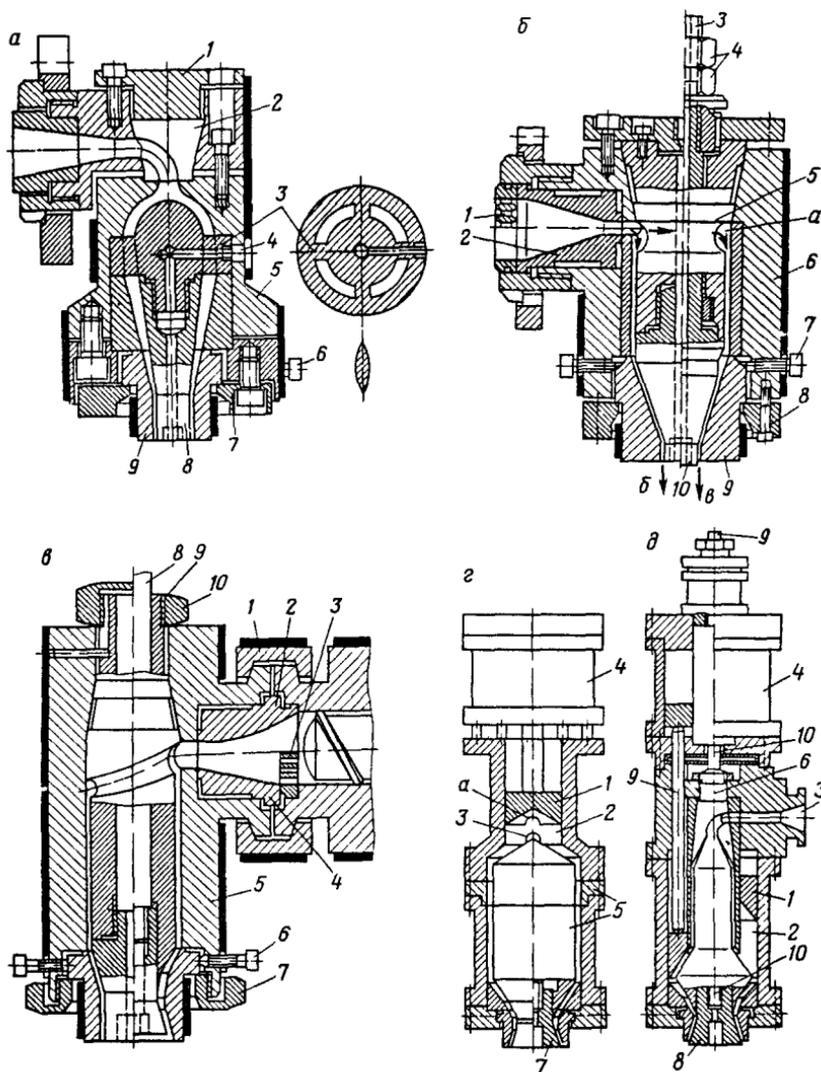
Рассмотренный здесь прием установки за дорнодержателем решетки в виде плоского диска оказывается неприемлемым для больших головок из-за ограниченности площади размещения ее отверстий в узком кольцевом сечении канала: гидравлическое сопротивление головки в этом случае оказывается очень большим. Развить гораздо большую площадь рабочей поверхности решетки можно, выполинив ее в виде стакана, как это показано на рис. 4.23. Как видно, необходимая рабочая площадь решетки 4 может быть достигнута за счет выбора соответствующей длины без увеличения ее диаметра. В связи с этим ее диаметр может быть даже меньшим, чем диаметр формирующего канала 6, что позволяет намного уменьшить диаметр и массу головки по сравнению, например, с конструкцией, показанной на рис. 4.22.

Все прочие головки кольцевого типа, как правило, угловые, т.е. обеспечивают поворот потока расплава на определенный угол по отношению к оси шнека (вниз, вверх, вбок).

#### *4.6.2. Раздувные головки*

Раздувные головки осуществляют поворот потока вниз на 90°. При этом возможны две принципиально отличные конструкции (рис. 4.24): головка с трубчатым коленом и дорнодержателем (рис. 4.24,а) и головка со сквозной пинолью, на которой крепится дорн (рис. 4.24,б). Во всех типах угловых головок вследствие поворота потока расплава неизбежно неравенство длин отдельных линий тока. Так, в головке с трубчатым коленом на рис. 4.24,а линия тока, соответствующая левой образующей, меньше, чем у правой образующей. Этот тип головки, очень схожий конструктивно с прямоточными головками, имеет намного меньшую максимальную разность длин, чем тип головок с пинолью, причем чем меньше диаметр поперечного сечения колена и чем больше радиус колена, тем меньше разность длин линий тока. Поэтому в данном типе регулировка зазора посредством смещения мундштука, как и в прямоточном, имеет корректирующее значение. Основным недостатком этих головок – тот же, что и прямоточных: следы на заготовке (и готовом изделии) от ребер дорнодержателя.

Этого недостатка лишены головки с пинолью (рис. 4.24,б), в которых расплав из переходника 2 попадает сразу в кольцевой подводный канал, монотонно переходящий в переходный и формирующий каналы, не имеющие препятствий, дробящих поток. Однако очевидно, что длины различных линий тока в головках с пинолью существенно различны. Так, на рис. 4.24,б линия тока (считая от выхода из переходника) вдоль левой образующей канала короче таковой вдоль правой



**Рис. 4.24. Конструкции раздувных головок:**

а: 1 — прижимная крышка; 2 — пробка; 3 — дорнодержатель; 4 — канал для подвода воздуха; 5 — корпус головки; 6 — регулирующие болты мундштука; 7 — крепежный фланец мундштука; 8 — дорн; 9 — мундштук; б: 1 — решетка; 2 — переходник; 3 — шток подвижного дорна; 4 — контргайки; 5 — пинюль; 6 — корпус головки; 7 — регулирующие болты мундштука; 8 — крепление мундштука; 9 — мундштук; 10 — дорн; в: 1 — крепление головки; 2, 4 — варианты переходника; 3 — решетка; 5 — корпус головки; 6 — регуляторы положения мундштука; 7 — прижимная гайка мундштука; 8 — штанга, регулирующая положение дорна; 10 — гайка крепления пинюли; г, д: 1 — выдавливающий поршень; 2 — аккумулярующая полость; 3 — вход в головку; 4 — гидро- или пневмоцилиндр привода выдавливающего поршня; 5 — дорн с дорнодержателем; 6 — пинюль; 7 — собственно дорн; 8 — дорн, перемещающийся относительно пинюли в осевом направлении; 9 — штанга привода выдавливающего поршня; 10 — шток, перемещающий дорн в осевом направлении

образующей на длину отрезка, равного приблизительно половине длины окружности поперечного сечения пиноли у выхода из переходника. По этой причине локальный расход  $q$  в месте "б" на выходе из формующего канала может быть значительно большим, чем в месте "а". Радиальное смещение мундштука 9 вправо винтами 7 с целью выравнивания  $q$  приводит к существенной эксцентricности мундштука относительно дорна 10, в связи с чем при достижении равенства  $q$  величина зазора формующего канала в месте "в" становится большей (а скорость экструзии, соответственно, меньшей), чем в месте "б".

Так как, в отличие от экструзии листов и пленок, раздувная заготовка не подвергается принудительной вытяжке с заданной устанавливаемой оператором скоростью, то вследствие отмеченной разности высот формующего зазора и скоростей экструзии заготовка получается разнотолщинной (более толстой в месте "в") и искривленной (с уводом вправо). Таким образом, в головках с пинолью радиальное смещение мундштука не может быть самостоятельным, единственным приемом гидравлической балансировки. Оно может использоваться лишь как дополнительная, корректировочная мера, при реализации которой смещения мундштука очень незначительны, а возникающая при этом разность скоростей выхода из формующего канала столь невелика, что может быть нивелирована естественной вытяжкой заготовки под действием собственного веса.

Приемы гидравлической балансировки каналов угловых кольцевых головок принципиально такие же, как и уже рассмотренные для

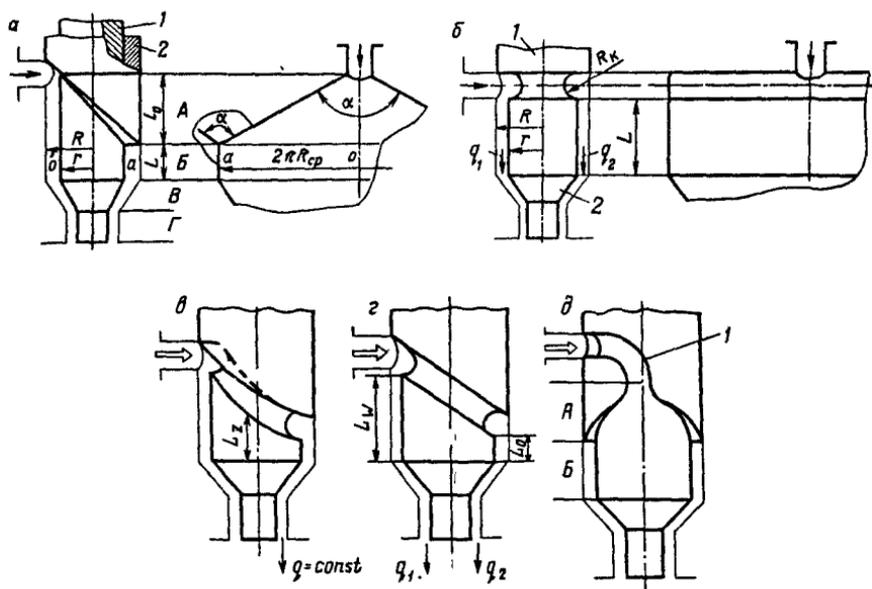


Рис. 4.25. Схемы каналов угловых раздувных головок. Пояснения в тексте

плоскощелевых головок. В связи с этим они излагаются ниже в такой же последовательности. На рис. 4.25 показаны варианты конфигурации каналов при том или ином варианте балансировки.

Если в варианте "а" подводный канал А, Б мысленно разрезать по образующей, расположенной диаметрально противоположно по отношению к входу в него, и выполнить развертку канала (показана справа), то можно видеть, что она практически подобна каналу плоскощелевой треугольной головки (см. рис. 4.11): участки А и Б соответствуют переходному (А) и формирующему (Б) каналам треугольной головки при условии равенства их высот  $H = H_1$ . Значения размеров  $l_0$  и  $L_u$  раздувной головки могут вычисляться по формулам (4.31) и (4.37), если задаться допустимой величиной параметра однородности экструзии  $[U]$ . Входящие в эти формулы геометрические параметры  $W$ ,  $H$  и  $H_1$  (ширина и высота канала) имеют очевидную связь с соответствующими параметрами раздувной головки  $R$  и  $r$  (см. рис. 4.25, а):

$$H = H_1 = R - r; \quad W = 2\pi R_{cp}; \quad R_{cp} = 0,5(R + r). \quad (4.71)$$

При вычислении размеров  $L$  и  $l_0$  по этим формулам наличием участков В и Г переходного и формирующего каналов можно пренебрегать что в итоге повышает запас надежности расчета. Действительно, по отношению к условиям течения в участке А наличие участков В и Г можно рассматривать как некоторое гидравлическое сопротивление, дополнительное к тому, которое создает участок Б. Иными словами, наличие участков В и Г эквивалентно существованию только участка Б с несколько большей длиной  $L$ . Вместе с тем из рассмотрения плоскощелевых головок ясно [см., например, формулу (4.37)], что увеличение длины  $L$  формирующего канала (а применительно к данному случаю — длины участка Б) увеличивает значение параметра однородности экструзии  $U$ .

Величина  $[U]$  здесь должна приниматься достаточно близкой к единице (0,92 — 0,95), так как последующее окончательное выравнивание потока путем радиального смещения мундштука (т.е. способом

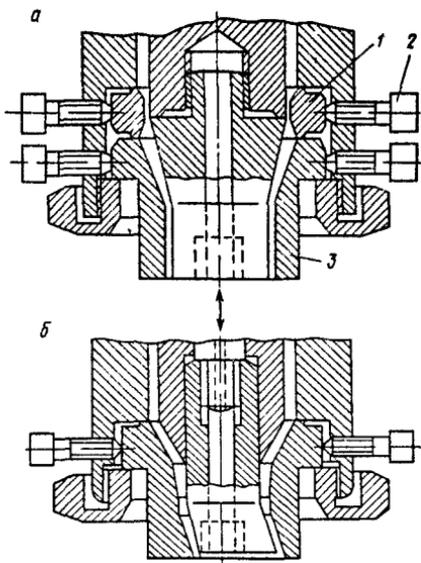


Рис. 4.26. Конструкции узлов для гидравлической балансировки канала головки (а) и регулирования высоты формирующего канала в процессе выдачи заготовки (б):

1 — кольцо для предварительной гидравлической балансировки; 2 — регулировочные винты; 3 — мундштук

изменения высоты формирующего канала), как уже отмечалось, у раздувных головок возможно только при относительно небольшой неоднородности потока. В связи с этим рассчитанные по (4.31), (4.37) значения  $l_0$  и  $L$  оказываются достаточно большими, что приводит к увеличению габаритов головки и ее массы. Этого можно избежать, если кроме окончательного выравнивания смещением мундштука предусмотреть промежуточное выравнивание способом изменения высоты (локально на каком-либо участке) подводящего канала, например на выходе из него, как это показано на рис. 4.26,а. Здесь промежуточное выравнивание осуществляется смещением кольца 1 винтами 2, а окончательное – смещением мундштука 4 винтами 3.

Введение в головку кольца 1 с винтами 2 усложняет ее конструкцию. Возможно, однако, производить предварительную гидравлическую балансировку способом изменения высоты подводящего канала на всей длине его, воспользовавшись иным конструктивным приемом, а именно (см. рис. 4.25,а): отверстие в корпусе пиноли 2 под установку дорна 1 выполнять эксцентрично по отношению к наружной поверхности корпуса. Высота подводящего канала  $H_0$  в месте „о” окажется меньше высоты  $H_\alpha$  в месте „а” на величину, равную удвоенному значению эксцентриситета  $e$ :

$$H_0 = R - (r + e); \quad H_\alpha = R - (r - e). \quad (4.72)$$

Величину эксцентриситета  $e$  нужно выбирать такой, чтобы обеспечивалось равенство удельных потоков  $q$  в местах „о” и „а”. В соответствии с этим условием величину  $e$  можно вычислить по формуле (4.40), если: ввести в нее вместо  $H_{10}$  выражение для  $H_0$  по (4.72); принять в ней  $H_1(\varphi) = H(\varphi)$  и ввести вместо  $H(\varphi)$  выражение для  $H_\alpha$  по (4.72), приняв в (4.72) при этом  $\varphi = \alpha$ ; наконец, разрешить преобразованную таким образом формулу (4.40) относительно  $e$ ; вычислить входящую в (4.40) величину  $l_0$  по (4.31); вычислить входящую в (4.40) величину  $L$  приблизительно по (4.37), приняв в ней  $[U] = 0,7 - 0,8$  и  $H_1 = H$ .

При реализованной по одному из этих вариантов предварительной балансировке величина угла  $\alpha$  (см. рис. 4.25,а) может приниматься максимально возможной (по условию отсутствия зон застоя); при этом длина  $l_0$ , определенная из (4.31), и габариты головки оказываются минимальными.

Приведенный на рис. 4.25,а вариант канала является полным аналогом треугольной плоскощелевой головки, а на рис. 4.25,б – аналогом коллекторной головки (конструкция головки, в которой выполнен этот тип канала, показана на рис. 4.24,б). Действительно, развертка этого канала имеет такой же вид, что и на рис. 4.16,а, за исключением того, что нижняя линия у развертки – не ломаная кривая, а горизонтальная прямая. Как отмечалось при рассмотрении плоскощелевых головок (см. с. 000), для канала такого типа возможно лишь достижение условия  $U = [U]$  при правильном выборе размеров коллектора  $R_k$  и подводящего канала  $L$ . Эти размеры могут вычисляться по изложенной там же методике, причем алгоритм расчета на рис. 4.15 полностью

применим и в данном случае, однако входящий в выражение для  $\alpha$  (4.44), (4.46), (4.50) параметр  $H$  представлен здесь формулой (4.71). Значение  $[U]$ , так же как и для варианта на рис. 4.25, а, можно принимать равным  $0,7 \div 0,8$  при обязательном использовании дополнительной гидравлической балансировки подпорным кольцом 1 (рис. 4.26, а) перед входом в переходный канал. Если же это кольцо отсутствует, как, например, на рис. 4.24, б, то значение  $[U]$  должно быть не менее  $0,92 - 0,95$ , чтобы окончательная балансировка смещением мундштука была минимально возможной по отмеченным выше причинам; при таких значениях  $[U]$  длина головки оказывается гораздо большей.

Возможна также в аналогах коллекторных плоскощелевых головок реализация подхода  $[U] \approx 1$ , если использовать способ изменения высоты подводящего канала или способ изменения длины его (необходимость в подпорном кольце в этом случае отпадает). Например, способ изменения высоты канала можно реализовать, если изготовить дорновую часть пиноли 2 (рис. 4.25, б) эксцентрично относительно ее корпуса 1. Величину требуемого эксцентриситета  $e$  можно рассчитать по формулам (4.66), (4.67).

Предлагается самостоятельно продумать и написать процедуру расчета  $e$ , приняв, например, условие  $q_1 = q_2$  (см. рис. 4.25, б) и считая значения  $R_K, L, Q, R, r, m$  и  $n$  известными. Возможно также введение дополнительного ограничения  $e \leq (0,15 \div 0,2) (R - r)$ , на основе которого минимально допустимое значение  $L$  должно определяться расчетом.

На рис. 4.25, в и г показаны варианты аналогов коллекторной головки, в которых реализован способ балансировки изменением длины подводящего канала. Развертки их, как видно из рисунка, полностью аналогичны таковым на рис. 4.16, б и в соответственно. Размеры  $L(z)$  или  $L_W$  и  $L_0$  при условии  $q = \text{const}$  или  $q_1 = q_2$  соответственно могут быть рассчитаны по формулам (4.66) и (4.67). Конструкция головки с каналом такого типа показана на рис. 4.24, в.

Предлагается самостоятельно продумать и написать процедуры расчета  $L(z)$  или  $L_0$  и  $L_W$  по формулам (4.66) и (4.67), введя в них коррективы применительно к конкретной геометрии каналов на рис. 4.25, в или г.

На рис. 4.25, д представлен еще один вариант подводящего канала. Входящий в головку расплав растекается по двум коленообразным каналам 1, выполненным в теле пиноли и как бы охватывающим ее. Затем расплав из каждого из этих каналов попадает в расширяющуюся А и потом в монотонную Б секции канала. В развертке эти секции полностью аналогичны секциям А и Б канала плоскощелевой треугольной головки на рис. 4.11. Таким образом, в совокупности весь канал на рис. 4.25, д представляет собой как бы установленные параллельно и состыкованные боковыми сторонами в зоне Б два канала типа показанных на рис. 4.25, а.

Проанализировать преимущества и недостатки типа "д" перед типом "а" предлагается самостоятельно. Критериями оценки при сопоставительном анализе могут быть габариты канала при одинаковой степени выравниваемости потока, наличие (отсутствие) зон застоя и мест стыковки потоков и возможности их устранения, степень сложности изготовления, удобства разборки и чистки и др. Продумать, зависит ли в итоге предпочтительный выбор того или иного типа от габаритов (диаметра и длины экструдруемой заготовки).

Гидравлический расчет угловых раздувных головок должен выполняться в соответствии с разд. 4.4, однако следует обратить внимание на одну специфическую особенность его. Как уже отмечалось, раздувная заготовка при экструзии не подвергается ни калибровке, ни принудительной вытяжке. На нее действует только сила собственного веса, которая, однако, приводит к весьма нежелательной естественной вытяжке, неодинаковой по высоте заготовки. Действительно, степень

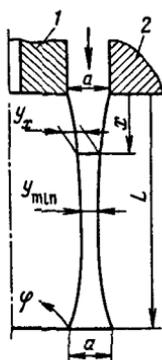


Рис. 4.27. Схема вытяжки экструдированной заготовки под действием собственного веса:

1 — дорн; 2 — мундштук

утонения заготовки в каком-либо сечении по высоте ее  $x$  пропорциональна весу части заготовки ниже этого сечения и времени воздействия этого веса (рис. 4.27). В верхней части заготовки вес максимален, но время воздействия равно нулю, в нижней части — наоборот. Максимальная степень утонения (т.е. минимальная толщина  $y_{\min}$ ), таким образом, имеет место в средней ее части. Очевидно, чем больше время воздействия веса (меньше линейная скорость выхода заготовки  $V$ ), чем больше сам вес (т.е. длина заготовки  $L$  и плотность расплава  $\rho$ ) и меньше вязкость расплава  $\mu$ , тем больше нежелательная продольная разнотолщинность заготовки  $z$ , которую в соответствии с рис. 4.27 количественно можно оценивать как

$$z = y_{\min} / Q. \quad (4.73)$$

Эта взаимосвязь между параметрами экструзии и разнотолщинностью заготовки, представленная в функциональном виде как

$$V = V(\rho, \mu, L, z), \quad (4.74)$$

может быть использована для определения минимально допустимого значения скорости экструзии  $[V]$ , при котором разнотолщинность заготовки достигает предельно возможного значения  $[z]$  (возможный диапазон значений  $z$ , как видно из формулы (4.73),  $[z] \leq z \leq 1$ ).

Значение фактической скорости экструзии  $V$ , очевидно, должно удовлетворять следующему условию:

$$V > [V], \text{ где } [V] = V|_{z=[z]}. \quad (4.75)$$

При гидравлическом расчете поэтому производительность  $Q$  не может задаваться произвольно, но должна выбираться в соответствии с условием (4.75), ограничивающим ее минимальное значение:  $Q_{\min} = [V]s$ , где  $s$  — площадь поперечного сечения формирующего канала на выходе из него.

Вывод конкретного вида функции (4.74) приведен ниже.

Реологическое уравнение расплава термопласта при одноосном растяжении имеет следующий вид:

$$\sigma_{xx} = \mu_p \dot{\epsilon}_{xx}, \quad (4.76)$$

где  $\sigma_{xx}$  — нормальное напряжение, действующее в направлении  $x$  (см. рис. 4.27) в поперечном сечении заготовки с координатой  $x$ ;  $\dot{\epsilon}_{xx}$  — скорость относительной деформации растяжения  $\epsilon_{xx}$  в направлении  $x$  в окрестности этого же сечения:

$$\dot{\epsilon}_{xx} = d\epsilon_{xx}^* / dt. \quad (4.77)$$

Параметр  $\mu_p$  — это вязкость расплава при растяжении. Величина  $\mu_p$  имеет однозначную связь с величиной вязкости  $\mu$  при сдвиговом деформировании (подобно известной взаимосвязи между модулями упругости при растяжении  $E$  и сдвиге  $G$ ). Опытным установлено, что в ньютоновской области кривой течения (т.е. при малых скоростях деформирования, где  $\mu$  практически не зависит от этих скоростей, см. рис. 4.6) соотношение между  $\mu_p$  и  $\mu_n$  таково:

$$\mu_p = 3\mu_n, \quad (4.78)$$

где  $\mu_n$  — наибольшая, ньютоновская вязкость расплава при сдвиге. Именно такие, малые скорости деформирования и имеют место чаще всего при вытяжке заготовки под действием собственного веса.

Из условия несжимаемости расплава при вытяжке относительная объемная деформация его  $\epsilon_v$  равна нулю:

$$\epsilon_v = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{\varphi\varphi} = 0, \quad (4.79)$$

где  $\epsilon_{yy}$  и  $\epsilon_{\varphi\varphi}$  — относительные деформации в радиальном  $y$  и окружном  $\varphi$  направлениях соответственно (см. рис. 4.27). В направлениях  $\varphi$  и  $y$  нормальные напряжения отсутствуют; отсюда видно, что

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_{\varphi\varphi}. \quad (4.80)$$

Вводя (4.80) в (4.79), получаем:

$$\epsilon_{xx} = -2\epsilon_{yy}, \quad (4.81)$$

причем это соотношение справедливо также и для дифференциально малых приращений  $d\epsilon_{xx}$  и  $d\epsilon_{yy}$  и, следовательно, для скоростей деформаций:

$$d\epsilon_{xx} = -2d\epsilon_{yy}; \quad d\epsilon_{xx}/dt = -2d\epsilon_{yy}^*/dt. \quad (4.82)$$

Вводя в (4.76) выражение для  $\dot{\epsilon}_{xx}$ , которое определено формулами (4.77) и (4.82), а также соотношение (4.78), получаем:

$$\sigma_{xx} = -6\mu_n d\epsilon_{yy}/dt. \quad (4.83)$$

Далее, в соответствии с мерой деформации растяжения — сжатия по Генки, относительная деформация  $d\epsilon_{yy}$  за некоторый отрезок времени  $dt$  равна отношению соответствующей абсолютной деформации  $dy$  (т.е. уменьшения толщины стенки в некотором сечении заготовки с координатой  $x$ ) к текущему значению размера элемента в направлении его деформации  $y$  (т.е. к текущему значению толщины заготовки  $y$  при координате  $x$ ), так что

$$d\epsilon_{yy}/dt = (dy/y)(1/dt) = (1/y)(dy/dt). \quad (4.84)$$

Величина растягивающего напряжения  $\sigma_{xx}$ , действующего в сечении с координатой  $x$ , равна силе веса части заготовки ниже этого материального сечения  $G_{L-x}$ , деленной на площадь сечения, которая для элементарной, мысленно выделенной из заготовки полоски с единичным размером в направлении  $\varphi$  равна  $(1 \cdot y)$ :

$$\sigma_{xx} = G_{L-x} / y. \quad (4.85)$$

Вводя (4.84) и (4.85) в (4.83)

$$dy/dt = -G_{L-x} / 6\mu_n, \quad (4.86)$$

получаем выражение для скорости уменьшения толщины материального сечения, на которое действует вес заготовки  $G_{L-x}$ . Это выражение проинтегрируем при следующих граничных условиях:

$$y|_{t=0} = a; \quad y|_{t=t_x} = y_x. \quad (4.87)$$

Смысл их заключается в следующем (см. рис. 4.27). В момент выхода данного материального сечения из формующего канала (т.е. при времени действия на него силы веса  $t$ , равном нулю) толщина сечения равна высоте формующего зазора  $a$ ; к моменту  $t_x$  достижения этим сечением положения с координатой  $x$  толщина его становится равной  $y_x$ . Попутно отмечаем, что символом  $t_x$  здесь мы обозначаем время действия на какое-либо сечение силы веса части заготовки ниже его, т.е., по существу, отрезок времени от момента выхода этого сечения из головки до текущего момента. В текущий момент каждое сечение характеризуется своей толщиной  $y_x$  и своим временем  $t_x$  (например, для сечения с координатой  $x = L$  это время  $t_L$  максимально и равно общему времени экструзии заготовки).

В соответствии с (4.87) и (4.86) запишем:

$$\int_a^{y_x} dy = -1/6\mu_n \int_0^{t_x} G_{L-x} dt. \quad (4.88)$$

Отмечаем, что сила веса  $G_{L-x}$ , действующего на данное материальное сечение (т.е. вес заготовки ниже его), неизменна в процессе выдачи заготовки, т.е. не зависит от  $t$ . В соответствии с этим выражение (4.88) принимает следующий вид:

$$y_x = a - G_{L-x} t_x / 6\mu_n. \quad (4.89)$$

Оно, по существу, описывает изменение толщины заготовки  $y_x$  по высоте ее  $x$ , так как каждому значению  $x$  в данный момент времени однозначно соответствует свое значение  $t_x$ . Целью данного рассмотрения является определение зависимости  $z$  от параметров процесса, но так как  $z$  по определению (4.73) связано с  $u_{\text{мип}}$ , то, используя (4.89), необходимо получить выражение для  $u_{\text{мип}}$ . Процедура получения  $u_{\text{мип}}$  известна: взять от (4.89) производную по  $t_x$ ; приравняв производную нулю, разрешить полученное выражение относительно  $t_x$ ; ввести это выражение для  $t_x$  в (4.89).

Выполняя эту процедуру, необходимо учитывать, что величина  $G_{L-x}$  также есть функция  $t_x$ . Действительно, очевидно, что

$$G_{L-x} = G_L - G_x, \quad (4.90)$$

где  $G_L$  — вес всей заготовки (точнее, как отмечено выше, ее полоски с единичной шириной по  $\varphi$ );  $G_x$  — вес части заготовки над сечением с координатой  $x$ .

Если учесть, что объемный расход расплава через участок канала с единичной шириной равен  $(V \cdot a \cdot 1)$ , то выражения для  $G_L$  и  $G_x$  можно представить следующим образом:

$$G_L = V a \rho g t_L; \quad G_x = V a \rho g t_x, \quad (4.91)$$

где  $\rho$  — плотность расплава;  $g$  — ускорение свободного падения.

Вводя (4.90) и (4.91) в (4.89), получаем:

$$y_x = a - (\rho g / 6\mu_n) a V (t_L - t_x) t_x. \quad (4.92)$$

Далее,

$$y'_x = -(\rho g / 6\mu_n) a V (t_L - 2t_x). \quad (4.93)$$

Приравнивая (4.93) нулю, получаем:

$$t_x = 0,5 t_L. \quad (4.94)$$

Наконец, вводя (4.94) в (4.92), получаем выражение для  $y_{\min}$ :

$$y_{\min} = a [1 - (\rho g / 6\mu_n) V (t_L / 2)^2]. \quad (4.95)$$

Итак, выражение (4.95) представляет, по существу, искомую зависимость, однако оно содержит параметр времени экструзии заготовки  $t_L$ , который удобнее выразить через известную величину длины заготовки  $L$ . Так как реально должны экструдироваться заготовки с весьма малой разнотолщиной (необходимое условие этого, собственно, здесь и ищется), то приближенно можно принять:

$$L \approx V t_L. \quad (4.96)$$

Разрешая (4.96) относительно  $t_L$  и вводя в (4.95), окончательно имеем:

$$z \equiv y_{\min} / a = 1 - \rho g L^2 / (24\mu_n V). \quad (4.97)$$

Приводя (4.97) к требуемому виду (4.74), с учетом определения  $[V]$  по (4.75), имеем:

$$[V] = [\rho g / (24\mu_n)] [L^2 / (1 - [z])]. \quad (4.98)$$

Если по каким-либо причинам реально возможная производительность экструдера  $Q$  оказывается меньше найденного из условия (4.75) значения  $Q_{\min}$  (например, нет в наличии экструдера с большой производительностью или изготавливаются крупные изделия, требующие большой длины заготовки), то необходимо применять головки с аккумулятором расплава. В этом случае расплав из экструдера непрерывно в течение всего цикла работы раздувного агрегата подается сначала в аккумулятор, откуда на операции выдачи заготовки специальным поршнем, имеющим гидро- или пневмопривод, выдавливается через формирующий зазор с требуемой скоростью.

Две конструктивных схемы таких головок показаны на рис. 4.24, з, д. Головка, показанная на рис. 4.24, з, работает следующим образом. При нижнем положении выдавливающего поршня 1 расплав из экструдера через отверстие 3 подается в аккумулирующую полость 2, поднимая поршень 1. При этом вытекание через формирующий зазор практически отсутствует вследствие гораздо меньшего сопротивления, оказываемого расплаву поршнем, чем формирующим каналом. При наборе в полости 2 требуемой дозы в цилиндр 4 под давлением подается масло или воздух, и происходит экструзия заготовки через формирующий зазор. Головка, изображенная на рис. 4.24, д, отличаясь наличием пиноли вместо дорнодержателя, работает точно так же, однако, несмотря на большую сложность, более надежна в эксплуатации, поскольку совершенно не имеет зон застоя типа зоны "а" в головке на рис. 4.24, з:

Гидравлический расчет головок с аккумулятором сводится к вычислению давления в полости 2, которое должен развивать поршень 1, выдавливая расплав из головки со скоростью экструзии  $V$ , не меньшей, чем определенная по (4.98) (т.е. принятой с некоторым

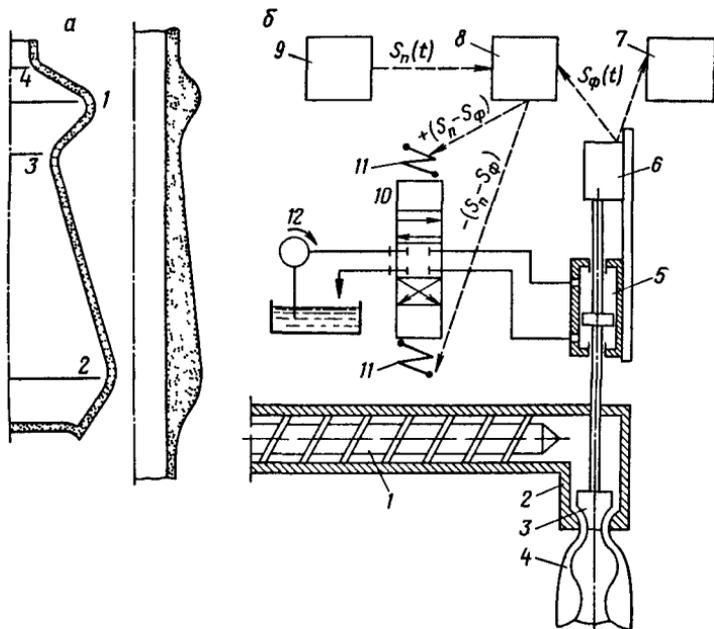


Рис. 4.28. К методу регулирования высоты формирующей щели:

а — заготовка с требуемой продольной разнотолщиной для получения равнотолщинного изделия; б — схема управления головкой с регулируемой высотой формирующей щели; 1 — экструдер; 2 — головка; 3 — подвижный дорн; 4 — заготовка с программированной толщиной стенки; 5 — гидродоцилиндр; 6 — датчик положения дорна; 7 — регистратор фактического перемещения дорна; 8 — блок сравнения и усиления дисбаланса; 9 — задающий программу блок; 10 — гидроклапан; 11 — электромагнитный привод гидроклапана; 12 — гидронасос

запасом по отношению к  $[V]$ ). Порядок его принципиально аналогичен изложенному в разд. 4.4, однако процедура более проста, так как расход  $Q$  при принятом значении  $V$  оказывается величиной известной. Вычисленное таким образом давление является исходным параметром для расчета размеров силового цилиндра 4 (см. рис. 4.24, г, д) и давления рабочей жидкости в нем.

Обеспечение достаточно равнотолщинной по высоте заготовки не определяет еще однородности толщины стенки будущего изделия. Действительно, при раздуве изделия, конфигурация которого показана на рис. 4.28, а, из равнотолщинной заготовки участки ее в зоне мест 1 и 2 изделия будут подвергаться гораздо большему утонению, чем в зоне мест 3, 4, что определить разную толщину стенки изделия в этих местах. Для получения равнотолщинного изделия заготовка должна, очевидно, иметь изменения толщины по высоте, показанные на рисунке. Получение такой заготовки возможно, если высота щели формирующего канала на выходе имеет возможность изменяться по заранее заданной программе. Конструктивно изменение высоты формирующего канала на выходе возможно, если он не цилиндрический, а коничес-

кий, как это показано на рис. 4.26, б. При осевом перемещении дорна (подвижного относительно пиноли) относительно мундштука изменяется расстояние между их коническими поверхностями, образующими формующий канал. Суживающаяся выходная часть (слева) дорна и мундштука называется тьюльпанообразным формующим каналом, расширяющаяся (справа) – тарельчатый. Головки на рис. 4.24, е (правая половина) и рис. 4.24, д имеют перемещающиеся относительно мундштука дорны. Перемещение везде осуществляется посредством штанги, связанной с дорном и пропущенной через пиноль наружу.

На рис. 4.28, б показана схема автоматического регулирования высоты щели в процессе экструзии заготовки. Подвижный дорн 3 имеет гидроцилиндр 5 привода, управляемый реверсивным гидроклапаном 10, который имеет электромагнитный привод 11. Дорн имеет также датчик положения его относительно мундштука, посылающий непрерывный сигнал в блок сравнения 8 процессора. В блок 9 заранее закладывается программа в виде функции  $S = S(t)$ , где  $S$  – положение дорна,  $t$  – время. В момент начала экструзии эта программа из блока 9 в виде электрического сигнала начинает выдаваться в блок сравнения 8, который сравнивает сигнал программы  $S_n(t)$  с сигналом  $S_\phi(t)$  от датчика 6 и в случае расхождения их по величине дает команду на гидроклапан и, следовательно, на перемещение дорна до восстановления равенства между двумя указанными сигналами. Фактическое перемещение дорна фиксируется в блоке памяти 7 с целью возможности корректировки программы, если распределение толщины по высоте получаемого изделия не отвечает заданному. Схемы подобного типа сейчас широко используются в раздувных агрегатах.

При использовании систем регулирования толщины заготовки, подобных описанной здесь, вопрос об определении режимов экструзии с минимальной (или очень малой) степенью вытяжки заготовки под действием собственного веса оказывается, казалось бы, несущественным. Действительно, даже значительная неоднородная по высоте заготовки вытяжка (и утонение) ее может быть учтена такой коррекцией закладываемой в блок 9 программы  $S_n(t)$ , при которой будет получена заготовка с требуемой разнотолщинностью. Однако в этом случае величина коррекции оказывается зависимой формально от каждого из параметров, входящих в формулу (4.98). Реально значения их воспроизводятся от цикла к циклу работы агрегата с достаточно высокой точностью за исключением одного: вязкости  $\mu_n$ . Она может менять значение от цикла к циклу вследствие колебания температуры расплава, подаваемого экструдером в головку. Возникает необходимость текущего измерения температуры расплава в каждом цикле и, в случае отклонения от заданного значения, введения изменений в указанную коррекцию по специально разработанному алгоритму, который к тому же должен учитывать различную у разных полимеров зависимость вязкости от температуры. Такое усложнение систем управления оказывается неоправданным, в связи с чем их эксплуатируют в режимах, удовлетворяющих условию (4.75).

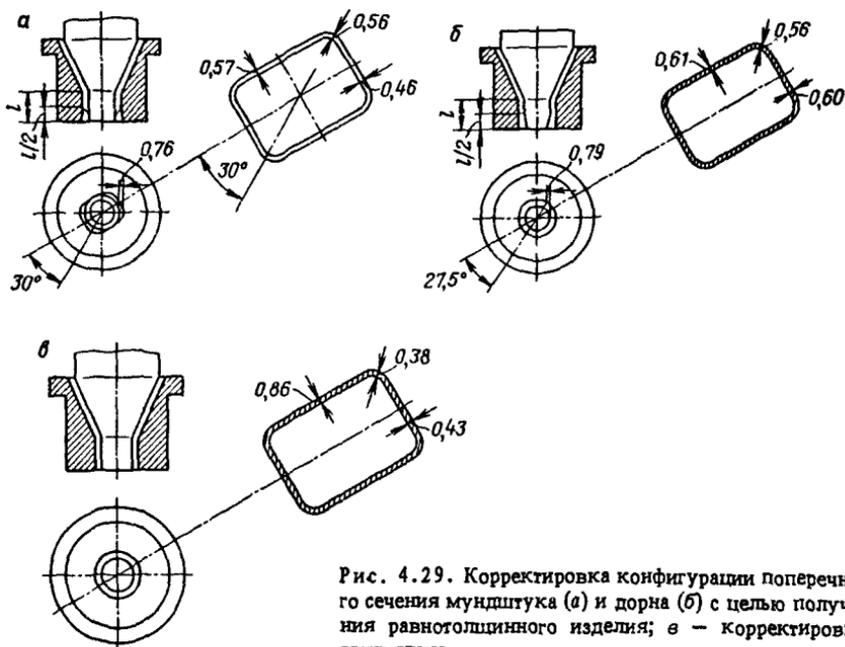


Рис. 4.29. Корректировка конфигурации поперечного сечения мундштука (а) и дорна (б) с целью получения равнотолщинного изделия; в — корректировка отсутствует

При раздуве изделий с некруглым (например, прямоугольным, как показано на рис. 4.29) поперечным сечением имеет место не только продольная, но и поперечная разнотолщинность (рис. 4.29, в). При этом наиболее утонченными являются углы изделия. Если получить заготовку, имеющую в этом месте более толстую стенку, то соответствующее изделие, очевидно, будет более равнотолщинным. Получение заготовки с заранее заданной поперечной разнотолщинностью возможно последовательной местной механической обработкой тела мундштука (рис. 4.29, а) или дорна (рис. 4.29, б). Оптимальная конфигурация поперечного сечения мундштука и дорна в этом случае может быть определена только экспериментально методом проб и ошибок. Корректировку конфигурации рекомендуется осуществлять на длине, не большей 0,5 от общей длины формирующей зоны.

#### 4.6.3. Головки для изготовления рукавной пленки

Головки этого типа формируют очень тонкостенный рукав большого диаметра. Диаметр кольцевого зазора этих головок равен 30–800 мм, а в некоторых крупных машинах превышает 1500 мм. Высота формирующего зазора на выходе – в пределах 0,35–1 мм. Пример конструкции головки для рукава среднего диаметра приведен на рис. 4.30. При столь малом зазоре и большом диаметре достижение желаемой однородности экструзии весьма затруднительно, поэтому подпорное

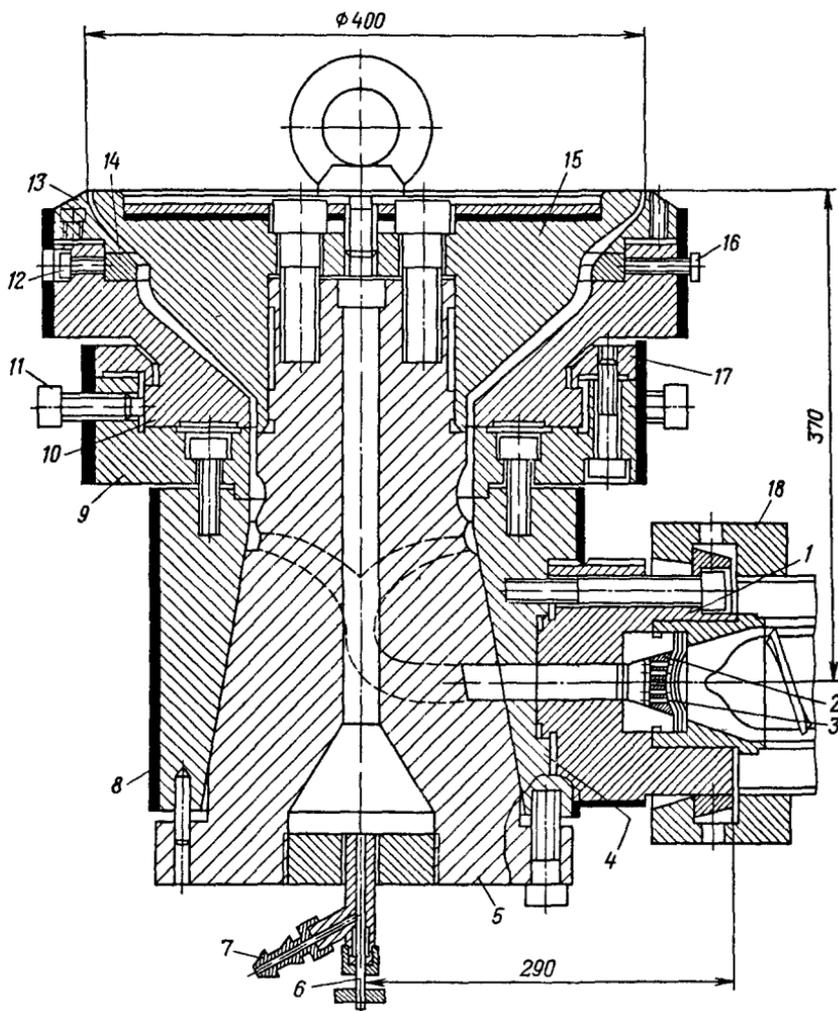


Рис. 4.30. Головка для производства рукавной пленки:

1 — переходник; 2 — решетка; 3 — сетки; 4 — корпус головки; 5 — дорнодержатель (пиноль); 6 — вентиль; 7 — воздушный штуцер; 8 — электрообогрев; 9 — обойма головки; 10 — корпус мундштука; 11 — установочные винты; 12, 16 — нажимные и отжимные винты; 13 — мундштук; 14 — подпорное кольцо; 15 — дорн; 17 — прижимное кольцо; 18 — байонетный затвор

кольцо 14 стремятся выполнить таким маложестким и снабдить его такими мощными винтами 16 и 12, чтобы последние могли по возможности не только перемещать кольцо, но и деформировать его, придавая желаемую конфигурацию. Конечно, возможность независимого регулирования высоты щели в различных точках по периметру канала очень ограничена по сравнению с плоскощелевыми головками, так как

упругий элемент – не планка, а кольцо, т.е. имеет замкнутый контур с жестко постоянной длиной, так что уменьшение высоты канала в одном месте неизбежно должно сопровождаться увеличением ее в каком-либо другом месте, что должен предвидеть аппаратчик при регулировке. Таким образом, при ограниченных возможностях регулировки сама по себе она достаточно сложна и требует хороших навыков оператора.

Конструктивное исполнение элементов для предварительного выравнивания потока в представленной конструкции (поток из переходника, разбиваясь на два потока, подается в два коллектора с переменной длиной следующего за ним подводящего канала) аналогично ранее рассмотренным в угловых головках (см., например, рис. 4.25, д). Для большей гарантии выравнивания потока вслед за участком подводящего канала переменной длины обычно выполняют одно или несколько местных увеличений поперечного сечения (по назначению эквивалентных дополнительным коллекторам), перераспределяющих поток расплава и выравнивающих давление по периметру поперечного сечения подводящего канала.

Особое внимание при конструировании таких головок должно быть обращено на надежность крепления дорна 15 к дорнодержателю (пиноли) 5 и последнего – корпусу головки, так как вследствие довольно большой площади конического расширения подводящего канала давление расплава в нем создает значительное распорное усилие, способное расчленивть соединение указанных деталей. Пиноль в месте системы каналов, выравнивающих давление (коллекторы вместе со следующими за ними участками переменной длины), должна иметь достаточную изгибную жесткость. Даже незначительный изгиб из-за очень малой окружной неоднородности поля давления в большом коническом подводящем канале может привести к существенным изменениям высоты формирующей щели на выходе.

Таким образом, наличие этого большого конического подводящего канала, во-первых, крайне нежелательно по двум отмеченным здесь причинам, во-вторых, казалось бы, неизбежно. Однако в последнее время созданы конструкции, в которых он исключен (см., например, рис. 4.31).

Отмеченная выше проблема регулировки с целью обеспечения равномерности пленки осложняется тем, что (так же, как и в аналогичном случае плоскощелевых головок) оператор как можно быстрее должен получить информацию о результате каждой своей единичной коррекции с тем, чтобы продолжить регулировку в нужном направлении. Современные конструкции головок оснащаются системами для непрерывного автоматического измерения распределения толщины пленки по периметру рукава и выдачи этой информации на дисплей.

Другое развиваемое в настоящее время направление обеспечения равномерности рукавной пленки – это полный отказ от регулирующих устройств и обеспечение практически полной выравниваемости

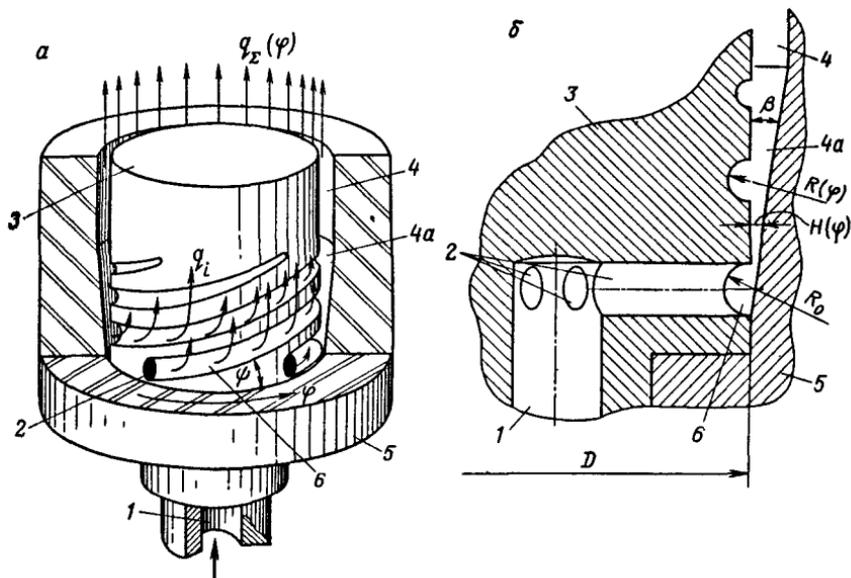


Рис. 4.31. Схема головки с винтовыми коллекторами:

*a* — общий вид головки; *b* — продольный разрез каналов головки в радиальном направлении; 1 — центральный канал; 2 — радиальные каналы; 3 — дорн; 4 — кольцевой канал; 4а — начальный участок кольцевого канала; 5 — корпус головки; 6 — коллектор

потока  $q$  по периметру формирующей щели за счет: выбора должных конфигурации и размеров подводящего и переходного каналов; очень точного их изготовления в соответствии с гидравлическим расчетом; повышения точности регулирования температуры головки и поддержания равенства ее во всех ключевых элементах конструкции.

Необходимость в развитии этой концепции появилась с освоением производства многослойных рукавных пленок: в головках для многослойных пленок независимая регулировка однородности толщины каждого слоя пока технически неосуществима. Реализация же этой концепции оказалась возможной: 1) при появлении типов каналов принципиально новой конфигурации; 2) при разработке точных методов их гидравлического расчета, реализуемых на ЭВМ.

На рис. 4.31 представлена конструктивная схема подобной головки для однослойной рукавной пленки. Расплав из экструдера подается в центральный канал головки 1, соединенный с несколькими расходящимися от него в радиальных направлениях цилиндрическими же каналами 2 (на виде рис. 4.31, *a* выходы из этих каналов затушеваны). Из каждого радиального канала расплав попадает в кольцевую щель 4, по периметру которой распределяется своим коллекторным каналом 6, выполненным в теле дорна 3 по винтовой линии. Длина коллекторов такова, что распределенные по периметру щели осевые потоки от

каждого из коллекторов взаимно перекрываются. Совмещаясь (суммируясь) на начальном участке щели  $4a$ , в конце его (т.е. собственно в щели  $4$ ) они образуют единый монолитный кольцевой поток.

Как видно, поверхность стыка отдельных потоков ориентирована не радиально, а тангенциально, т.е. не пронизывает насквозь всю толщину стенки выходящего из головки рукава, что является важным преимуществом данной конструкции. По этой причине данный тип канала начал применяться и в трубных головках большого диаметра.

Второе преимущество головки – развитая опора дорна  $3$  на корпусе  $5$  по большой поверхности с большим диаметром  $D$ . Это обеспечивает большую жесткость крепления дорна и, следовательно, соблюдение равенства высоты формирующего канала по всему его периметру с большой точностью.

Наконец, третье преимущество перед конструкцией, показанной на рис. 4.20, – отсутствие развитого конического подводящего канала. Следовательно, в сотни раз меньше распределенное осевое усилие, действующее на дорн, и практически отсутствуют изгибающие моменты на нем из-за возможной неоднородности распределения этого усилия.

Правильный выбор размеров каналов в данной конструкции может обеспечить значения  $U \approx 0,97 \div 0,98$ . Точный гидравлический расчет их, требующий использования ЭВМ, достаточно сложен и здесь не приводится (в принципе, по подходу он подобен приведенному выше для плоскощелевых коллекторных головок). Здесь рассмотрены только некоторые особенности его на качественном уровне.

Вследствие неизбежного перепада давления по длине коллектора (см., например, рис. 4.13) выходящий из него распределенный осевой поток  $q_1$  (см. рис. 4.31) несдинаков по длине коллектора и характеризуется эпюрой распределения по длине (т.е. по направлению  $\varphi$ ), показанной на рис. 4.32, а. Полученное при наложении (суммировании) потоков  $q$ ,

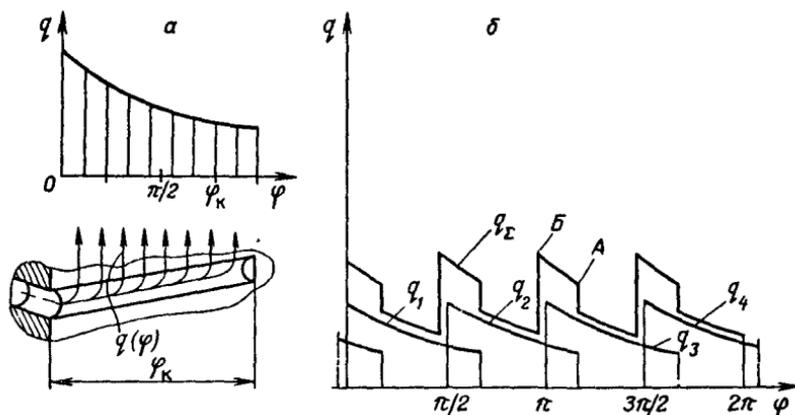


Рис. 4.32. Эпюры потоков в каналах головки на рис. 4.31 при  $\beta = 0, R = R_0 = \text{const}$  и  $H = H_0 = \text{const}$ . Пояснения в тексте

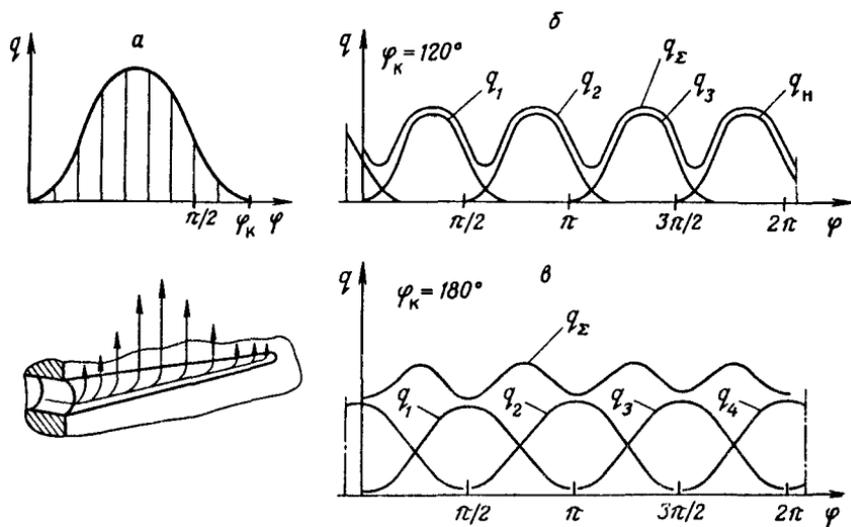


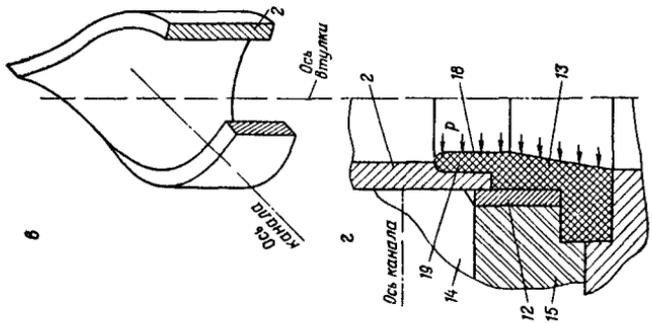
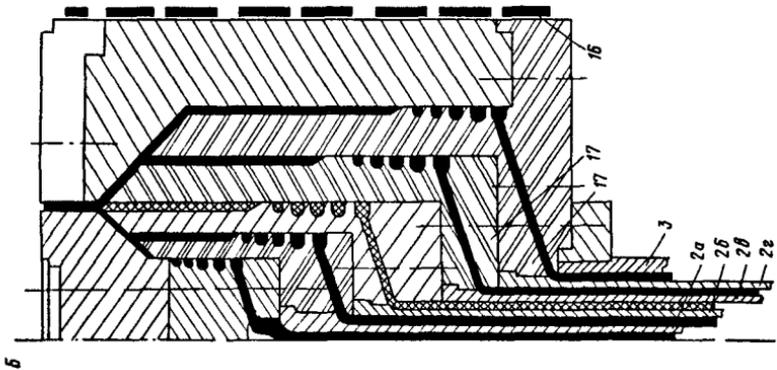
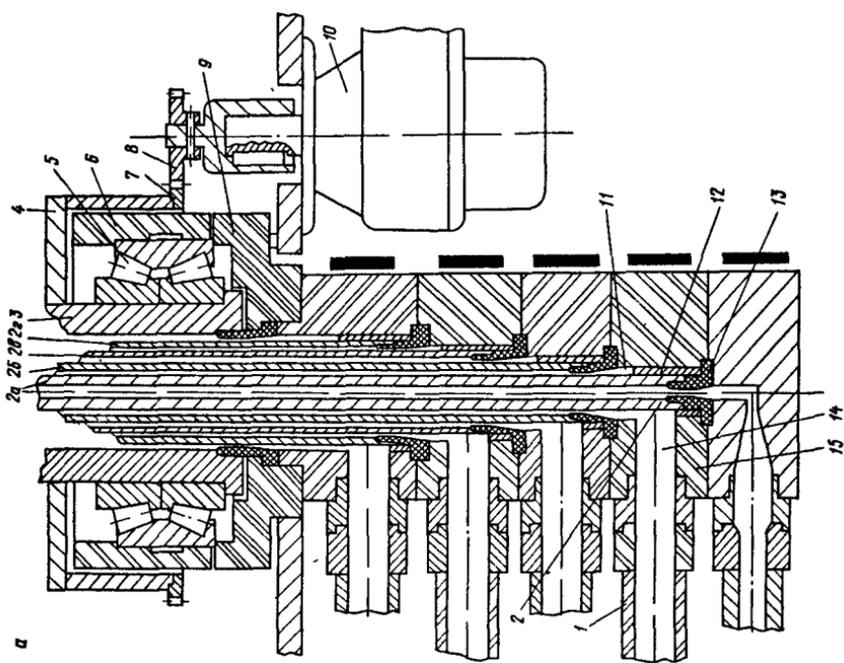
Рис. 4.33. Эпюры потоков в каналах головки на рис. 4.31. Пояснения в тексте

из различных коллекторов распределение суммарного удельного потока  $q_{\Sigma}$  по периметру щели показано на графике рис. 4.32, б (здесь показан вариант четырех радиальных каналов с коллекторами, длина которых, измеренная в направлении  $\varphi$ , равна  $\varphi_k = 120^\circ$ ). Как видно, результирующий поток  $q_{\Sigma}$  неоднороден по  $\varphi$ ; более того, имеются скачкообразные изменения его. Скачки типа А вызваны тем, что поток  $q_i$  (например,  $q_2$ ) в конце коллектора не равен нулю; скачки же типа Б — тем, что  $q_i$  (например,  $q_3$ ) не равен нулю в начале коллектора. Требуемого равенства  $q_i$  нулю в концах коллектора добиваются следующим образом.

Во-первых, радиус коллектора  $R$  (см. рис. 4.31) выполняют монотонно уменьшающимся практически до нуля в направлении  $\varphi$ , что обеспечивает  $q_i = 0$  в конце коллектора. Во-вторых, кольцевой щелевой канал на начальном участке 4а выполняют с монотонно возрастающей высотой  $H$  за счет того (см. рис. 4.31, б), что наружная стенка канала — коническая с углом  $\beta$ . Так как коллектор выполнен по винтовой линии с углом подъема  $\psi$ , то высота щелевого канала  $H$  в месте входа в него расплава из коллектора монотонно возрастает в направлении  $\varphi$ , причем, что важно, возрастает практически от нулевого значения при  $\varphi = 0$ . В соответствии с этим и расход  $q_i$  при  $\varphi = 0$  (т.е. в начале коллектора) равен нулю, возрастая затем с ростом  $\varphi$  по причине возрастающего вида функции  $H(\varphi)$  на выходе из коллектора.

В результате этих приемов функция  $q_i(\varphi)$  принимает вид, показанный на рис. 4.33, а, а распределение  $q_{\Sigma}(\varphi)$  — на рис. 4.33, б. Как видно из рисунка, распределение  $q_{\Sigma}$ , хотя и не имеет скачков, однако существенно неоднородно. Однородность сильно зависит от числа каналов  $i$  и степени «перекрытия» потоков, т.е. от длины коллекторов  $\varphi_k$ ; так, при увеличении  $\varphi_k$  от  $120^\circ$  до  $180^\circ$  (сравнить рис. 4.33, б и 4.33, в) неоднородность  $q_{\Sigma}$  уменьшается более чем в 3 раза.

Гидравлический расчет каналов этой головки сводится к определению функции вида  $q_{\Sigma}(\varphi)$ , которая включает в себя по крайней мере шесть параметров и функций, характеризующих геометрию каналов:  $R(\varphi)$ ,  $\varphi_k$ ,  $\psi$ ,  $\beta$ ,  $i$ ,  $D$ . Затем на основе этой функции должна решаться задача многопараметрической оптимизации по критерию  $(q_{\Sigma}^{\min}/q_{\Sigma}^{\max}) \rightarrow \max$ . Возможно это, очевидно, только с помощью ЭВМ. Выполненные решения показывают, что достижение  $U = 0,97 + 0,98$  оказывается возможным уже при  $i = 5$  и  $270^\circ > \varphi_k > 180^\circ$ .



6

Ось  
качалки

Ось  
штульца

Ось  
качалки

2

2

18

13

P

12

15

14

19

a

2a  
26  
28  
23

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

1

2

15

14

b

16

17

3

2a

26

28

22

Как отмечалось, наряду с однослойными получают все большее распространение многослойные пленки, позволяющие сочетать в одном изделии такие свойства, которые в комплексе не присущи ни одному из материалов: например, большую прочность с практически полной (или избирательной) газонепроницаемостью, допустимость контакта с пищевыми продуктами со светонепроницаемостью и др. Кольцевая головка для рукавной пленки в этом случае работает с несколькими экструдерами, подающими в нее расплавы различных термопластов (в настоящее время — до пяти).

Конструкции головок такого типа исключительно сложны, непрерывно и интенсивно совершенствуются, однако во многом еще неудовлетворительны. При их конструировании возникает много проблем. Ключевая проблема — сложность или даже практическая невозможность локального регулирования толщины каждого слоя по периметру кольцевой щели. Попытки решить ее приводят к возникновению новых сложностей в конструировании.

Прежде всего, в этих головках используют систему каналов, показанную на рис. 4.31. Из приведенного выше анализа ее (см. текст, набранный мелким шрифтом) ясно, что однородность экструзии интенсивно возрастает с увеличением длины коллектора  $\varphi_k$ , т.е. с ростом степени перекрытия потоков при их наложении. И если при  $\varphi_k \approx 250^\circ$  и числе каналов  $i = 5$  (пример — на рис. 4.31) достигается полное перекрытие трех потоков, чему соответствует значение параметра однородности экструзии, равное 0,97 — 0,98, то в многослойных головках принимают значения  $\varphi_k$ , соответствующие пятикратному перекрытию потоков (см. рис. 4.34, б). Тем не менее полностью избавиться от разнотолщинности не удастся; она частично остается, однако уже не по причине несовершенства принципа коллекторной системы, а вследствие какой-либо (даже исключительно малой) неконцентричности поверхностей, образующих кольцевые каналы.

Отмеченная остаточная разнотолщинность приводит к следующему нежелательному явлению. Утолщение, расположенное вдоль по какой-либо образующей рукава, при сложении и последующей намотке рукава накладывается само на себя с каждым новым оборотом вращающегося рулона. В этом месте рулона возникает локальное прогрессирующее увеличение его диаметра. Окружная скорость поверхности рулона в этом месте становится большей, чем в других местах. Здесь возникает локальная необратимая вытяжка рукава, в

Рис. 4.34. Схема головки для экструзии пятислойной рукавной пленки:

а — узел подвода расплава от экструдеров (материал в каналах условно не показан); б — узел коллекторов и формующего канала (материал в каналах показан черным цветом и перекрестной штриховкой); в — кольцевой элемент; г — место уплотнения; 1 — переходник; 2а, б, в, г — втулки; 3 — основание узла коллектора; 4 — стакан; 5 — подшипник; 6 — обойма; 7 — венец зубчатого колеса; 8 — шестерня; 9 — фланец узла подвода расплава; 10 — электродвигатель; 11 — кольцевые зазоры между втулками 2; 12 — кольцевой элемент; 13 — уплотнитель-подшипник; 14 — радиальный канал приемного блока; 15; 16 — электрообогрев; 17 — корпусы коллекторов; 18 — внутренняя поверхность уплотнителя; 19 — уплотняющий ус уплотнителя 13

результате чего пленка теряет плоскостность: при последующей ее размотке на ней обнаруживаются в этом месте продольные волны гофры.

Это явление устраняется, если продольное утолщение пленки равномерно распределяется по всей ширине рулона, что возможно, когда утолщение ориентировано не по образующей рукава, а по винтовой линии на его поверхности. При производстве однослойных пленок повышенного качества этого добиваются, выполняя экструдер вместе с головкой вращающимся относительно приемно-намоточного устройства. При экструзии многослойных пленок вращать систему экструдеров нерационально; в этом случае вращающимся выполняют только узел коллекторов и формующего канала головки, как, например, это показано на рис. 4.34.

#### 4.6.4. Кабельные головки

Кабельные головки, подобно трубным и пленочным, относятся к категории кольцевых, однако внутренняя формующего канала (рис. 4.35) образуется не дорном, а изолируемым проводом 4, который протягивается через головку со скоростью, достигающей до 2000 м/мин. На таких головках могут изолироваться как отдельные жилы, так и кабели, состоящие из множества отдельных проводов общим наружным диаметром до 150 мм. Наконечник 7, муфта 3 и гайка 12 являются сменными; на одной головке можно производить изоляцию проводов различного диаметра, однако в пределах определенного диапазона. Во избежание интенсивного износа вследствие трения изолируемого провода направляющий элемент гайки 12 и наконечник 7 выполняются из закаленной стали или твердых сплавов. Методы выравнивания потока подобны рассмотренным.

Гидравлический расчет и выбор размеров формующего канала кабельных головок имеют одну особенность, обусловленную протяжкой провода через формующий канал. На рис. 4.36 показана схема канала головки (рис. 4.36, а) и, более детально, часть его в окрестности формующего канала (рис. 4.36, б). Если, например, давление в канале головки  $p$  (в том числе и  $p_{\phi}$  на входе в формующий канал 1) будет равно нулю, то расход расплава через формующий канал, несмотря на это, не будет равен нулю, так как протягиваемый через канал со скоростью  $V$  провод будет уносить из канала прилипающий к нему расплав. В канале установится распределение скоростей расплава, представленное эпюрой  $I$ . Эту составляющую расхода назовем вынужденной. Величину ее  $Q_{\text{в}}$  можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{в}} = 0,5V(R - r)2\pi R_{\text{ср}}; \quad R_{\text{ср}} = (R + r)/2. \quad (4.99)$$

Если же скорость протяжки провода  $V$  будет равна нулю, а на входе в формующий канал будет некоторое давление  $p_{\phi}$ , то будет иметь место расход через канал  $Q_p$ . Эпюра скоростей расплава, соответствующая этой составляющей расхода, имеет вид II. Выражение для  $Q_p$ , т.е. для расхода через кольцевой цилиндрический канал, известно. В

Рис. 4.35. Конструкция кабельной головки:

1 — вход в головку; 2 — корпус головки; 3 — мундштук; 4 — изолируемый провод (кабель); 5 — формующий канал; 6 — местное расширение подводщего канала; 7 — наконечник; 8 — наклонный коллектор; 9 — пиноль; 10 — направляющая втулка пинюли; 11 — комплект отжимных и стягивающих болтов, регулирующих положение пинюли по высоте; 12 — гайка, направляющая провод в пинюль

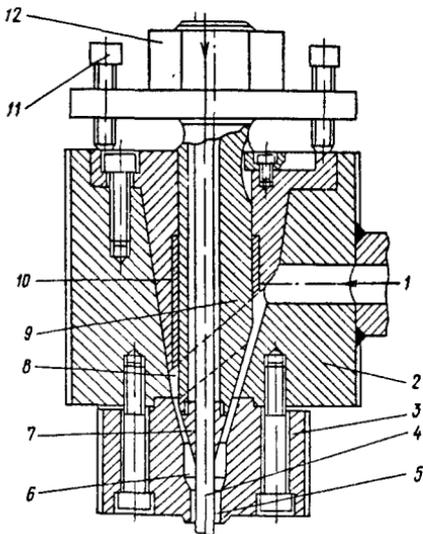
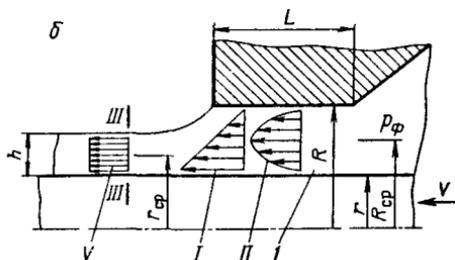
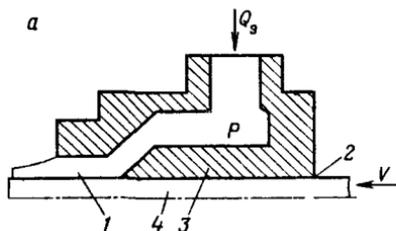


Рис. 4.36. Схема канала кабельной головки:

а — общий разрез канала; б — разрез формующего канала; 1 — формующий канал; 2 — зазор между дорном (пинюлью) 3 и проводом 4



упрощенном виде его можно получить из уравнения для плоской щели (4.33):

$$Q_p = k W H^{m+2} (p_\Phi / L)^n, \text{ где } H = (R - r); W = 2\pi R_{cp}. \quad (4.100)$$

Полный расход в канале  $Q$  равен сумме этих составляющих:

$$Q = Q_b + Q_p. \quad (4.101)$$

Очевидно, что расход в канале  $Q$  равен расходу  $Q_b$  расплава, подаваемого из экструдера в головку, причем величина  $Q_b$ , как правило, принимается максимально возможной для данного экструдера по условию максимальной производительности кабельного агрегата в целом. Обратив теперь внимание на уравнение (4.101), в котором левая часть  $Q = Q_b = \text{const}$ , видим, что первое слагаемое (4.99) зависит от скорости протяжки  $V$ , а второе (4.100) не зависит от нее. Это значит, что при увеличении  $V$  и, следовательно, первого слагаемого  $Q_b$  второе слагаемое  $Q_p$  неизбежно должно уменьшаться, причем уменьшаться оно может только по причине уменьшения  $p_\Phi$ . Наконец, с ростом  $V$

значение  $p_{\phi}$  может стать равным нулю или даже отрицательным (т.е. в канале возникает разрежение). Это недопустимо, так как воздух, проникающий при этом через зазор 2 между дорном 3 и проводом 4 в канал, ухудшает сцепление провода и изоляции.

Таким образом, очевидно, что на величину  $V$  должно быть наложено ограничение  $V < VI|_{p_{\phi}=0}$ . Однако величина  $V$  не может приниматься произвольно даже при учете этого ограничения. Она однозначно связана с производительностью экструдера  $Q_3$  условием получения изоляции требуемой толщины  $h$ . Эту связь между  $Q_3$  и  $V$  получили, записав уравнение расхода по полимеру для сечения III-III (см. рис. 4.36, б):

$$Q_{III-III} = Q_3 = Q = Vh2\pi r_{cp}; \quad r_{cp} \approx r + h/2, \quad (4.102)$$

где  $h$  и  $r$  — толщина изоляции и радиус провода — параметры, не варьируемые для данного изделия. При заданной величине  $Q_3$  параметр  $V$  также оказывается неварьируемым. Для удовлетворения условия

$$p_{\phi} > 0 \quad (4.103)$$

остаются возможными лишь вариации параметров геометрии канала  $R$  и  $L$ . Для того, чтобы получить аналитическое выражение для их определения с учетом (4.103), введем в левую часть уравнения (4.101) формулу (4.102), а в правую часть — формулы (4.99) и (4.100):

$$\underbrace{Vh(2r+h)}_1 = \underbrace{0,5V(R^2-r^2)}_2 + \underbrace{k(R+r)(R-r)^{n+2}(p_{\phi}/L)^n}_3 \quad (4.104)$$

Прежде всего обнаруживаем, что вариации параметра  $L$  оказываются неэффективными для обеспечения условия (4.103). Так, если второе слагаемое оказывается большим, чем первое, то третье должно быть отрицательным, причем оно может быть отрицательным только за счет отрицательного значения  $p_{\phi}$ , так как другие сомножители отрицательными быть не могут физически. Таким образом, единственный путь удовлетворения условия (4.103) — это вариация радиуса мундштука  $R$ . Действительно, обнаруживаем, что с уменьшением  $R$  уменьшается второе слагаемое, уменьшаются также первый и второй сомножители, следовательно, для соблюдения равенства (4.104) величина  $p_{\phi}$  неизбежно при этом должна возрастать.

Таким образом, воспользовавшись уравнением (4.104), можно определить такое значение радиуса мундштука  $R$ , при котором обеспечивается гарантированное отсутствие разрежения на входе в формирующий канал.

По уравнению (4.104) можно определить такое максимально допустимое значение  $R_*$ , при котором  $p_{\phi}$  становится равным нулю. Приравнявая третье слагаемое в (4.104) нулю и разрешая его относительно  $R$ , получаем:

$$R_* = [r^2 + 2h(2r+h)]^{1/2}. \quad (4.105)$$

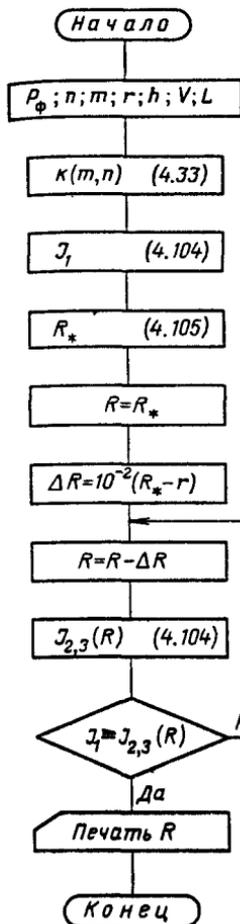
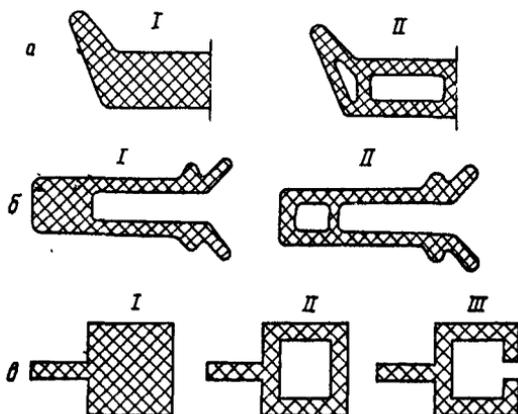


Рис. 4.37. Блок-схема алгоритма расчета радиуса мундштука кабельной головки. Пояснения в тексте

Рис. 4.38. Примеры технологической проработки конфигурации сечения экструзионных профилей: I — неудовлетворительно; II — приемлемо; III — удовлетворительно



Однако реально принимать радиус мундштука равным  $R_*$  нельзя, так как малейшее колебание какого-либо параметра режима (например, производительности экструдера  $Q_3$ , радиуса провода  $r$ ) может в этом случае приводить к периодическому возникновению разреза в канале. Во избежание этого на входе в канал должно гарантированно поддерживаться давление 4–6 МПа. Введя это значение в (4.104), можно вычислить соответствующее значение  $R$ . Так как (4.104) неразрешимо относительно  $R$  в явном виде, то возможно использование ЭВМ, например в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 4.37. Обозначения в этом алгоритме таковы:  $J_1$  — первое слагаемое (4.104);  $J_{2,3}(R)$  — сумма второго и третьего слагаемых.

Несмотря на правильность вычисленного значения  $R$  и точность исполнения его в металле иногда возникает необходимость дополнительной гидравлической регулировки головки с тем, чтобы соблюсти значение  $p_{\phi}$  в указанном диапазоне. Необходимость в этом может возникать, например, при переходе на другую марку материала с существенно отличными реологическими константами  $m$  и  $n$ . Предлагается самостоятельно продумать и предложить принципиальную конструкцию устройства для осуществления этой регулировки.

Предлагается также дать ответ на вопрос: может ли служить для такой регулировки возможность осевого смещения пиноли 9 на рис. 4.35 посредством нажимных и отжимных винтов 12. Если ответ на этот вопрос будет положительным, то следует объяснить, по какой конкретно причине осевое смещение пиноли вызывает изменение давления на входе в формующий канал.

#### 4.7. Головки для изделий сложного профиля

Головки данного типа отличаются от рассмотренных тем, что конфигурация поперечных сечений экструдруемых профилей бесконечно разнообразна. Поэтому, если в предыдущих случаях при конструировании новой головки можно воспользоваться уже имеющимися конструктивными решениями, незначительно трансформировав их, то каждая новая головка для фасонного профиля представляет собой в известном смысле уникальную конструкцию. Тем не менее можно определить ряд общих положений, указывающих на пути правильного конструктивного оформления этих головок.

Этапом, предшествующим непосредственно конструированию головки, является анализ конфигурации сечения изделия с точки зрения его технологичности, т.е. соответствия тем требованиям, которые, определяясь конкретными особенностями технологии его формования, обеспечивают требуемое качество изделия, максимальность производительности экструзионного агрегата, удобство обслуживания формующего инструмента (головки и калибрующие устройства) и т.д. Так же, как и при проектировании прессовых и литевых форм, этот этап, как правило, выполняет конструктор головки и калибрующего устройства, согласуя изменения, вносимые в конфигурацию сечения, с заказчиком изделия.

Основное технологическое требование к изделию – минимально возможная толщина его стенки: производительность агрегатов при производстве толстостенных изделий очень низка из-за малой скорости охлаждения; велика материалоемкость этих изделий, на их поверхности неизбежно возникновение усадочных вмятин и утяжек. Конфигурацию сечения этих изделий необходимо изменять, делая его полым (рис. 4.38, а).

Второе технологическое требование к изделию – это равнотолщинность его. Для равнотолщинных профилей намного проще выбор геометрии каналов, обеспечивающей равенство скоростей экструзии в различных точках выходного сечения формующего канала. Скорость охлаждения профиля в калибрующем устройстве и охлаждающей ванне также одинакова в различных местах сечения, вследствие чего в материале профиля практически отсутствуют внутренние напряжения, изделие поэтому не коробится. Примеры предпочтительного изменения конфигурации сечения в соответствии с этим требованием показаны на рис. 4.38, б, в.

Следует избегать профилей с замкнутыми полостями, если они не требуются по условиям эксплуатации изделия (см. рис. 4.38, а), так как крепление дорна, формующего замкнутую полость, более сложно: 276

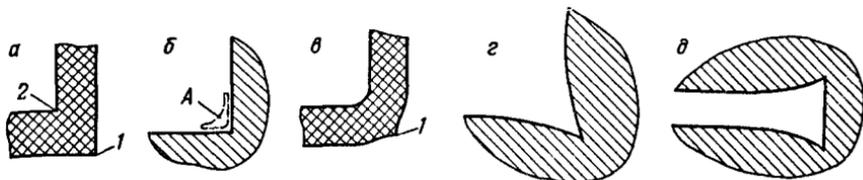


Рис. 4.39. К выполнению острых углов каналов. Пояснения в тексте

требуется дорнодержатель с ребрами, а также сообщение этой полости с атмосферой через систему отверстий в дорне, ребрах дорнодержателя и корпусе головки.

Профили с замкнутыми полостями и внутренними перегородками и ребрами охлаждаются только по наружной поверхности, в связи с чем охлаждение наружных стенок гораздо более интенсивно, чем перегородок. Для обеспечения равенства скоростей их охлаждения (необходимость этого уже отмечалась) толщина перегородок должна выбираться на 20–30% меньшей, чем стенок.

Изделие по возможности не должно иметь острых углов, причем это в гораздо большей степени относится к наружным (1), чем внутренним (2) углам (рис. 4.39, а). Дело в том, что в некоторой области А (рис. 4.39, б) соответствующего внутреннего угла мундштука возникает занижение скорости экструзии по сравнению с другими местами канала, удаленными от внутренних углов, вследствие чего на изделии возникает искажение конфигурации угла 1, показанное на рис. 4.39, в. Практикой установлены минимально допустимые значения радиусов скругления внутренних и наружных углов изделия, зависящие как от толщины стенки профиля, так и от типа материала; ориентировочные их значения – 0,2 – 0,3 и 0,3 – 0,4 мм соответственно. Если же возникает необходимость в острых углах на изделии по условиям его эксплуатации, то приходится прибегать к корректировке геометрии формирующего канала в выходной его части по типу показанной на рис. 4.39, г, д, что, конечно, усложняет изготовление мундштука.

Прежде чем перейти к рассмотрению особенностей и правил конструктивного оформления непосредственно самих головок, разберем пример одной из конструкций, приведенный на рис. 4.39, что позволит более конкретно уяснить эти особенности. Здесь показана конструкция головки для изготовления полого профиля со сложным контуром поперечного сечения. Фигурный дорн 1 с поперечным сечением на выходе, соответствующим конфигурации изделия, и круглым сечением у дорнодержателя 2 крепится к последнему обычным способом. Мундштук 3 имеет возможность смещаться относительно дорна в радиальных направлениях винтами 4; вращение мундштука относительно дорна осуществляется винтами 5. Эти возможные перемещения необходимы для точного согласования положений мундштука и дорна с целью выравнивания (корректировочного) скоростей расплава в различных точках поперечного сечения формирующего канала на выходе из него.

Как отмечалось, дорн и дорнодержатель имеют отверстия 6 и 8 соответственно, которые сообщают полость экструдруемого изделия с атмосферой. Необходимо это лишь при пуске установки, так как при обычном режиме ее работы данная полость сообщается с атмосферой через открытый конец профиля. При пуске же, чтобы протянуть начавший выходить из головки экструдат по всему его тракту (т.е. через калибрующее устройство и ванну) к приемно-тянущему устройству, которое затем подхватит профиль, вышедший конец экструдата аппаратчик сминает, заформовывая в него конец проволоки, уже размещенной в этом тракте. Вытягивая из тракта проволоку, направляют в него таким образом экструдруемый профиль. Однако, как видно, полость в конце профиля при этом оказывается пережатой и, если бы не было отверстий в дорне и дорнодержателе, в увеличивающийся ее объем воздух поступать бы не смог, вследствие чего полость „схлопнулась” бы и противоположные стенки полости слиплись.

Таким образом, очевидно, что конструкция головок для полых профилей на участке от входа до дорнодержателя (включая последний) практически не отличается от конструкции трубных головок. Особую трудность здесь представляет конструирование и изготовление переходного канала, осуществляющего плавную трансформацию кольцевого сечения на входе в сечение, соответствующее конфигурации детали. Следует при этом отметить, что основные правила конструирования мундштуков для полых и монолитных профилей практически одинаковы.

Производство таких головок, как правило, индивидуально (одна головка обычно полностью удовлетворяет потребность в данном изделии), поэтому изготовление деталей, оформляющих переходный канал, литьем неэкономично и осуществляется на металлорежущих станках. Если при этом учитывать минимальность последующей ручной доводки конфигурации, то отсюда вытекают определенные ограничения в выборе оформляющих подводящий и переходный каналы поверхностей и их сопряжений. Конфигурация переходного канала в теле мундштука (или корпуса головки) в ряде случаев столь сложна (например, как на рис. 4.40), что оказывается часто более технологичным изготовить его из двух или более деталей.

Обобщая изложенное ранее, можно определить следующие условия, которым должна удовлетворять конструкция переходного и формирующего каналов:

1) обеспечение плавного перехода от канала у дорнодержателя (или канала переходника, если изделие не полое) к оформляющему каналу сложного профиля;

2) технологичность поверхности переходного канала и конструкции мундштука в целом;

3) отсутствие зон застоя;

4) наличие таких углов сходящихся поверхностей суживающегося или расширяющегося переходного канала, которые удовлетворяли бы условию  $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_k$  (4.8);

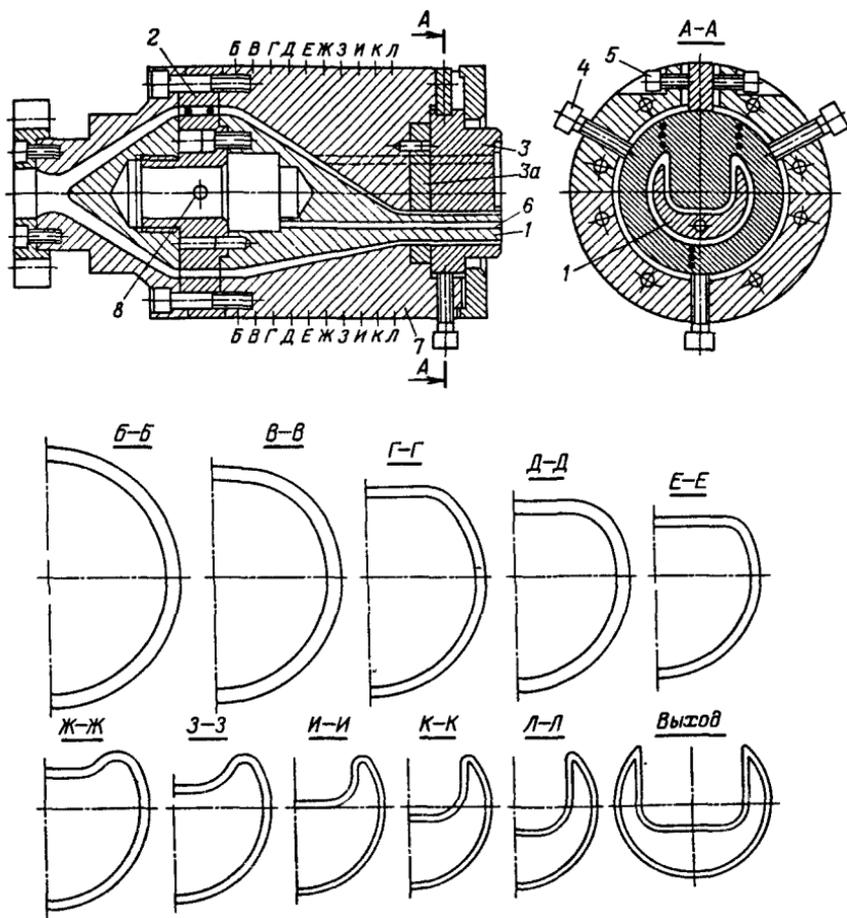


Рис. 4.40. Конструкция головки для изготовления сложного полого профиля:

1 — дорн; 2 — дорнодержатель; 3, 3а — мундштук; 4, 5 — регулировочные винты положения мундштука относительно дорна; 6, 8 — отверстия в дорне и дорнодержателе соответственно; 7 — корпус головки

5) удобство изготовления и чистки состоящего из нескольких деталей мундштука при минимальном числе разъемов;

6) расположение плоскостей разъема отдельных деталей мундштука таким образом, чтобы стык их не попадал на лицевые поверхности изделия (это необходимо потому, что по линии стыка на изделиях остаются следы в виде иногда очень заметных рисок); оптимальное расположение стыков — на углах изделия;

7) правильная ориентация конфигурации сечения переходного и формующего каналов относительно вертикали; в общем случае предпочтительна такая ориентация, при которой выходящий из головки

профиль был бы обращен своими незамкнутыми полостями и локальными выступами вверх (например, как это показано на рис. 4.40), при этом, во-первых, более удобна заправка профиля в калибрующее устройство при пуске агрегата, во-вторых, при прохождении профиля в охлаждающей водяной ванне в полостях его не скапливается воздух, сильно уменьшающий скорость охлаждения профиля;

8) для точного совмещения элементов разъемного мундштука в плоскостях разъема необходимы штифты.

Второе из приведенных здесь условий должно быть рассмотрено более детально. Под этим условием имеется в виду, как отмечалось, возможность машинной обработки элементарных поверхностей канала. Конкретный набор правил их оформления, обеспечивающих эту возможность, существенно зависит от принимаемой технологии изготовления и даже в рамках одной технологии – от типа имеющихся в наличии станков.

Наиболее распространенной в настоящее время является обработка каналов на фрезерных станках различного типа и различной степени совершенства, токарных и шлифовальных станках. Основным фактором, ограничивающим возможности конструктора, при этом является трудодоступность обрабатываемых поверхностей для режущего инструмента. Очевидно, например, что изготовление переходного канала в монолитном корпусе 7 головки, показанной на рис. 4.40, на фрезерном станке практически невозможно. Необходимо иметь по крайней мере три поверхности разъема, показанные на рис. 4.40 пунктирными линиями. Каждая из разъемных деталей корпуса должна обрабатываться отдельно, а после их сборки места стыка должны быть обработаны в канале заподлицо вручную.

Далее, поверхности канала сложные криволинейные, поэтому машинная обработка их возможна только на копировально-фрезерных станках при использовании объемного, трехмерного копира, являющегося как бы слепком с переходного канала. При наличии же лишь обычных фрезерных станков пришлось бы оформить переходный канал совокупностью только плоских и конических поверхностей, как это, например, показано на рис. 4.46, причем от плавного перехода у дорнодержателя 2 (см. рис. 4.40) пришлось бы отказаться, а плавный переход перед местом стыка с промежуточной шайбой 3а мундштука необходимо было бы выполнять вручную. Формующий канал в монолитном мундштуке 3 также потребовал бы ручной доводки в узких местах острых углов. Примеры рационального выбора поверхностей разъема между деталями мундштуков при фрезерной обработке поверхностей их каналов с учетом также отмеченного выше условия 5 показаны на рис. 4.41.

При изготовлении формующего инструмента все более широко начинают использоваться станки для электроэрозионной обработки металла. Существует два типа этих станков, принципиально отличающихся друг от друга видом обрабатываемого инструмента. В станках первого типа инструментом является проволока 1 (рис. 4.42), протяжи-

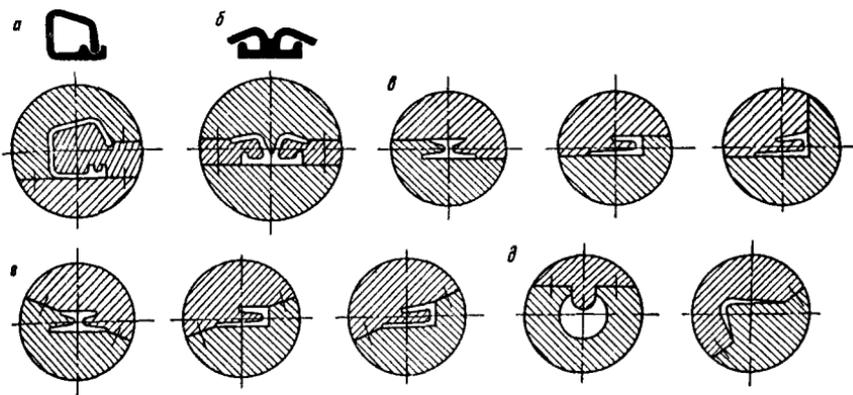


Рис. 4.41. Примеры схем расположения профильных деталей в разъемных мундштуках при экструзии:

*a* — деталь открытого типа с замком; *б* — то же, с касанием стенок; *в* — ступенчатый разъем (нежелательный вариант); *г, д* — рекомендуемые варианты

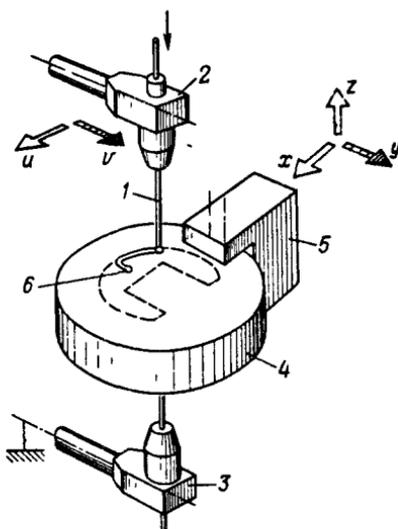


Рис. 4.42. Схема обработки детали на проволочном электроэрозионном станке:

*1* — инструмент (проволока); *2, 3* — держатели проволоки; *4* — заготовка детали; *5* — оправка-захват станка; *6* — стартовое отверстие в заготовке

ваемая через держатели *2* и *3*. Первоначально заготовка детали *4* (например, мундштука головки на рис. 4.40) зажимается в оправке *5* станка, а проволока пропускается через предварительно выполненное в заготовке отверстие *6* и затем — через дорнодержатель *3*. На проволоку *1* и заготовку *4* импульсно подается электрическое напряжение и между ними возникают множественные электроискровые разряды, подвергающие эрозии тело заготовки. Оправка *5* может перемещаться одновременно в направлениях *x* и *y* с любыми заданными изменяющимися во времени скоростями по заранее разработанной для данной детали программе. В результате проволока выполняет в заготовке прорез требуемой конфигурации. Разработаны режимы как рабочей резки, так и последующей финишной обработки образованной поверхности, что позволяет получать ее в готовом виде без последующей полировки.

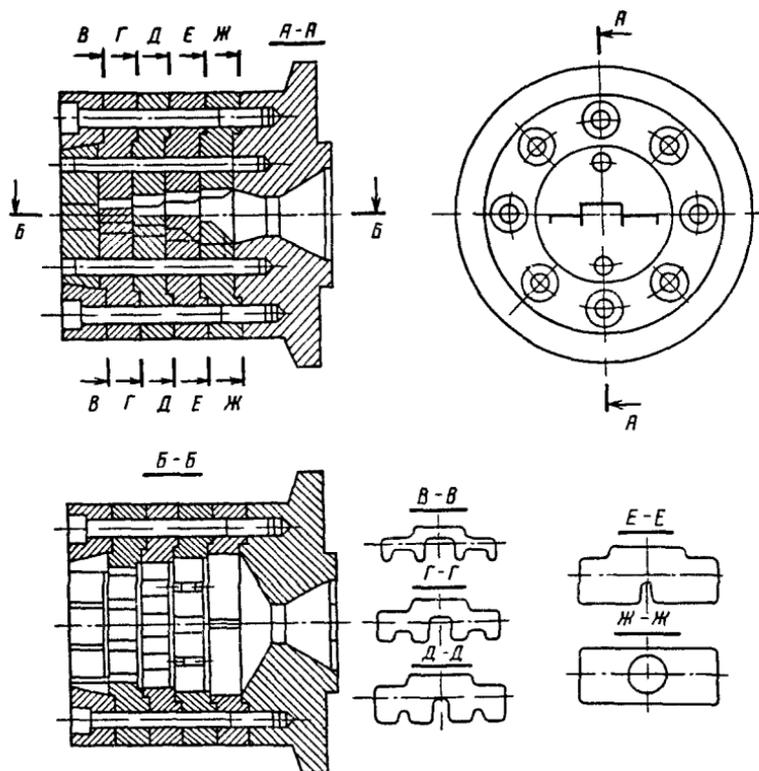


Рис. 4.43. Конструкция головки с мундштуком, разъемным в поперечных к направлению экструзии плоскостях

Этим способом могут выполняться только цилиндрические поверхности, однако со сколь угодно сложной геометрией их поперечного сечения. Применительно к головкам так, казалось бы, могут выполняться только формующие (но не переходные) каналы. Тем не менее оказывается, что этим способ можно использовать и для выполнения переходных каналов, если выполнять мундштуки разъемными не в продольной, а в ряде поперечных плоскостей, как это показано на рис. 4.43. При этом отпадает необходимость в довольно сложной обработке наклонных плоскостей. Чтобы обеспечить монотонность поверхности в местах стыка отдельных дисков мундштука и исключить образование застойных зон, участок переходного канала с меньшим поперечным сечением должен иметь заходную зону, очертания входа которой строго соответствуют очертаниям предыдущего участка на выходе. Обработку этой зоны часто приходится выполнять вручную.

В последнее время появились (однако из-за дефицита не получили пока достаточно широкого распространения) станки подобного же типа, однако имеющие подвижный верхний держатель 2 (см. рис. 4.42).

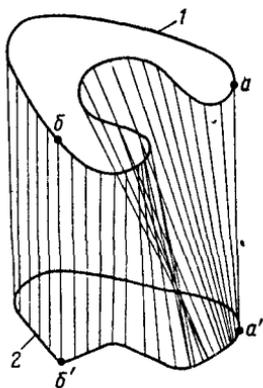


Рис. 4.44. Пример поверхности, описываемой рабочим органом электроэрозионного станка

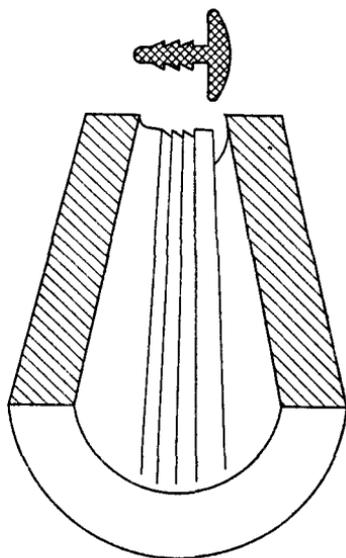


Рис. 4.45. Продольный разрез мундштука для изготовления раскладочного профиля

Так же, как и оправка-захват 5, держатель 2 может одновременно смещаться в направлениях  $u$  и  $v$  с изменяемой по разработанной программе скоростью. Оправка же имеет возможность установки вручную в любое положение по высоте  $z$  относительно нижнего неподвижного держателя 3. Одновременно строго согласованное движение верхнего двигателя и захвата позволяет получать достаточно сложные поверхности (рис. 4.44), образованные смещением прямой таким образом, что она при смещении постоянно пересекается с линиями верхнего 1 и нижнего 2 плоских контуров любой сколь угодно сложной конфигурации. Программирование поверхности на этих станках сводится к „прорисовке” на дисплее этих контуров и отметке на них ряда соответственных пар точек типа „ $a-a'$ ”, „ $b-b'$ ” и т.д., т.е. опорных пар точек, через которые прямая должна при смещении проходить одновременно.

Как видно, этот тип станков открывает большие возможности полностью машинной обработки монотонных достаточно сложных переходных каналов. На рис. 4.45 и 4.46 показаны примеры двух мундштуков с переходными каналами, выполненными за один проход проволоки. Вторым проходом ее в режиме с неподвижным верхним держателем можно было бы в выходной части этих мундштуков выполнить и формирующие каналы, что реально и делается. Однако очевидно, что место перехода от сходящихся поверхностей переходного канала к продольноосевым поверхностям формирующего канала получается в этом случае не плавным. Выполнение сложных поверхностей с плавными переходами в этих и подобных местах (например, в месте у дорнодержателя на рис. 4.40) возможно на электроэрозионных станках, обрабатываемым инструментом которых является не проволочка

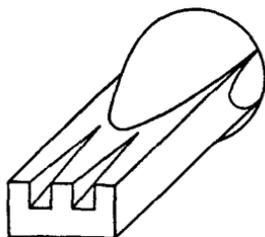
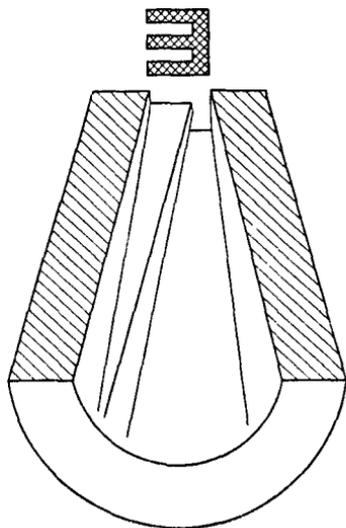


Рис. 4.46. Мундштук для Ш-образного ползкового профиля

Рис. 4.47. "Слепок" переходного и формующего каналов для Ш-образного профиля

лока, а изготовленный из графита или меди электрод. Конфигурация тела электрода представляет собой как бы точный слепок изготавливаемого канала. Электрод внедряется в тело обрабатываемой детали и вследствие электроискрового разряда, распределенного по всей поверхности электрода, находящейся в непосредственной близости с деталью, в ней возникает полость, повторяющая конфигурацию электрода. Последующий режим финишной обработки вторым электродом позволяет получить требуемое качество поверхности. Часто используют последовательно несколько электродов для обработки различных участков канала, что позволяет упростить конфигурацию и изготовление электродов.

Из рассмотренного очевидно, что даже в рамках какого-либо одного принятого способа изготовления возможны различные варианты конфигурации переходного и формующего каналов (например, для Ш-образного профиля проволочным электроэрозионным методом можно изготовить мундштуки по вариантам рис. 4.46 и 4.47, причем это не единственно возможные варианты). Конструктор должен выявить все основные варианты и, проанализировав их, выбрать такой, изготовление которого требует минимальных затрат и времени, который обеспечивает наибольшую гарантию отсутствия огрубления поверхности экструдата и при котором степень выравнивания потока расплава на выходе из формующего канала максимальна.

Следующим, как отмечалось, этапом при выборе предпочтительной конфигурации канала из возможных ее вариантов является анализ их с точки зрения выравнивания потока. В головках для сложных профилей, как правило, отсутствуют локальные подвижные подпороные элементы (конфигурация и конструкция их была бы слишком сложна), и выравнивание потока обеспечивается за счет соответствующей конфигурации подводящего канала.

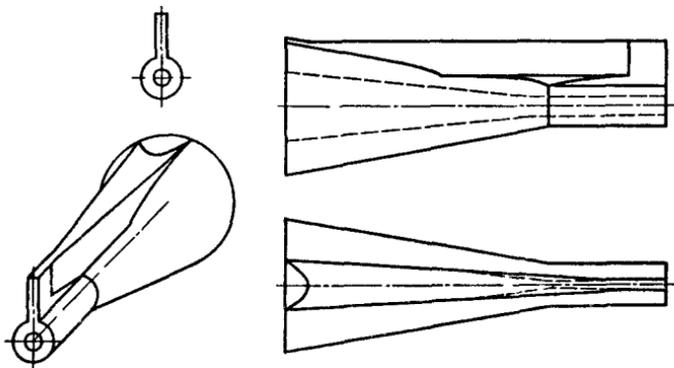


Рис. 4.48. Переходный и формирующий канал для профиля "рояльная петля"

В утолщенных местах сечения скорость выхода экструдата больше, чем в более тонких, что приводит (помимо деформации профиля в продольном направлении, которая может быть исправлена соответствующей принудительной вытяжкой) к преобразованию конфигурации поперечного сечения таким образом, что утолщенные места разбухают гораздо больше, чем более тонкие. Выравнивание потока осуществляется увеличением гидравлического сопротивления того участка подводящего и формирующего каналов, через который проходят линии тока части расплава, формирующих утолщенный участок изделия. При этом также используются метод изменения длины канала и метод изменения высоты канала, а также их комбинация.

На рис. 4.48 показан мундштук для изготовления профиля типа „рояльная петля“.

Плоская часть формирующего канала в поперечном сечении такова, что ее гидравлическое сопротивление больше, чем сопротивление кольцевой части при одинаковой их длине, поэтому в соответствии со способом гидравлической балансировки путем изменения длины канала длина плоской части канала выполняется меньшей; соотношение длин может быть определено по формулам для расходов  $Q_{щ}(\Delta p_{щ})$  и  $Q_k(\Delta p_k)$  в плоскощелевом и кольцевом каналах, где индекс „к“ принадлежит кольцу, „щ“ – плоскому каналу, при условии равенства перепадов давлений по длине этих каналов  $\Delta p_{щ} = \Delta p_k$  и скоростей выхода расплава из них  $v_{щ} = Q_{щ}/F_{щ}$ ,  $v_k = Q_k/F_k$  ( $F_{щ}$  и  $F_k$  – площади поперечных сечений щели и кольца соответственно).

На рис. 4.49, а показан мундштук для экструзии „клиновидной“ полосы, толщина которой непостоянна по высоте; выравнивание потока осуществляется также методом изменения длины. Соотношение между  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $h_1$  и  $h_2$ , полученное из уравнения (4.33), при условии равенства скоростей экструзии в крайних точках сечения имеет вид

$$l_1 = l_2(h_1/h_2)^{n/(m-1)} \quad (4.106)$$

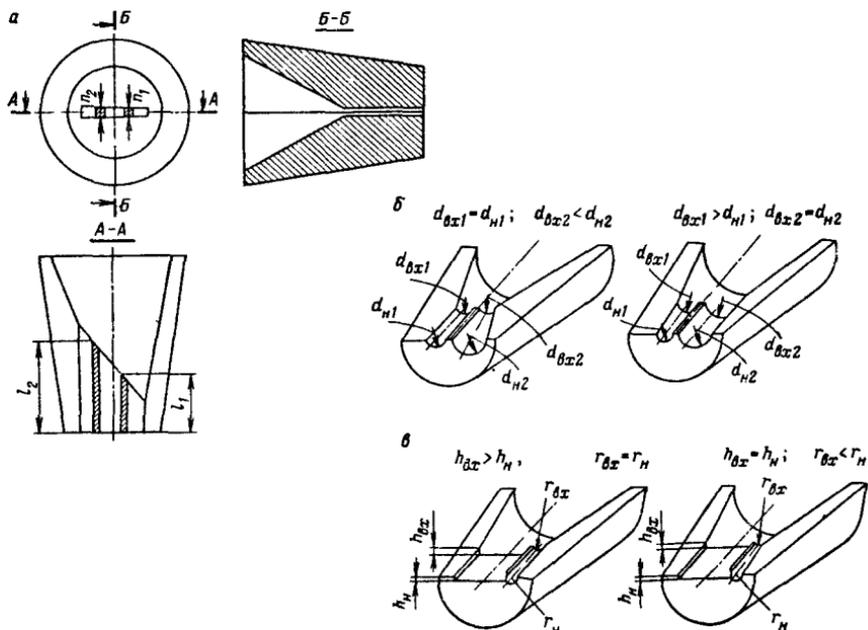


Рис. 4.49. Примеры оформления мундштуков в соответствии с различными способами выравнивания потока. Пояснения в тексте

На рис. 4.49, б показан мундштук для профиля в виде двух стержней, соединенных перемычкой. При равной длине формирующих каналов скорость выхода расплава через участок с большим диаметром соответственно больше. Согласно способу изменения высоты канала увеличение сопряжения канала с большим диаметром (рис. 4.48, б, слева) или уменьшение сопротивления канала с меньшим диаметром (справа) осуществляется соответственно уменьшением и увеличением диаметров на входе. Соотношение диаметров на входе и на выходе может быть получено по методу эффективной вязкости на основе уравнения (4.2) с использованием формул констант  $K_H$  для конического и цилиндрического круглых каналов (см. с. 000).

Метод выравнивания потока в мундштуке на рис. 4.49, в аналогичен предыдущему; подход к определению размеров  $h_{вх}$  и  $r_{вх}$  также аналогичен. Следует, однако, иметь в виду, что градиент давления вдоль канала  $dp/dz$  постоянен на всей длине канала только для каналов с постоянным поперечным сечением. Для каналов с непостоянным по длине сечением (например, конических или клиновидных)  $dp/dz \neq \text{const}$ . Таким образом, например, для случая на рис. 4.48, в при равенстве давлений как на входе в каналы, так и на выходе распределение давления по их длине различно. Следовательно, в каждом поперечном сечении канала в различных участках его давление не

одинаково, что приводит к крайне нежелательным перетокам расплава в направлении, перпендикулярном основному направлению течения, из-за которых, как подтверждает практика, невозможно получить экструдат правильной формы. Поэтому рекомендуется участки формирующего канала с сильно разнящейся толщиной отделять перегородками, как это показано на рис. 4.49, в. Перегородки должны начинаться у входа в формирующий канал и иметь длину меньше длины последнего на 10–12%, чтобы потоки расплава перед выходом из канала успели надежно свариться.

#### 4.8. Прочностной и тепловой расчет головок

Все усилия, возникающие в различных деталях экструзионных головок, являясь следствием давления материала в каналах (или перепада давления по длине каналов). Гидравлический расчет позволяет определить давление в любой точке каналов при нормальной работе головки. Однако нагруженное состояние головки при нормальной работе не является критическим с точки зрения ее прочности. Наиболее опасен тот случай, когда включен (возможно, случайно) экструдер при еще не прогретом формирующем канале, который закупорен пробкой имеющегося там нерасплавленного полимера. В этом случае в соответствии с уравнением (4.1) давление, создаваемое шнеком, достигает максимально возможного значения (условие  $Q = 0$ ). Вследствие отсутствия расхода через головку отсутствует и перепад давлений вдоль каналов, и давление во всех точках каналов становится равным максимальному, развиваемому экструдером и определенному из уравнения (4.1). Именно этот характер нагруженного состояния должен быть использован при составлении расчетной схемы для определения прочности элементов головки.

Тепловой расчет головок сводится к определению мощности электронагревателей (или определению потребной поверхности теплообмена в случае жидкостного или парового обогрева). Тепло затрачивается, во-первых, на нагрев головки от комнатной температуры до рабочей за определенное время (чаще всего 30–45 мин), во-вторых, на компенсацию тепловых потерь телом головки в окружающую среду. В каналах головки, за исключением некоторых специальных случаев, материал не должен греться за счет внешних источников тепла; в функции экструдера входит подготовить расплав с температурой экструзии, одинаковой по его объему. Естественно, мощность нагревателей, потребная в пусковом периоде, гораздо больше, чем в установившемся режиме. Расчет мощности ведется так же, как и для прессовых форм, по заданному времени прогрева до рабочей температуры.

Выбор материала для изготовления формирующего инструмента зависит от конструкции головки и от агрессивности среды перерабатываемого материала.

Корпусы головок червячных машин часто делают литыми из чугуна и из стали, а также коваными, сварными из листового проката. Выбор материала для изготовления корпуса головок во многом зависит от

вида перерабатываемого материала. Так, для переработки поливинилхлорида корпус головки выполняется из легированных конструкционных сталей с гальваническими покрытиями (хромированием) внутренних поверхностей формующего инструмента, непосредственно соприкасающихся с расплавом перерабатываемого материала. В случае переработки термочувствительных пластмасс конструкционный материал не должен содержать железа и никеля, легко подвергающихся коррозии.

Дорны, подвергающиеся постоянному и значительному износу, рекомендуется изготавливать из твердых сплавов. Как дорны, так и мундштуки должны подвергаться обязательной термообработке (отпуску) для устранения возможных деформаций в работе и иметь твердость *HRC* 42–66.

Дорны и мундштуки рекомендуется изготавливать из инструментальной стали У8А, стали марки 40Х или материалов, им подобных, с закалкой.

Формующие элементы головки к экструдерам, применяемым в кабельной промышленности, рекомендуется изготавливать из легированных сталей марок Х12, Х12М, ХГ, ХВГ, и ШХ15, ШХ9, ШХ6.

#### **4.9. Калибрующий инструмент**

Калибрующие устройства, устанавливаемые на выходе из формующего канала головки, выполняют следующие основные функции: 1) фиксация приобретенной в формующем канале конфигурации изделия посредством его частичного охлаждения; 2) трансформация исходной конфигурации экструдированной заготовки до требуемой конечной конфигурации изделия с последующей фиксацией последней; 3) обеспечение требуемой точности размеров наружной, внутренней или одновременно обеих поверхностей изделия.

Выполнение первой из этих функций является обязательным для всех типов калибрующих устройств. Остальные две (или одна из них) в ряде случаев оказываются ненужными. Например, когда требуемая точность размеров изделия невелика (не более 15–16-го качества) и на выходе из головки экструдат имеет форму и размеры, весьма близкие к таковым у готового изделия, и если к тому же экструдирован высоковязкий полимер (например, непластифицированный ПВХ), возможно применение простейших устройств в виде поддерживающих пластин, планок, предохраняющих изделие от провисания под воздействием собственного веса, как на пути от головки к охлаждающей ванне, так и в самой ванне. Профиль свободно скользит по расположенной под ним планке, прижимаясь к ней лишь силой собственного веса. Пример реализации второй функции показан на рис. 4.1, где кольцевое на выходе из головки поперечное сечение трансформируется на калибрующем стержне в соответствующее сечение готового изделия. При реализации третьей функции необходим принудительный прижим охлаждающего изделия к калибрующей поверхности.

Существует несколько признаков, по которым можно классифицировать как методы калибровки, так и сами калибрующие устройства.

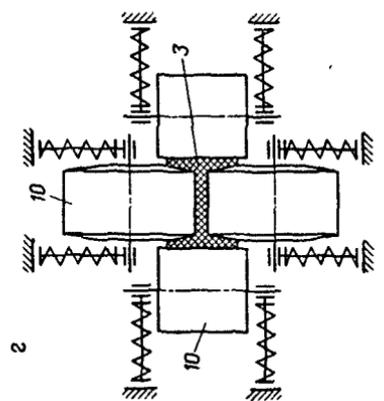
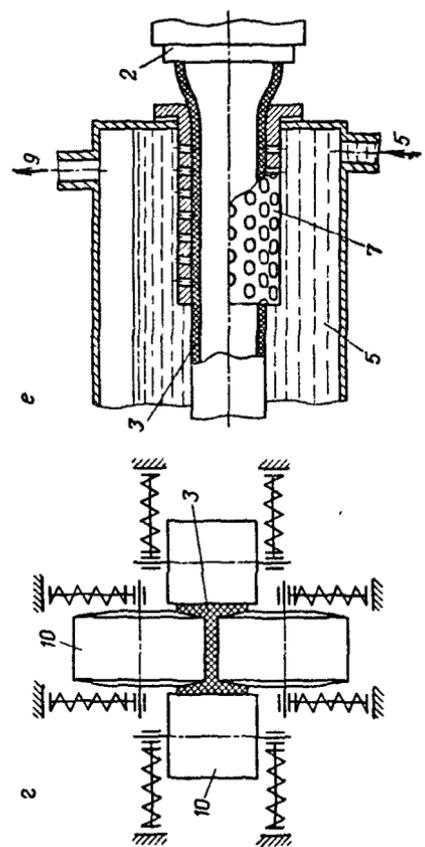
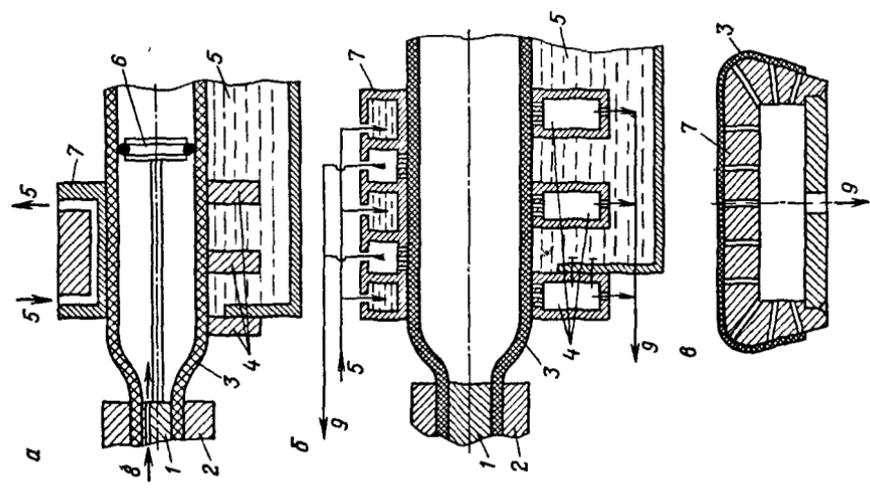
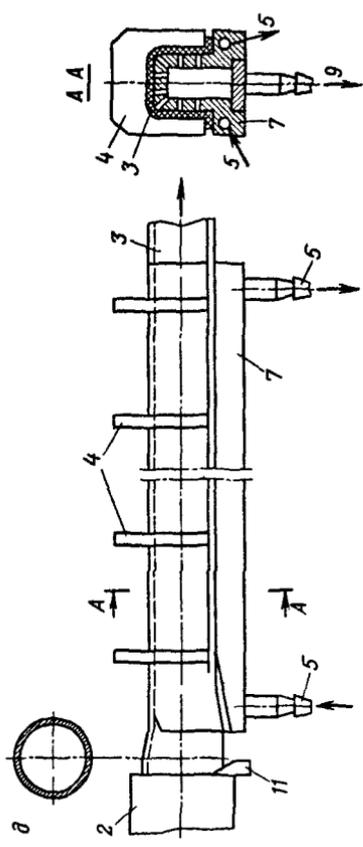
Первый признак – по типу поверхности изделия, которая подвергается калибровке: внутренняя (только полые профили – см., например, рис. 4.1) и наружная калибровка (полые и монолитные профили). Последний тип калибровки для полых изделий более распространен, так как у большинства изделий именно наружная поверхность является ответственной и часто должна выполняться с гарантированной точностью.

Второй признак – по способу прижима изделия к формирующей поверхности: естественный прижим под воздействием собственного веса изделия; принудительный прижим механическим способом посредством пружин, грузов и т.д.; принудительный прижим с помощью сжатого воздуха и с помощью вакуума; различные комбинированные способы, представляющие собой сочетания тех или иных из перечисленных выше. При внутренней калибровке используют прижим вследствие тепловой усадки изделия при охлаждении его на калибре, а также вследствие стремления профиля в состоянии расплава к сокращению размеров сечения при принудительной вытяжке его или, наоборот, за счет незначительного увеличения размеров сечения калибра по его длине на начальном участке. Все эти способы прижима при внутренней калибровке требуют достаточно точной согласованности изменения размеров сечения калибра по его длине с кинетикой изменения размеров сечения профиля в процессе перемещения его по калибру, что далеко не всегда удается обеспечить. В связи с этим бывает сложно подобрать режим экструзии, при котором обеспечивался бы надежный прижим и вместе с тем не возникало бы периодически заклинивания профиля на калибре.

Третий признак – по способу охлаждения профиля во время пребывания его в калибрующем устройстве: при контакте с холодной металлической поверхностью калибра, при контакте непосредственно с охлаждающей жидкостью (водой) или комбинированный способ, сочетающий в себе два первых.

Четвертый признак – по конструктивному типу калибрующего элемента: монотонный канал; монотонный стержень (см. рис. 4.1); набор пластин с отверстиями, соответствующими поперечному сечению изделия (диафрагм); профильные ролики.

Сочетание рассмотренных признаков в применяемых на практике калибрующих устройствах чрезвычайно разнообразно. На рис. 4.50 приведены наиболее часто встречающиеся конструкции. На рис. 4.50, а показаны два варианта наружной калибровки в монотонном канале (вверху) и диафрагмами (внизу) с принудительным прижимом посредством избыточного давления воздуха, подаваемого в полость изделия через дорн головки. С целью создания давления в полости профиля в нее введена укрепленная на дорне (посредством штанги, троса, цепи и т.д.) пробка, имеющая уплотняющий элемент из резины или фторопласта. В профилях с малой площадью поперечного сечения полости



(до 1,0–1,5 см<sup>2</sup>) давление воздуха оказывается достаточным и без установки пробки. В других случаях кроме использования пробки возможна герметизация посредством пережима полости в конце экструдированного изделия.

Для тонкостенных изделий (до 2 мм) эффективный прижим может быть осуществлен давлением, не превышающим 0,1 МПа, поэтому для таких изделий возможно применение вакуумного способа прижима, показанного в трех модификациях (монотонный канал и расположенные в охлаждающей ванне диафрагмы на рис. 4.50, б, а также монотонный перфорированный канал в вакуумируемой охлаждающей ванне на рис. 4.50, е).

В варианте калибровки, показанном в верхней части рис. 4.50, б, металлический блок с калибрующим отверстием имеет чередующиеся кольцевые полости, причем в одних циркулирует охлаждающая вода, а другие сообщены с вакуумной линией и имеют множество отверстий малого диаметра, передающих прижимающее воздействие вакуума на калибруемое изделие. Вакуумная калибровка обладает преимуществами по сравнению с калибровкой давлением, заключающимися в том, что, во-первых, отсутствует необходимость пережима изделия или установки пробки и подачи воздуха через головку, во-вторых, возможна калибровка изделий открытого типа, как это показано на рис. 4.50, в, в-третьих, в этом случае калибруется наружная поверхность изделия, которая, как правило, является ответственной. Однако сообщенные с вакуумом отверстия, несмотря на их малый диаметр, могут оставлять риски на поверхности изделий из некоторых полимеров.

С целью снижения сил трения скольжения изделия о поверхности калибрующего устройства последнее можно выполнять в виде нескольких последовательно установленных групп вращающихся роликов (рис. 4.50, з).

Часто калибрующие устройства могут представлять собой комбинацию элементов согласно рассмотренной ранее классификации, причем в ряде случаев могут калиброваться одновременно как внутренние, так и наружные поверхности. Так, на рис. 4.50, д показано устройство, трансформирующее кольцевое, замкнутое на выходе из головки поперечное сечение заготовки в U-образное открытое поперечное сечение готового изделия, причем внутренняя поверхность изделия калибруется монотонным стержнем, а наружная — набором диафрагм.

Рис. 4.50. Варианты конструкций калибрующих устройств:

а — наружная калибровка сжатом воздухом; б — наружная калибровка вакуумом изделия закрытого типа; в — внутренняя калибровка вакуумом изделия открытого типа; г — калибровка роликами; д — комбинированный тип калибрующего устройства; е — наружная калибровка трубы в вакуумной герметичной ванне калибрующей перфорированной втулкой; 1 — дорн; 2 — мундштук; 3 — изделие; 4 — набор диафрагм; 5 — охлаждающая вода; 6 — пробка с кольцевым резиновым уплотнением; 7 — калибрующий элемент; 8 — воздух под избыточным давлением; 9 — вакуум; 10 — ролик; 11 — нож, разрезающий трубчатую заготовку

Каждый из представленных на рис. 4.50 вариантов может быть классифицирован по отмеченным выше четырем признакам. Например, вариант „е“ — это наружная калибровка с вакуумным прижимом к калибрующему элементу в виде монотонного канала при комбинированном способе охлаждения. Предлагается самостоятельно выполнить такую классификацию всех этих вариантов.

Предлагается также оценить, какой из двух близких вариантов „б“ (верхний) и „е“ характеризуется: а) более интенсивным охлаждением полого профиля; б) меньшей силой трения профиля о калибр; в) большей простотой в обслуживании при заправке профиля во время пуска агрегата; г) лучшим качеством наружной поверхности изделия.

Удовлетворительная работа калибрующего инструмента (достаточная степень охлаждения изделия, его размерное соответствие, устойчивость режима калибровки и т.п.) зависит от того, насколько верно определены основные его размеры — длина и конфигурация поперечного сечения. Как уже отмечалось, в калибрующем инструменте имеет место неполное охлаждение изделия, необходимое лишь для образования слоя отвердевшего полимера, достаточно прочного, чтобы противостоять в процессе окончательного охлаждения (как правило, при прохождении изделия через ванну с проточной водой) воздействию следующих силовых факторов: внутренних напряжений в теле охлаждающегося изделия, силы собственного веса, избыточного давления воздуха внутри изделия при соответствующем методе калибровки, тянущего усилия, гидростатического давления воды в охлаждающей ванне.

Толщина отвердевшего слоя зависит от времени контакта профиля с калибрующим устройством и, следовательно, от длины последнего. Таким образом, задача нахождения требуемой длины калибрующего устройства должна состоять из следующих основных этапов: определение необходимой толщины отвердевшего слоя из условия его прочности под воздействием указанных усилий и затем определение длины устройства, обеспечивающей указанную толщину слоя.

Наибольшее силовое воздействие на откалиброванный профиль оказывают давление воздуха и тянущее усилие, так что воздействием прочих факторов по сравнению с указанными можно пренебречь. При этом условия прочности отвердевшего слоя имеют следующий вид:

под воздействием внутреннего давления

$$pD/(2s^*) \leq [\sigma]; \quad (4.107)$$

под воздействием тянущего усилия

$$N/(\Pi s^*) \leq [\sigma], \quad (4.108)$$

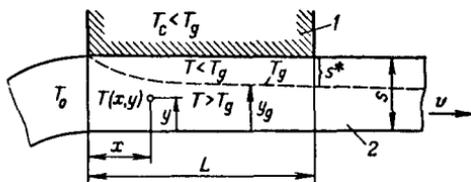
где  $p$  — давление воздуха;  $D$  — наружный диаметр трубы;  $N$  — тянущее усилие;  $\Pi$  — периметр поперечного сечения изделия, контактирующий с калибрующим устройством;  $[\sigma]$  — допустимое напряжение;  $s^*$  — необходимая толщина отвердевшего слоя.

Взаимосвязь между толщиной отвердевшего слоя на выходе из устройства и длиной последнего определяется из уравнения теплопроводности, которое для рассматриваемого случая (рис. 4.51) имеет следующий вид:

$$v \partial T / \partial x = a \partial^2 T / \partial y^2, \quad (4.109)$$

Рис. 4.51. К расчету длины калибрующего устройства:

1 — калибрующее устройство; 2 — калибруемое изделие



где  $T$  — температура в какой-либо точке по толщине профиля на участке пребывания его в калибрующем устройстве;  $v$  — скорость протяжки профиля через калибрующее устройство;  $a$  — температуропроводность полимера;  $x$  и  $y$  — соответственно продольная и поперечная координаты (рис. 4.51).

Решаем это уравнение при следующих граничных условиях:

$$T|_{x=0} = T_0; \quad T|_{y=s} = T_c; \quad (\partial T / \partial y)|_{y=0} = 0,$$

где  $T_0$  — температура расплава на входе в калибрующее устройство;  $T_c$  — температура стенки калибрующего устройства.

Решение, описывающее распределение температуры в массе охлаждаемого изделия (т.е. в области  $0 \leq x \leq L$  и  $0 \leq y \leq s$ ), с достаточной степенью точности можно представить в следующей форме:

$$[T(x, y) - T_c] / (T_0 - T_c) = (4/\pi) \cos[(\pi/2)(y/s)] \exp(-gx/v); \quad g \approx 2,5a/s^2. \quad (4.110)$$

Как видно из рис. 4.51, в охлаждаемом изделии имеются области отвердевшего ( $T < T_g$ ) и не отвердевшего ( $T > T_g$ ) полимера с поверхностью раздела между ними ( $T = T_g$ ), где  $T_g$  — температура стеклования (кристаллизации) полимера. Координата  $y_g$  поверхности раздела монотонно уменьшается с ростом  $x$ , причем согласно условию прочности отвердевшего слоя при  $x = L$  она должна быть равна ( $s - s^*$ ). Подставив эти значения в выражение (4.110), получим формулу для определения минимально необходимой длины калибрующего устройства:

$$L = (v/g) \ln \{ (4/\pi) [(T_g - T_c) / (T_0 - T_c)] \cos[(\pi/2)(s - s^*)/s] \}. \quad (4.111)$$

Формулы (4.107) и (4.108) получены при условии постоянства  $[\sigma]$  по толщине отвердевшего слоя. При учете сильного падения  $[\sigma]$  с ростом температуры и интенсивного изменения температуры по толщине отвердевшего слоя от  $T_g$  до  $T_c$  это, строго говоря, неверно. Однако принятие в данном случае в качестве  $[\sigma]$  его значения для температурной области, близкой к  $T_g$ , обеспечивает достаточную надежность формул (4.107) и (4.108). Значения  $[\sigma]$  при соответствующих  $T_g$  для некоторых материалов приведены ниже:

|                              | $[\sigma]$ , МПа | $T_g$ , К |
|------------------------------|------------------|-----------|
| Непластифицированный ПВХ     | 2,5              | 348       |
| Полиэтилен высокой плотности | 2,5              | 263       |
| Полиэтилен низкой плотности  | 1,0              | 353       |
| Полистирол                   | 2,5              | 353       |

Формула (4.111) может быть использована не только для определения длины калибрующего устройства на стадии его проектирования, но и при эксплуатации имеющегося оборудования для определения, например, максимально возможной скорости экструзии, максимально возможной толщины стенки профиля.

При расчетах по формулам (4.108), (4.110) следует иметь в виду, что величина тянущего усилия  $N$  равна сумме двух сил сопротивления протяжке профиля через калибрующее устройство: локальной силы  $F_3$  на входе в калибрующее отверстие, вызванной некоторой деформацией сечения профиля при подстройке его конфигурации к конфигурации сечения канала калибра, и силы трения  $F_{тр}$  профиля о стенки канала, величина которой определяется значениями коэффициента трения  $f$  и усилия прижатия профиля к стенкам. Последнее зависит от минимально необходимой величины нормального контактного напряжения  $\sigma_k$  (или давления  $p$  в полости трубы при калибровке по типу „а” на рис. 4.50), обеспечивающего надежный контакт профиля со стенками, и площади контакта, равной произведению длины канала  $L$  на периметр его сечения  $\Pi$ . Таким образом, имеем:

$$N = F_3 + F_{тр} = F_3 + f\Pi L \sigma_k. \quad (4.112)$$

Решая совместно (4.112) и (4.108), получаем ограничение на длину калибра по условию прочности профиля:

$$L \leq (\Pi s^* [\sigma] - F_3) / (f \Pi \sigma_k). \quad (4.113)$$

С другой стороны, по условию удовлетворительности охлаждения величина  $L$  не может быть меньше, чем рассчитанная по формуле (4.111):

$$L \geq L \quad \text{по (4.111)}. \quad (4.114)$$

Эти два неравенства могут не иметь общего интервала на оси аргумента  $s^*$ , что проиллюстрировано рис. 4.52. Как видно, при скорости протяжки 1,8 см/с общий интервал обоих неравенств возникает при  $L \geq 17,2$  см; этот интервал, очевидно, есть область возможных длин калибра. При скорости 2,6 см/с такого интервала нет: профиль будет рваться на выходе из калибра или непосредственно в нем.

Выполнение точных расчетов длины калибрующего устройства в

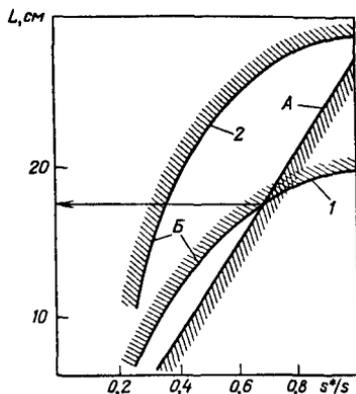


Рис. 4.52. Вид ограничений на длину калибрующего устройства по условиям прочности А (4.113) и охлаждения Б (4.114). Профиль из ударпрочного полистирола толщиной 3 мм и шириной 4 см. Скорость протяжки — 1,8 см/с (1) и 2,5 см/с (2)

каждом конкретном случае на стадии его проектирования затруднено тем, что часто сложно бывает спрогнозировать значения  $\sigma_k$  и  $F_3$  для принятого к изготовлению профиля. Эти значения, как правило, принимаются равными значениям уже известным из практики успешной эксплуатации калибров при производстве профилей подобной конфигурации из близкого (или того же) типа материала. Однако даже если их достоверные значения и неизвестны, то эти расчеты целесообразно выполнять как оценочные при определении принципиального конструктивного оформления калибра. Так, если расчет показывает, что общий интервал неравенств имеет место в ограниченной области ( $s^*/s$ ), например от 0,5 и выше, то следует ожидать неустойчивой, ненадежной работы калибра в виде монотонного канала. Вид формул (4.111) и (4.113) в этом случае подсказывает возможные пути расширения этой области. Один из путей, технологический, уже рассмотрен: снижение скорости протяжки. Он крайне нежелателен, так как снижается производительность агрегата.

Снижение величины  $F_3$  [см. (4.113)] возможно правильным выполнением заходной части канала: небольшим плавным расширением на входе и скругленными кромками.

Другой путь – интенсификация охлаждения в процессе калибровки. Так, если калибр выполнить в виде двух или трех разобренных секций с охлаждением профиля на участках между ними водой непосредственно в охлаждающей ванне, то суммарная длина секций (и, следовательно, сила трения в них) окажется меньшей, чем эквивалентная им с точки зрения охлаждения длина монолитного калибра (см. пример на рис. 4.50, б).

Многосекционными калибры лучше выполнять еще и потому, что при этом можно обеспечить более надежный контакт поверхности охлаждающегося и уменьшающегося в размерах профиля с поверхностью калибра, выполняя секции с последовательно уменьшающимися размерами сечения калибрующего отверстия и взаимно сближая или разводя секции (при отладке режима) до возникновения контакта каждой из них с профилем. Сигналом возникновения контакта служит появление осевого усилия на секции (целесообразно оснащение секций устройствами для фиксации этого усилия).

В пределе многосекционные калибры должны состоять из множества секций в виде шайб толщиной 4–15 мм, установленных на двух или трех общих направляющих, по которым они могут взаимно смещаться. Так как каналы для вакуума и водяного охлаждения в этом случае в секциях уж? не выполнимы, то комплект шайб помещается непосредственно в охлаждающую ванну (сразу после входа в нее). Если при этом профиль полый, то для прижима его к диафрагмам (шайбам) применяют вакуумируемую ванну.

Из формулы (4.113) видно, как важно стремиться уменьшить коэффициент трения  $f$  и напряжение  $\sigma_k$  прижатия профиля к калибру. Коэффициент трения о шайбы намного ниже, чем о монотонный канал, так как в место контакта может попадать вода, выступая здесь в роли

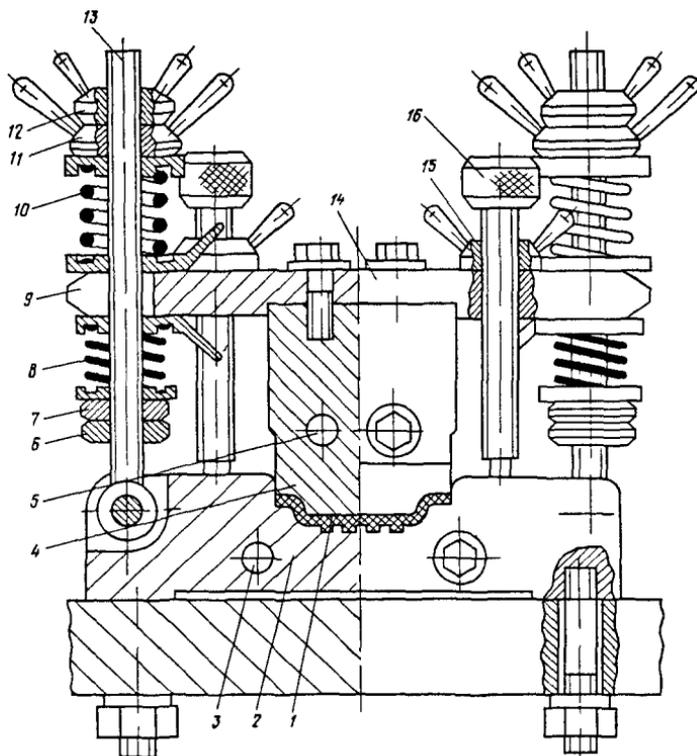


Рис. 4.53. Разъемное калибрующее устройство:

1 — калибруемый профиль; 2 — нижняя половина калибра; 3 — канал охлаждения нижней половины калибра; 4 — верхняя половина калибра; 5 — канал охлаждения верхней половины калибра; 6, 12, 15 — контактные; 7, 11 — гайки; 8 — пружина; 9 — паз плиты; 10 — пружина; 13 — откидной болт; 14 — крепежная плита; 16 — фиксирующий винт

смазки. По этой же причине сила трения в варианте „e” на рис. 4.50 меньше, чем, например, в варианте „a” сверху.

Так как величину  $\sigma_k$  часто достоверно предсказать на стадии проектирования калибра нельзя, то в его конструкции необходимо предусматривать возможность регулировки  $\sigma_k$  с тем, чтобы при отладке процесса добиваться такого минимально возможного его значения, при котором еще достигается надежный контакт профиля с калибром. На рис. 4.53 показано калибрующее устройство, позволяющее регулировать усилие прижима профиля 1 к поверхностям двух разъемных половин калибра 2 и 4 и, следовательно, величину  $\sigma_k$  практически от нулевого их значения.

#### 4.10. Фильтры

Фильтрующие элементы устанавливаются непосредственно перед входом в головку и предназначены для очистки расплава от различного рода твердых включений, неизбежно попадающих в материал на различных стадиях его производства и транспортировки, а также от неполностью проплавленных в канале червяка частиц материала, которые иногда появляются на выходе из этого канала при работе экструдера с максимальной производительностью на некоторых типах материалов (например, на высокомолекулярном полиэтилене высокой плотности).

Необходимое качество очистки расплава зависит от требований к изделию; в соответствии с этим используют фильтрующие сетки с различным размером ячеек. В процессе работы фильтрующие элементы постепенно засоряются; в связи с этим осуществляется их замена тем или иным способом.

К фильтрам предъявляются следующие требования: 1) обеспечение необходимого качества очистки расплава; 2) минимальное гидравлическое сопротивление; 3) замена без остановки экструдера; 4) минимальные (или их отсутствие) пульсаций и расхода расплава через головку при замене, постоянство расхода в процессе эксплуатации; 5) минимальные потери материала при замене.

Второе требование обязательно не во всех случаях. Более того, при эксплуатации головок с малым гидравлическим сопротивлением увеличение его (например, посредством ввода фильтра) даже необходимо для обеспечения работы экструдера в предпочтительной области его рабочей характеристики. Однако для головок, способных работать в этой области и без дополнительного сопротивления введение фильтра приводит к смещению рабочей точки (см. рис. 4.4) вправо и, следовательно, к нежелательному уменьшению производительности – тем более сильному, чем больше гидравлическое сопротивление фильтра. Типичный пример – головки для экструзии тонких пленок, сами по себе имеющие повышенное сопротивление; ситуация здесь усугубляется тем, что качество очистки расплава для этих пленок должно быть повышенным, в связи с чем приходится применять мелкоячеистые фильтрующие элементы.

Четвертое требование определяется тем, что как пульсирующее, так и монотонное изменение расхода приводит к соответствующему отклонению толщины экструдированного изделия от требуемого значения. Необходимость же прочих требований очевидна.

В настоящее время используется несколько конструктивных типов фильтров, в той или иной степени удовлетворяющих отмеченным требованиям.

Первый, простейший тип показан на рис. 4.1. Фильтрующая сетка в виде диска (или их пакет) крепится к левой плоской поверхности решетки 2 (способ крепления может быть различным и здесь не показан). Как видно, эта конструкция не удовлетворяет третьему требованию и, как следствие, пятому требованию: остановка экструдера и

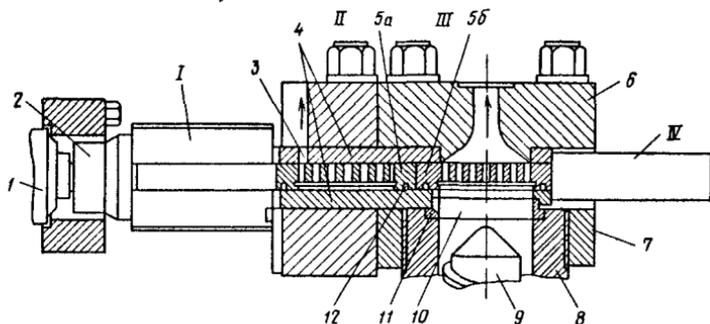


Рис. 4.54. Фильтр кассетного типа:

1 — гидроцилиндр; 2 — толкатель гидроцилиндра; 3 — дренажное отверстие; 4 — кассета; 5а, 5б — фильтрующие элементы; 6, 7 — блоки корпуса фильтра; 8 — цилиндр экструдера; 9 — червяк; 10 — опорное кольцо; 11 — выточка на опорном кольце; 12 — кольцевая проточка на фильтрующем элементе

снятие головки при замене неизбежны. Потери материала при последующем пуске агрегата значительны. Использование этого типа целесообразно при очень редких сменах. Например, при экструзии толстостенных профилей мелкие включения поверхностных дефектов практически не вызывают, к тому же еще и при непрозрачных материалах они по существу не влияют на качество изделия. В связи с этим используют крупноячеистые сетки, засорение которых происходит очень медленно.

Второй, кассетный тип показан на рис. 4.54 в виде сверху с горизонтальным разрезом по оси червяка 9 и цилиндра экструдера 8. Корпус фильтра состоит из двух блоков 6 и 7, между которыми зажата кассета 4. Фильтрующий элемент 5 представляет собой квадратную пластину с центральной круглой частью, диаметр которой равен диаметру отверстия в цилиндре экструдера. Эта часть выполнена в виде решетки (множество близко расположенных малых цилиндрических отверстий), на которую опирается закладываемая в кольцевую проточку сетка (на рис. не показана). Фильтр имеет четыре позиции размещения элемента: позицию установки I, позицию удаления воздуха II, рабочую позицию III и позицию изъятия IV. При работе агрегата в кассете фильтра находятся два элемента 5а и 5б в позициях II и III соответственно.

При смене элементов без остановки экструдера очередной элемент устанавливается вертикально в позицию I и толкателем 2 гидроцилиндра 1 подается в позицию II, смещая отработавший элемент 5б в позицию изъятия, откуда он затем удаляется вручную, а элемент 5а — в рабочую позицию. Заключенный в отверстиях решетки элемента 5а воздух при этом расплавом из цилиндра выдавливался бы в выходной канал, попадая затем в канал головки и в изделие, у которого возник бы бракованный участок на некоторой длине. Во избежание этого смена элементов проводится в две стадии. На первой стадии элементы

смещаются на расстояние до совмещения выточки 11 кольца 10 с кольцевой проточкой 12 в элементе 5а. На этой стадии элемент 5б продолжает по-прежнему работать, однако расплав начинает затекать через указанные выточку и проточку в элемент 5а, заполняя отверстия в сетке и решетке. Как только расплав показывается из дренажного отверстия 3, что свидетельствует об окончании первой стадии (удаления воздуха), толкатель 2 продолжает движение, завершая смену элементов.

Гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента можно уменьшать, увеличивая площадь фильтрации, однако в рассмотренных конструкциях фильтров площадь фильтрации ограничена площадью сечения отверстия цилиндра экструдера: значительное увеличение диаметра элемента по сравнению с диаметром цилиндра привело бы к прогрессивному возрастанию усилий от давления расплава, неприемлемому увеличению габаритов и металлоемкости конструкции фильтра. В связи с этим фильтры данных конструкций эксплуатируются с относительно крупноячеистыми сетками, имеющими небольшое удельное гидравлическое сопротивление. Тонкая очистка расплава на этих фильтрах невозможна. Для тонкой же очистки используют фильтры принципиально иной конструкции с развитой поверхностью фильтрации.

На рис. 4.55 показан пример конструкции фильтра для тонкой очистки. Фильтр имеет два элемента 1а и 1б, представляющих собой полые цилиндры из пористого материала с сообщающимися порами. Два поворотных крана 2а и 2б пробкового типа могут переключать поток расплава из цилиндра экструдера 3 с одного фильтрующего элемента на другой. Преимущества этой конструкции очевидны: большая поверхность фильтрации, достигаемая за счет достаточной длины элементов при относительно малом их диаметре, вследствие чего невелики распорные усилия, возникающие от давления расплава в местах соединений деталей корпуса фильтра. Клапаны кинематически связаны друг с другом, так что поворот их осуществляется одновременно от одного привода.

Последняя из рассмотренных конструкций фильтров имеет лишь один, четвертый недостаток. Медленное, монотонное снижение производительности экструдера вследствие постепенного засорения фильтрующего элемента в современных конструкциях экструзионных агрегатов, оснащаемых различного рода системами автоматического управления, может быть компенсировано тем или иным способом и при этом не влияет на качество продукции. Например, в пленочных агрегатах по сигналу от датчика толщины пленки, свидетельствующему о ее уменьшении вследствие снижения производительности экструдера, система может вырабатывать компенсирующую команду на увеличение частоты вращения червяка или уменьшение скорости приема и намотки пленки. Однако очень кратковременная пульсация производительности во время смены фильтрующего элемента (время смены его в конструкциях типа показанных на рис. 4.54 и 4.55 равно

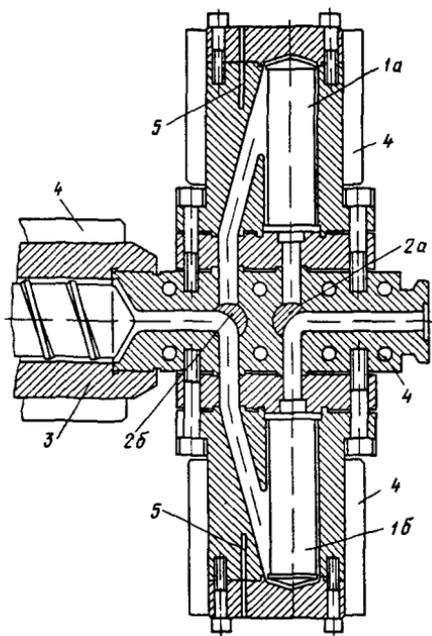
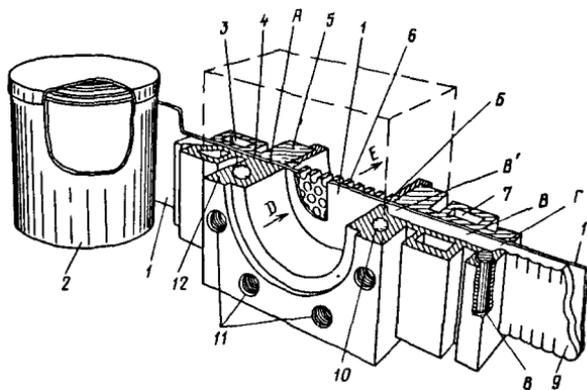


Рис. 4.55. Фильтр патронного типа:

1а, 1б — фильтрующие элементы; 2а, 2б — краны пробкового типа; 3 — цилиндр экструдера; 4 — электрообогрев; 5 — отверстия для термопар

Рис. 4.56. Фильтр ленточного типа:

1 — лента фильтрующей сетки; 2 — кассета; 3 — входной блок охлаждения; 4 — теплоизолирующая перемычка; 5, 12 — детали корпуса фильтра; 6 — решетка; 7 — выходной блок охлаждения; 8, 10 — электрообогрев; 9 — слой отвердевшего на сетке полимера; 11 — крепежные отверстия



0,3–1 с) и скачкообразное возрастание ее (иногда на 15–20%) непосредственно после смены не могут быть скомпенсированы системой автоматики, общая инерционность которой при возмущениях подобного рода составляет порядка десятков секунд. Произведенная за этот период продукция может быть некондиционной и если она не находит применения, то ее необходимо причислить к возвратным потерям материала при замене элементов. В установках большой производительности эти потери могут достигать 10 кг. Этого недостатка лишена конструкция фильтра с практически непрерывным обновлением фильтрующей поверхности. Она рассмотрена ниже.

Корпус фильтра, схема которого показана на рис. 4.5б, состоит из двух стянутых между собой половин 5 и 12, причем вторая из них обращенным к нам отверстием соединяется с цилиндром экструдера. Между этими половинами установлена решетка 6, являющаяся опорой для фильтрующей сетки 1 на рабочем ее участке. При отсутствии в фильтре расплава сматываемая из рулона в кассете 2 лента сетки может беспрепятственно протягиваться через плоскую щель между половинами корпуса.

При работе фильтра расплав, находящийся перед сеткой под давлением, затекает в зазор А щели. Однако входной блок охлаждения 3 поддерживает температуру стенок щели в области перемычки 4 ниже температуры отвердевания полимера, и по этой причине расплав в щели на входе в область перемычки отвердевает и дальше в щель не затекает. Точно так же расплав затекает и в гораздо больший по величине зазор Б, через который попадает в полость В. Выходной блок охлаждения 7 охлаждает полость В, и расплав в ней отвердевает, монолитизируясь с расположенным здесь участком сетки. Нагреватель 10, однако, постоянно включен, и поэтому полимер в зазоре Б и прилегающей к нему области В' полости В все время пребывает в состоянии расплава. Действующее в области В' давление расплава стремится вытолкнуть вправо пробку отвердевшего в полости В полимера вместе с сеткой, однако этому препятствует сужение полости в месте Г.

При достижении некоторой степени засоренности рабочего участка сетки возникает необходимость частичного или полного обновления его поверхности за счет смещения сетки вправо. Включают на некоторое время нагреватель 8, он подплавляет расплав в месте сужения Г, благодаря чему пробка под воздействием давления в области В' смещается вправо, увлекая за собой сетку, и выдавливает наружу образовавшийся в месте Г расплав. Таким образом, степень обновления фильтрующей поверхности определяется величиной смещения сетки, т.е. количеством подплавившегося в сужении Г полимера, которое может регулироваться временем теплового импульса от нагревателя 8. Команду на включение нагревателя может давать контур автоматического управления, принимающий сигнал от датчика давления расплава перед фильтром и сравнивающий этот сигнал с заданной максимально допустимой величиной его. Емкость кассеты оказывается достаточной для непрерывной работы фильтра без перезарядки рулона в течение восьми месяцев. Вместе с тем при работе с материалом повышенной загрязненности возможно достижение скорости смещения сетки, равной 4 диаметрам рабочего отверстия в час.

В заключение следует отметить, что хотя фильтры и нельзя отнести к категории формующего инструмента, выбор той или иной конструкции его определяется преимущественно типом того изделия, для которого проектируется головка, и выбор этот, естественно, должен быть сделан конструктором головки.

## ФОРМЫ ДЛЯ РАЗДУВНОГО ФОРМОВАНИЯ

Диапазон габаритов и массы полых изделий, изготавливаемых раздувным формованием из термопластов, чрезвычайно широк. Преимущественно это тара для жидких, сыпучих и пастообразных продуктов самого различного назначения, имеющая емкость от нескольких миллилитров до 2–3 м<sup>3</sup> (наиболее распространена тара емкостью от 100 мл до 20 л).

### 5.1. Общее устройство и классификация форм

Конструктивная схема наиболее распространенного типа раздувной формы показана на рис. 5.1. Все формы состоят из двух полуформ I и II (здесь они показаны на промежуточной стадии смыкания в направлении, отмеченном стрелками „а”, при уже расположенной между ними трубчатой заготовке расплава термопласта 10). Полуформы крепятся к плитам 5 и 12 механизма смыкания раздувного агрегата винтами, которые заводятся в проушины 11 крепежных плит 7. Две формообразующие детали – полуматрицы 4 и 13 в сомкнутом состоянии образуют оформляющую полость 15, в которой осуществляется заготовка, будучи пережатой вверху и внизу пресс-кантами 1 и 6 соответственно (в пережатом состоянии контур заготовки показан на виде А). Конфигурация контактирующих с заготовкой поверхностей нижнего пресс-канта такова, что в ней при пережиме остается отверстие, через которое в полость заготовки вводится раздувной ниппель 14. Через ниппель подается в заготовку под давлением воздух для ее раздува до полного облегания ею формообразующей поверхности оформляющей полости. Заклученный в оформляющей полости воздух раздувающейся заготовкой отжимается через каналы системы вентиляции (на рис. 5.1 не показаны) в окружающее пространство.

Отформованное изделие охлаждается, отдавая тепло холодным полуматрицам, от которых оно отводится охлаждающей водой, протекающей по каналам 3 системы охлаждения. Эта система включает в себя также и автономные контуры каналов 8 и 2, выполненные в верхних и нижних пресс-кантах.

При смыкании полуформы центрируются элементами направляющей системы. Ими в данном случае являются направляющие колонки 9 и сопрягающиеся с ними втулки (размещены в полуформе I, на чертеже не показаны). Как правило, форма оснащена четырьмя комплектами колонок и втулок, расположенными по ее углам. Их конструкция полностью такая же, как и у литевых и прессовых форм и поэтому в данной главе не рассматривается.

При раскрытии полуформа отформованное изделие остается надетым на ниппель. Ниппель, как правило, выполняется подвижным таким образом, что выводит изделие из пространства между полуформами тем или иным способом. Однако конфигурация изделия может быть

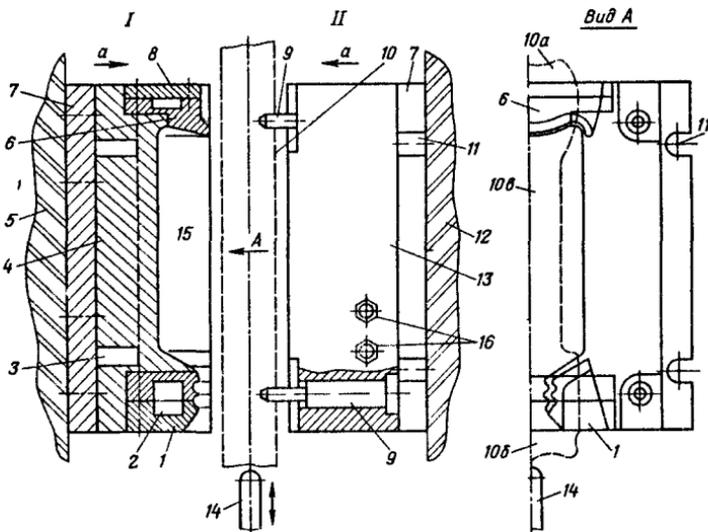


Рис. 5.1. Форма для раздува изделия через ниппель:

1 — нижний пресс-конт; 2 — канал охлаждения нижнего пресс-канта; 3 — канал охлаждения полуматрицы; 4; 5 — плита механизма смыкания; 6 — верхний пресс-конт; 7 — крепежные плиты полуматрицы; 8 — канал охлаждения верхнего пресс-канта; 9 — направляющие колонки; 10 — заготовка расплава; 11 — проушины крепежных плит; 12 — плита механизма смыкания; 13 — полуматрица; 14 — ниппель; 15 — оформляющая полость; 16 — штуцеры канала охлаждения полуматрицы

такой, что при размыкании оно остается в одной из полуформ и не может быть изъято из нее до тех пор, пока она не придет в положение, близкое к крайнему разомкнутому (например, до тех пор, пока подвижный формующий знак в процессе размыкания полностью не выйдет за пределы отформованного им у изделия поднутрения). В этом случае полуформа, в которой остается изделие, должна быть оснащена системой выталкивания, конструкция которой во многом подобна таковой у литьевых и прессовых форм (в этой главе также не рассматривается).

При смыкании полуформ верхний 10а и нижний 10б излишки заготовки отжимаются от той ее части 10е, которая оказывается в оформляющей полости, однако по рассмотренным ниже причинам полностью от нее не отделяются (между ними остается тонкая перемычка). При изъятии изделия из формы эти излишки (грат, см. также рис. 5.3,а) оказываются связанными с ним перемычками. Грат удаляется затем с изделия вручную или каким-либо механизированным способом. При производстве же массовых изделий форму часто оснащают системой для удаления грата с изделия. Эта операция выполняется системой автоматически в процессе размыкания формы и извлечения изделия.

При формовании крупных изделий часто усилие запираения полуформ оказывается недостаточным, чтобы противостоять распорному усилию, возникающему между ними от давления раздувающего воздуха в оформляющей полости. Это приводит к частичному раскры-

тию формы и разрыву изделия. В тех случаях, когда при проектировании формы несложный расчет показывает, что усилие запираания данного механизма смыкания недостаточно, в форме предусматривают систему индивидуального запираания той или иной конструкции. Пример такой системы показан на рис. 5.2. При смыкании полуформ 2 серьга 3 одной полуформы входит в пространство между проушинами 1 другой полуформы, причем выполненные в них вырезы совмещаются. Затем пневмоцилиндр 4 вводит в совмещенные вырезы клин 5, который предотвращает возможность разобщения серьги и проушин (т.е. возможность разобщения полуформ 2). Большие полуформы оснащаются как минимум четырьмя комплектами таких запирающих устройств.

Как видно из рассмотренного, раздувные формы включают в себя ряд групп (систем) деталей и элементов их конструкций, отличающихся друг от друга своим назначением, причем часть этих систем является обязательной для любой формы; другие же системы вводятся в конструкцию формы в случае возникновения необходимости в них.

К категории обязательных систем относятся: 1) система формообразующих деталей (полуматрицы, формирующие знаки); 2) система пресс-кантов; 3) система охлаждения; 4) система вентиляции; 5) направляющая система.

К категории необязательных систем относятся: 1) автономная система запираания полуформ; 2) система выталкивания; 3) система отделения грата от изделия.

Общее конструктивное исполнение раздувных форм не столь разнообразно, как у прессовых и литьевых форм. Здесь можно выделить только два основных признака, по которым их целесообразно классифицировать: по способу раздува заготовки в оформляющей полости и по материалам и, соответственно, технологии изготовления формообразующих деталей (конкретно, полуформ). Основные отличия форм по первому из этих признаков рассмотрены ниже; особенности конструкций в соответствии со вторым признаком приведены в следующем разделе.

Применяются три способа раздува: посредством раздувающего ниппеля (см. рис. 5.1); посредством подачи воздуха через дорн раздувной головки; посредством подачи воздуха через раздувную иглу, прокалывающую заготовку, зажатую в форме.

Выбор способа раздува зависит в основном от конфигурации и назначения изделия. Подавляющее большинство раздувных изделий — это тара многократного и разового использования, имеющая горловину (с резьбой или без нее) для затаривания и надежной укупорки хранимого продукта. При этом все емкости можно разделить на две группы: с узкой горловиной и с широкой горловиной.

Рассмотрим принцип выбора способа раздува в зависимости от относительного размера горловины изделия. Показанный на рис. 5.3, а принцип раздува через ниппель 3 уже рассмотрен выше. При раздуве через головку (рис. 5.3, б) полуформы 4, смыкаясь, захватывают и

Рис. 5.2. Механизм записания крупногабаритных форм:

1 — проушины; 2 — полуформы; 3 — серьги; 4 — пневмоцилиндры; 5 — клинья; 6 — плоскость смыкания; 7 — оформляющая полость одной из полуформ

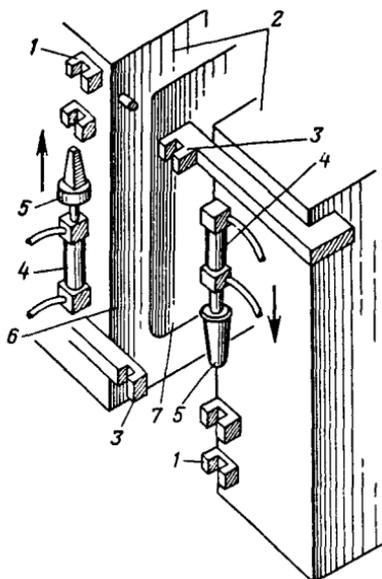
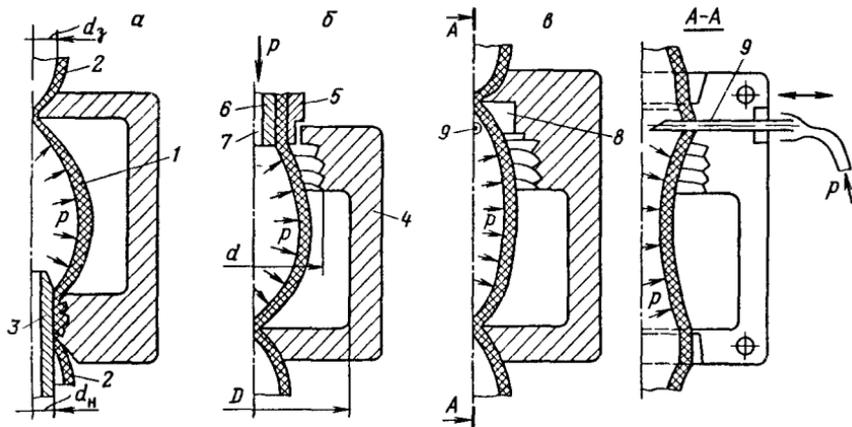


Рис. 5.3. Способы раздува заготовки в форме:

а — раздув через ниппель; б — раздув через головку; в — раздув через иглу; 1 — часть заготовки, из которой формируется изделие; 2 — грат; 3 — раздувной ниппель; 4 — полуформа; 5 — мундштук; 6 — дорн головки; 7 — отверстие в дорне для подачи раздувающего воздуха; 8 — технологическая полость для части заготовки, в которую вводится игла; 9 — раздувная игла



пережимают нижнюю часть заготовки, которая экструдирована через кольцевой формирующий канал, образованный мундштуком 5 и дорном 6 головки. Верхние части полуформ охватывают при этом концевую часть мундштука. Раздувающий воздух подается через отверстие 7 в дорне. При раздуве через иглу (рис. 5.3, в) полуформы пережимают заготовку в верхней и нижней ее части. Оформляющая полость полуформ имеет дополнительную, технологическую полость 8. В эту полость через отверстие в теле полуформ вводится раздувная игла 9, протыкающая заготовку и затем подающая в нее воздух. Часть заготовки, отформованная в технологической полости, отрезается от

изделия после извлечения его из формы. Игла 9 может размещаться в теле формы как в плоскости смыкания полуформ (см. рис. 5.3, в), так и в любой другой плоскости, однако, размещение в плоскости смыкания предпочтительно: в этом варианте заготовка в месте прокола надежно зажата между полуформами, так что ее отжима от внедряющейся иглы не происходит, гарантия сквозного прокола обеспечена.

Обозначим символами  $d_3$ ,  $d$  и  $D$  диаметр заготовки, горловины и наружный диаметр (или максимальный поперечный размер) изделия соответственно (см. рис. 5.3). Степень поперечной вытяжки заготовки при раздуве ее принято характеризовать коэффициентом раздува  $k$ :

$$k = D/d_3. \quad (5.1)$$

Реализуемые на практике значения  $k$  лежат обычно в диапазоне 2,5–3,5, причем предпочтительны большие его значения по ряду соображений (например, размеры дорна и мундштука и, следовательно, головки в целом для данного изделия в этом случае минимальны). Этими соображениями и определяется диаметр заготовки  $d_3$ :

$$d_3 = D/K_{\max}. \quad (5.2)$$

Раздув через ниппель предпочтителен по сравнению с другими способами: изделие после раскрытия формы остается на ниппеле, что упрощает конструктивные решения, связанные с автоматизацией последующей обработки изделия; размерная точность горловины обеспечивается как по наружной, так и по внутренней поверхностям ее (сравнить позицию „а” с позициями „б” и „в” на рис. 5.3); имеются и другие преимущества. Однако у этого способа имеется ограничение

$$d_n < d_3, \quad (5.3)$$

которое ясно из рис. 5.3, а: если диаметр ниппеля  $d_n$  больше диаметра заготовки  $d_3$ , то последняя не сможет надеться на него.

Имея в виду очевидное равенство

$$d = d_n, \quad (5.4)$$

ограничение (5.3) представим в следующей форме:

$$d < d_3. \quad (5.5)$$

Наконец, введя в (5.5) равенство (5.2), получаем соотношение

$$d < D/K_{\max}, \quad (5.6)$$

определяющее категорию узкогорлых изделий, которые могут быть отформованы раздувом через ниппель. Изделия с большим размером горловины (или каким-либо функциональным отверстием) должны формоваться раздувом через головку или иглу. Следует при этом отметить, что при реализации раздува через головку возникает ряд сложно решаемых вопросов: центровка формы по головке, минимизация теплообмена между ними в случае их контакта, предотвращение залипания части заготовки на торцевую поверхность мундштука и др.

По этой причине раздув через головку используется редко. К тому же раздувом через иглу можно формировать и полностью замкнутые (в конечном виде) изделия, так как закупорка малого отверстия от иглы технически не сложна.

Раздувные формы так же, как и литьевые и прессовые, могут быть одногнездными и многогнездными. В последнем случае в пространство между полуформами подается одновременно несколько заготовок, например, экструдированных из многоручьевого головки.

При проектировании раздувных форм необходимо соблюдать соответствие ее параметров параметрам механизма смыкания форм раздувной установки. Факторы, определяющие это соответствие, принципиально такие же, как и для прессовых (или литьевых) форм.

Во-первых, необходимое усилие смыкания полуформ на стадии обжима заготовки пресс-кантами  $F_0$ , а также необходимое усилие загираания полуформ на стадии выдержки отформованной заготовки в форме под давлением воздуха  $F_B$  не должны превышать усилия смыкания  $F_M$ , развиваемого механизмом смыкания:

$$а) F_0 \leq F_M; \quad б) F_B \leq F_M. \quad (5.7)$$

Во-вторых, оформляющая полость (или несколько полостей в многогнездной форме) должна быть размещена в форме таким образом, чтобы вектор распорного усилия полуформ, вызванного давлением воздуха в полости (полостях), был совмещен с главной осью механизма смыкания; иными словами, направление этого вектора должно проходить через геометрический центр плит. В противном случае, если к тому же величины  $F_B$  и  $F_M$  близки друг к другу, возможна частичная неравномерная по плоскости смыкания и неодинаковая от цикла к циклу потеря контакта между полуформами и вследствие этого — увеличение колебания размеров изделий в направлении смыкания.

В-третьих, габариты формы в плане не должны превышать габаритов плит механизма. В противном случае, если к тому же пресс-канты окажутся в непосредственной близости к краям плит или вне их габаритов, возможно неполное смыкание пресс-кантов и, как следствие, — толстый, трудно удаляемый грат, оставляющий заметный след на изделии.

В-четвертых, высота полуформ в сомкнутом состоянии  $h$  должна лежать внутри диапазона возможных высот  $h_{\min} - h_{\max}$  по технической характеристике раздувной установки:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}. \quad (5.8)$$

В-пятых, необходимый для извлечения отформованного изделия ход разъема полуформ  $s$  не должен превышать хода плит механизма смыкания  $S$ :

$$s < S. \quad (5.9)$$

При этом следует иметь в виду, что во многих конструкциях механизмов смыкания величина  $S$  оказывается зависимой от конкретного

значения  $h$  (подобно тому, как они взаимосвязаны у гидравлических прессов и пресс-форм).

Величина  $F_B$  определяется по формуле, смысл которой очевиден:

$$F_B = pfn, \quad (5.10)$$

где  $p$  – давление раздувающего воздуха;  $n$  – гнездность формы;  $f$  – площадь проекции оформляющей полости на плоскость смыкания полуформ. Способ определения величины  $F_0$  приведен в разделе, посвященном основам конструирования пресс-кантов.

Во всех случаях целесообразно конструировать формы с минимально возможной массой. Особо важно соблюдение этого требования для тех типов раздувных установок, у которых полуформы перемещаются не только при их смыкании, но и при переводе с позиции приема заготовки на позицию раздува, причем последнее перемещение выполняется с большой скоростью. Возникающие при этом инерционные силы вызывают износ подвижных элементов смыкания, пропорциональный массе форм.

## 5.2. Формообразующие детали

Максимальное значение давления, возникающего в оформляющей полости формы при раздуве заготовки и последующем охлаждении отформованного изделия, не превышает давления подаваемого на раздув воздуха, которое в сотни раз меньше давления расплава в оформляющих полостях прессовых и литевых форм (как правило, оно не превышает 0,5 МПа). Общий уровень напряжений в формообразующих деталях по этой причине намного ниже, и они в отличие от прессовых и литевых форм могут изготавливаться не только из инструментальных сталей, но и из других, менее прочных и вместе с тем более технологичных материалов: литьем из сплавов на основе алюминия (силуминов) и цинка (например, из сплава состава цин+алюминий+медь); формованием из высоконаполненных реакционноспособных композиций; образованием формообразующей поверхности методом гальванопластики или плазменного напыления.

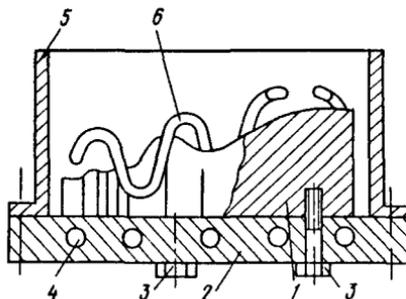
Ниже дана краткая характеристика каждого из этих методов изготовления формообразующих деталей.

**Метод точного литья** из алюминия или сплавов на основе цинка позволяет достигать точности воспроизведения элементов формообразующей поверхности, соответствующей 8-му качеству, при минимально возможной шероховатости поверхности, равной  $Ra/0,4$  (соответствует шероховатости при чистовой шлифовке).

Схема оснастки, используемой для отливки полуформ, показана на рис. 5.4. Изготовленная из стали модель 1 крепится к подмодельной плите 2 (например, болтами 3), после чего плита соединяется с опокой 5. В подмодельной плите выполнены каналы для водяного охлаждения ее 4. Желательно, чтобы такие же каналы были и в теле модели (у крупных моделей – обязательно).

Рис. 5.4. Схема оснастки для литья формообразующих деталей из цветных металлов:

1 — модель; 2 — подмодельная плита; 3 — болты крепления модели к плите; 4 — каналы охлаждения подмодельной плиты и модели; 5 — опока; 6 — трубка-змеевик системы охлаждения отливаемой полуматрицы



В полость опоки заливается металл, где он и охлаждается, кристаллизуясь. Расплав должен кристаллизоваться с максимально возможной скоростью у тех поверхностей оснастки, которые образуют лицевые поверхности полуматрицы (формообразующую поверхность и поверхность смыкания). При быстрой кристаллизации образуется мелкокристаллическая, плотная, практически не пористая структура, обеспечивающая хорошее качество поверхности. Далее, при отверждении отливки фронт кристаллизации должен распространяться от указанных поверхностей вглубь ее: образовавшаяся в этом случае в первую очередь на них корка отвердевшего металла практически не имеет усадки.

Наконец, кристаллизация расплава должна начинаться не в момент касания фронтом его потока поверхностей оснастки, а спустя некоторое время после заполнения полости опоки: при этом обеспечивается максимально удовлетворительное воспроизведение всех тонких элементов поверхности модели. Все эти три условия обеспечиваются, если заливку ведут в предварительно подогретую до 623–673 К оснастку и непосредственно после заливки подают в каналы охлаждающую жидкость.

Такая технология изготовления формообразующих деталей позволяет выполнять в них каналы (или полости) системы охлаждения непосредственно в процессе заливки. Для этого перед заливкой в полости опоки монтируют трубку 6, которую, изгибая, формируют таким образом, чтобы она практически целиком располагалась в непосредственной близости от будущей оформляющей полости полуматрицы примерно на одинаковом расстоянии от нее. При такой конфигурации и расположении канала охлаждения обеспечивается более интенсивное и однородное охлаждение изделия в форме, чем при выполнении каналов охлаждения сверлением.

При отливке полуматриц из цинковых сплавов возможна заливка трубок из меди. При отливке из алюминия медные трубки могут не выдерживать высокой температуры расплава металла; в этом случае используют стальные трубки. Следует отметить, что в алюминиевых формах заливка змеевика — единственно возможный способ выполнения каналов системы охлаждения непосредственно в теле формообразующей детали, так как несмотря на рассмотренный выше прием

заливки материал формы оказывается пористым, и при выполнении сверленных каналов охлаждающая вода может через поры просачиваться к формообразующей поверхности. Последнее часто приводит к браку поверхности изделия.

**Метод формования из высоконаполненных композиций** по используемой оснастке принципиально близок к рассмотренному способу литья, однако модель, подмодельная плита и опока (см. рис. 5.4) могут изготавливаться в данном случае не только из стали, причем их охлаждения не требуется. В качестве модели может использоваться непосредственно оригинал полого изделия, для производства которого изготавливается форма; изделие при этом разрезается на две половины по линии, соответствующей линии пересечения поверхности разреза полумформ с их оформляющей поверхностью. Каждая из этих половин используется для формовки соответствующей полуматрицы. Перед закреплением на подмодельной плите полость половины изделия заполняется каким-либо твердеющим материалом (например, гипсом) для придания ей надлежащей жесткости. Материалами модели могут также быть твердые породы дерева, гипс, отверждаемые на холоду полимерные композиции, цветные металлы.

В отличие от способа отливки из сплавов цветных металлов здесь требуется предварительная обработка поверхности модели, плиты и опоки. Первая цель обработки – предотвращение адгезии к ним формовочной массы. Вторая цель – обеспечение требуемого качества формообразующей поверхности и поверхности смыкания формируемой полуматрицы.

Если модель изготовлена из пористого относительно мягкого материала (гипса, дерева), материал, не способный обеспечить требуемую чистоту поверхности, то выполняется поверхностная пропитка (покрытие) твердеющей полимерной композицией или лаком, имеющими в отвержденном состоянии твердость, достаточную для получения при последующей шлифовке и полировке необходимой чистоты. В любом случае модель в сборе с плитой и опока покрываются разделительным антиадгезионным слоем. Этот слой может быть образован, например, напылением раствора восковой композиции в скипидаре, поливинилового спирта в воде и др. с последующей сушкой растворителя.

Заливочные композиции, как правило, состоят на основе полиэфирных и эпоксидных смол. Комплекс свойств, которыми должна обладать заливочная композиция, таков: способность к образованию глянцевого беспористой поверхности без микро- и макронеровностей (необходимость этого требования очевидна); хорошая текучесть, необходимая для точного воспроизведения деталей рельефа поверхности модели; практически нулевая или, по возможности, минимальная усадка при отверждении, что нужно для достижения возможно более точного размерного соответствия модели и полученного с нее слепка в виде оформляющей полости полуматрицы; способность противостоять напряжениям сжатия, практически не превыша-

ющим давления раздувающего воздуха; хорошая теплопроводность, обеспечивающая высокую интенсивность охлаждения формируемого в полуматрицах изделия.

Ни одна из указанных выше смол не обладает всеми этими свойствами в равной мере (можно лишь отметить, что обе они имеют достаточную прочность и недопустимо малую теплопроводность). Так, полиэфирные смолы обеспечивают нужный глянец поверхности и имеют значительно большую текучесть, т.е. способны хорошо воспроизводить фактуру и качество поверхности модели; однако они имеют большую усадку, которая, если полуматрицу целиком отливать из этой смолы, может привести не только к существенному несоответствию размеров модели и полости в полуматрице, но и к значительным макроискажениям геометрии как полости, так и поверхности смыкания (например, появлению общей ее неплоскостности, усадочных вмятин). Эпоксидные же смолы, не обладая в должной мере первыми двумя свойствами, имеют практически нулевую усадку.

В связи с отмеченным здесь соотношением свойств обоих типов смол при формировании полуматриц предпочтительно использовать не одну из них, а обе вместе. Из полиэфирных смол формируют лицевой слой малой толщины (1–5 мм в зависимости от габаритов формы), образующий поверхности полости и плоскости смыкания, а из эпоксидных смол – основное тело полуматрицы. Последовательность технологических операций при формовке в этом случае следующая. На поверхности модели и плиты наносят последовательно несколько слоев полиэфирной композиции (проводя отверждение каждого предыдущего перед нанесением последующего). Для лучшего сцепления с основным телом полуматрицы последний слой покрывают пропитанным полиэфирной же смолой стекловолокном в виде ровницы или отдельных часто уложенных стекложгутов. После отверждения последнего слоя с этим покрытием в опоку заливают эпоксидную композицию.

С целью увеличения теплопроводности тела полимерной полуматрицы применяют композиции на основе указанных смол с большой степенью наполнения их высокотеплопроводным материалом. Наилучшим с этой точки зрения материалом является металл (сталь, латунь, бронза, медь). Он может использоваться в виде отходов от обработки резанием (мелкая стружка, опилки). Однако в такой форме для наполнения композиции облицовочного слоя металл неприемлем. Требуемое качество поверхности этого слоя может быть получено только при введении тонкодисперсного наполнителя. В связи с этим для облицовочного слоя используют полиэфирные смолы, наполненные порошковыми графитом или металлом. Стоимость такой композиции велика, однако расход небольшой.

Так же, как и при отливке из металлов, в тело полуматрицы может заформовываться змеевик системы охлаждения. Как отмечалось, прочность этих композиций обеспечивает восприятие распределенных нагрузок от давления раздувающего воздуха, однако она явно недо-

статочна при локальных нагрузках, которые могут возникать в местах крепления к полуматрице других деталей (например, пресс-кантов и др.). По этой причине непосредственно в полимерном теле формы не могут выполняться крепежные резьбы; они выполняются в специальных металлических вставках, которые заформовываются в тело полуматриц. Таким же образом могут заформовываться направляющие колонки и втулки (рис. 5.5).

Направляющая втулка 5 (рис. 5.5, а) крепится к подмодельной плите 1 с помощью винта 7, шайбы 6 и центрирующего элемента 8 (о необходимости его сказано ниже) перед формованием лицевого слоя 3 и основного тела матрицы 4. Винт 7 обеспечивает надежный прижим торцов втулки 5 к поверхности подмодельной плиты и шайбы 6, что предотвращает проникновение связующего облицовочного слоя в полость втулки. Наружная поверхность втулки 5 имеет оребрение (или накатку) для надежного сцепления ее с материалом основного тела полуматрицы.

Способ крепления направляющей колонки 9 на плите 1 перед заливкой композиций ясен из рис. 5.5, б. Заформовываемая в полуматрицу часть колонки имеет аналогичное втулке 5 оребрение. Между буртом колонки и подмодельной плитой 1 вводится проставка 10, которая после отверждения полуматрицы и освобождения ее от опоки с подмодельной плитой снимается с колонки 9. Образование этой проставкой заглупление на поверхности смыкания полуматрицы предотвращает контакт торца втулки 5 и бурта колонки 9 при смыкании полуформ в процессе их работы; тем самым обеспечивается надежный контакт полуформ по всей их поверхности смыкания.

Технология заформовки в тело полуматриц направляющих колонок и втулок должна обеспечивать строгую их соосность в обоих полуформах при смыкании последних (как правило, полуформы оснащаются четырьмя комплектами втулок и колонок). В представленном на

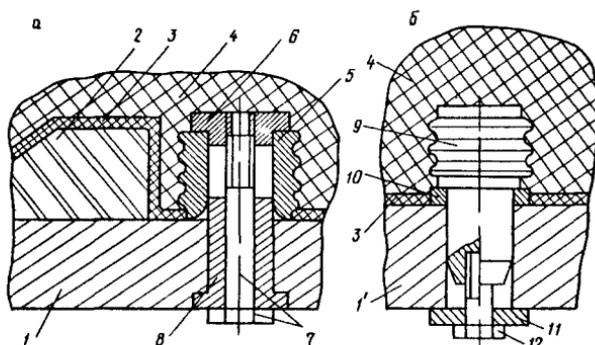


Рис. 5.5. Направляющие втулка (а) и колонка (б), заформованные в тело полуматрицы:  
1, 1' — подмодельные плиты для двух сопрягаемых полуматриц; 2 — модель; 3 — облицовочный слой полуматрицы; 4 — тело полуматрицы; 5 — направляющая втулка; 6 — шайба; 7 — винт; 8 — центрирующий элемент; 9 — направляющая колонка; 10 — проставка; 11 — шайба; 12 — винт

рис. 5.5 варианте эта соосность достигается тем, что крепежные отверстия приняты равными по диаметру в обеих подмодельных плитах 1 и 1', что позволяет выполнить их одновременно в обеих плитах в сборе. Такой прием полностью исключает погрешность взаимного расположения этих отверстий. При заформовке же колпачок и втулок в сопрягаемые полуматрицы они центрируются по этим отверстиям: колонка 9 центрируется непосредственно установкой в это отверстие плиты 1, а втулка 5 — центрирующим элементом 8, вводимым в соответствующее отверстие плиты 1.

Так же, как и при отливке из цветных сплавов, в тело полуматриц из наполненных оксидных композиций могут заформовываться змеевики системы охлаждения. При изготовлении крупных полуматриц (размером более 400 мм) в тело полуматриц заформовывается также армирующий сварной проволочный каркас, повышающий их общую прочность.

**Метод гальванопластики** сочетает в себе преимущество двух выше рассмотренных методов. Так, этим методом могут быть изготовлены полностью металлические формы, что обеспечивает интенсивный отвод тепла от формируемого изделия. Вместе с тем для их изготовления не требуется стальной модели изделия, как это имеет место при отливке из цветных сплавов. Модель может быть выполнена точно так же, как и при формовке из полимерных композиций; дополнительные требования к материалу модели заключаются в том, что он должен быть стойким к водным растворам кислот, щелочей и обезжиривающих веществ. Эти свойства могут быть достигнуты соответствующей поверхностной обработкой моделей из указанных выше материалов. Для моделей могут быть использованы также полиэфирные, оксидные и акриловые отверждаемые на холоду смолы.

Сущность метода заключается в получении путем электрохимического осаждения металла на модель и подмодельную плиту тонкой „корки” (слепка), поверхность которой в дальнейшем образует формирующую полость и плоскость смыкания полуформы. Полученный таким образом слепок вставляется затем в опоку, образуя ее дно, и в опоку заливается какой-либо из указанных выше сплавов (возможна заливка и олигомерных отверждающихся наполненных композиций).

Получение гальванопластического слепка включает в себя следующие стадии: изготовление модели и подмодельной плиты, их взаимное крепление и укрепление на них тоководов; нанесение на собранную таким образом конструкцию токопроводного слоя; электрохимическое наращивание рабочего слоя (из одного или нескольких металлов), обеспечивающего требуемые эксплуатационные свойства поверхности формирующей полости; электрохимическое наращивание конструкционного слоя, обеспечивающего требуемую жесткость слепка при последующей его обработке; механическая обработка краев слепка (совместно с моделью и подмодельной плитой или в снятом с них состоянии) до размеров, соответствующих условиям монтажа его в опоку.

На рис. 5.6 показана модель 1 в сборе с подмодельной плитой 2 (обе выполнены из неметаллического нетокопроводного материала) и

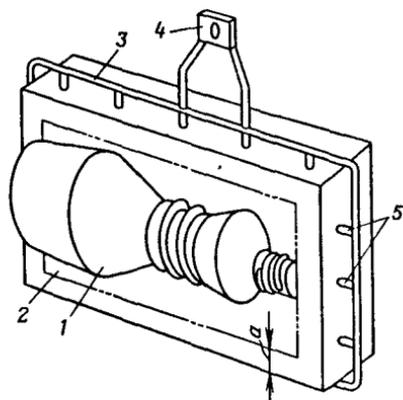


Рис. 5.6. Модель с подмодельной плитой, подготовленные для электрохимического осаждения:

1 — модель; 2 — подмодельная плита; 3 — токовод; 4 — элемент крепления токовода к катоду гальванической ванны; 5 — элементы подвода потенциала

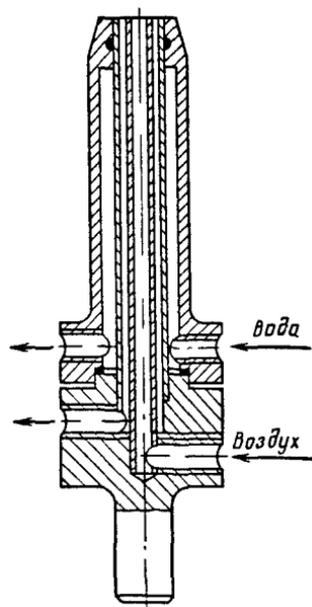


Рис. 5.7. Раздвунной ниппель, охлаждаемый водой

токовод 3 (выполненный из толстой медной или алюминиевой проволоки и укрепленный на подмодельной плите). Модель имеет припуск *a* по контуру для последующей механической обработки совместно с полученным слепком.

На смонтированную таким образом конструкцию наносится токопроводный слой, требования к которому таковы: минимально возможная толщина, не вносящая существенной погрешности в соответствие размеров модели и получаемого с нее слепка; большая электропроводность; монолитность (беспористость), глянецовость поверхности; хороший контакт с элементами 5 подвода электрического потенциала от токовода к токопроводному покрытию поверхностей модели и подмодельной плиты.

Этим требованиям удовлетворяют покрытия, полученные химическим меднением и серебрением. Толщина этих покрытий составляет 0,1–0,2 мк. Перед нанесением токопроводного слоя поверхности обезжириваются и активируются погружением в водный раствор  $\text{CuCl}_2 + \text{HCl}$ , что обеспечивает требуемую адгезию наносимого слоя к поверхности.

Наилучшими эксплуатационными свойствами (твердость и износостойкость) обладает рабочий слой слепка, образованный одновременным электрохимическим осаждением никеля и кобальта в соотношении 3:2. Покрытая токопроводным слоем модель погружается в гальваническую ванну с растворами  $\text{NiSO}_4$  и  $\text{CoSO}_4$  с присадками и укрепляется на катоде. Анодами, погруженными в ванну, служат пластины Ni и Co.

Несмотря на малое удельное сопротивление серебряного (или медного) токопроводящего слоя из-за очень малой его толщины распределение потенциала по его поверхности было бы очень неоднородным, если бы токовод контактировал со слоем только в одной точке. Скорость осаждения рабочего слоя в этом случае была бы существенно меньшей в местах поверхности, наиболее удаленных от точки контакта. Множественные, равномерно распределенные по периметру подмодельной плиты (см. рис. 5.6) элементы 5 контакта токовода с токопроводящим слоем обеспечивают однородное распределение потенциала по его поверхности и, как результат, однородную толщину рабочего слоя.

Получение плотного, качественного рабочего слоя возможно при очень малых скоростях осаждения, не превышающих  $10^{-2}$  мм/ч. Требуемая толщина рабочего слоя 0,8–1,5 мм. Процесс наращивания рабочего слоя длителен (7–10 сут), причем перерывы в процессе осаждения недопустимы. Это существенный недостаток метода.

Последующий, конструкционный слой толщиной 2–5 мм наращивают из более дешевого материала (меди) и при гораздо больших скоростях осаждения.

Механическую обработку готового слепка по контуру, показанному например, на рис. 5.6, выполняют до снятия его с модели твердосплавным инструментом.

Формы, изготовленные этим методом, имеют наивысшую стойкость по сравнению с формами из цветных сплавов и полимерных композиций (стойкость последних минимальна).

Твердость и износостойкость никель-кобальтовых слепков таковы, что они могут применяться также и при изготовлении литьевых и прессовых форм. Однако в этом случае основное тело формообразующей детали изготавливают из цветных сплавов или полимерных композиций можно лишь при небольшой серии формующих изделий: стойкость форм невелика из-за ползучести или растрескивания тела детали. Лучшие результаты дает формование тела детали плазменным напылением стали на изнаночную поверхность слепка.

При раздуве через ниппель он, как правило, также является и формообразующей деталью: его наружная поверхность оформляет внутреннюю цилиндрическую поверхность горловины изделия. В простейшем случае ниппель – это цилиндрический стержень с центральным отверстием для подачи воздуха в раздуваемую заготовку (см. рис. 5.3, а). Ниппель, формируя заготовку, должен, так же как и полуформы, отводить от нее тепло. Интенсивность охлаждения заготовки в область ниппеля должна быть не ниже, чем в области контакта с полуформами. Это возможно только при введении в тело ниппеля каналов водяного охлаждения.

Воздух, подаваемый в заготовку через ниппель, остается в отформованном изделии в течении всего времени его охлаждения в форме.

Масса этого воздуха не велика, и поэтому вклад теплообмена между воздухом и изделием в охлаждение последнего практически

неощутим. Для увеличения этого вклада обеспечивают постоянный интенсивный обмен воздуха в полости охлаждаемого изделия. При этом через ниппель воздух должен не только подаваться, но и отводиться. Конструкция такого ниппеля, имеющего водяное охлаждение, показана на рис. 5.7. Конец ниппеля конический, что повышает надежность надевания на него экструдированной заготовки в том случае, когда разность между ее внутренним диаметром и диаметром ниппеля невелика.

В месте обжима заготовки по ниппелю пресс-кантами полуформ в теле ниппеля возникают значительные напряжения, поэтому деталь ниппеля, непосредственно контактирующая с заготовкой, должна изготавливаться из конструкционных сталей и подвергаться термомеханической обработке.

При определении размеров элементов оформляющих полостей необходимо учитывать усадку размеров отформованного изделия, развивающуюся во время охлаждения его в форме. Усадка, так же как и при литье под давлением, может колебаться в широком диапазоне в зависимости от конфигурации изделия и типа размера. Так, усадка диаметра горловин, формируемых на ниппелях, минимальна: усадка протекает во время контакта горловины с ниппелем, который препятствует свободному ее развитию. Чем больше локальный коэффициент раздува участка заготовки, формирующего тот или иной элемент изделия, тем больше усадка размеров этого элемента. Диапазон возможных значений усадки (в %) для ряда материалов таков:

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| Полиэтилен высокой плотности | 1,2–3   |
| Полиэтилен низкой плотности  | 1,2–2   |
| Полипропилен                 | 1,2–2,2 |
| Поливинилхлорид              | 0,4–0,6 |

### 5.3. Пресс-канты

В местах пресс-кантов, осуществляющих пережим заготовки, возникают локальные напряжения, во много раз превосходящие по величине напряжения от раздувающего воздуха в основном теле формы. Пресс-канты, таким образом, так же как и ниппель, оказываются наиболее нагруженными элементами формы, подверженными интенсивному износу. Они работают удовлетворительно лишь в том случае, если изготовлены из качественных инструментальных сталей и подвергнуты термической обработке, обеспечивающей твердость до 50–55 единиц по Роквеллу. Как уже отмечалось, формообразующие детали, как правило, изготавливают из других, менее прочных материалов. В связи с этим пресс-канты выполняются в виде самостоятельных деталей, укрепляемых на полуматрицах. Они могут выполняться как в виде плит, укрепляемых внакладку на полуматрицу (рис. 5.8, а), так и в виде вставок в нее (рис. 5.8, б). Выполнение варианта „а” проще, однако в этом случае сложнее сместить след на изделии от линии стыка матрицы и пресс-канта в наименее заметное место (например, в донную часть изделия, как это сделано в варианте „б”).

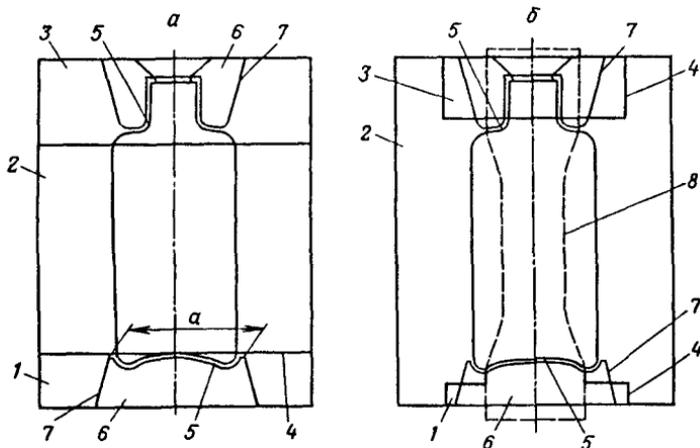


Рис. 5.8. Варианты выполнения деталей пресс-кантов в виде плит (а) и вставок (б):

1 — нижний пресс-кант; 2 — полуматрица; 3 — верхний пресс-кант; 4 — линия стыка между пресс-кантом и полуматрицей; 5 — отжимная кромка; 6 — карман; 7 — контур кармана

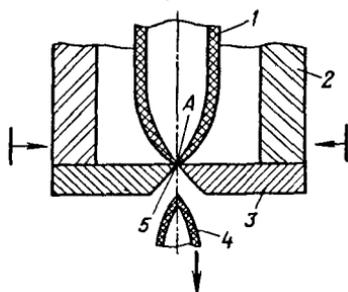


Рис. 5.9. Отрезание облоя острыми отжимными кромками:

1 — заготовка; 2 — полуматрица; 3 — пресс-кант; 4 — облой; 5 — отжимная кромка

Вместе с тем в варианте „б” краевые части отжимной кромки 5 (о ней см. ниже) оказываются неизбежно выполненными не в детали пресс-канта, а в полуматрице.

Основным рабочим органом пресс-канта является отжимная кромка, отделяющая излишки заготовки от формирующего изделия. При правильно выбранной ее геометрии обеспечиваются не только прочность изделия в месте отделения этих излишков (облоя), но и минимальная толщина перемычки (грата) между изделием и облоем.

На первый взгляд, выполнив кромки максимально острыми и обеспечив максимально возможное их сближение при смыкании полуформ, что технически вполне осуществимо (например, как на рис. 5.9), можно добиться полного отделения облоя без грата. Однако в этом случае прочность изделия в месте А пережима заготовки оказывается неудовлетворительной. Причина этого недостатка становится понятной при более детальном рассмотрении процесса отделения облоя.

На рис. 5.10, а показана заготовка в момент начала пережима ее пресс-кантами. В этот момент возник контакт между противоположными стенками заготовки в месте А. При дальнейшем сближении пресс-кантов боковые поверхности их Q отжимают материал деформи-

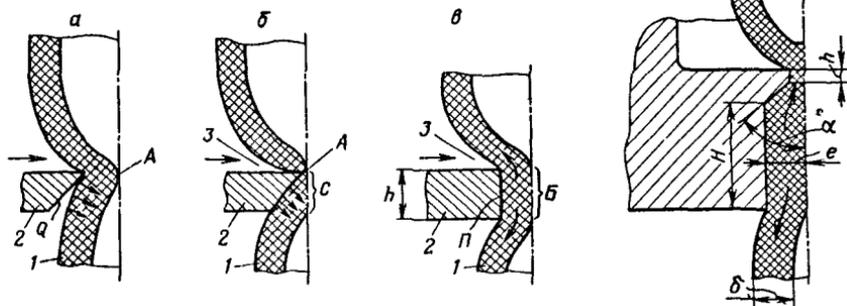


Рис. 5.10. К образованию сварного шва при острых и широких отжимных кромках:  
1 — облой; 2 — пресс-кант; 3 — оформляющая полость; а, б, в, Q, А, С, Б, П — пояснены в тексте

Рис. 5.11. Типовая конфигурация пресс-кантов

руемой заготовки в направлении, показанном стрелками, и поверхность контакта и сварки противоположных стенок заготовки развивается вниз от точки А. Таким образом, к моменту полного перерезания заготовки (рис. 5.10, б) область сварки стенок заготовки С оказывается практически полностью в облой, а не в изделии, как это необходимо.

Очевидно, конфигурация кромок должна быть такой, чтобы образующаяся область сварки хотя бы частично отжималась в оформляющую полость. Это возможно, например, при плоской конфигурации кромок, показанной на рис. 5.10, в. Однако в этом случае для отжима в сварной шов изделия достаточного количества расплава область деформации его между кромками Б должна быть большой; соответственно большой должна быть и ширина кромок  $h$ . При этой величине  $h$  напряжения сжатия расплава между кромками, создаваемые усилием смыкания полуформ, невелики, и расплав истекает из области Б с малой скоростью. Процесс пережатия заготовки по этой причине длителен, и за время его протекания на рабочей поверхности П холодной отжимной кромки успевает отвердеть достаточно толстый слой материала, который не может быть отжат из области Б и образует толстый грат.

Установленные здесь, казалось бы, взаимно противоречивые требования больших контактных напряжений в области пережима заготовки и вместе с тем большой площади пережима удовлетворяются при конфигурации пресс-кантов, показанной на рис. 5.11. Собственно отжимная кромка имеет ширину  $h$ , равную 0,3–0,6 мм для относительно малых изделий (объемом до 2 л) и достигающую 4 мм для изделий емкостью более 100 л. Угол  $\alpha$  лежит в пределах 25–45°. За отжимной кромкой расположено заглубление с глубиной  $e$  и высотой  $H$ , называемое карманом. Размер  $e$  принимают равным 0,8–0,9 от толщины стенки  $\delta$  пережимаемой заготовки; высота же кармана  $H$

определяется общей конструкцией деталей пресс-кантов, однако для образования удовлетворительного сварного шва на изделии она должна быть не менее  $(5 \div 6) \delta$ .

Процесс пережатия заготовки при данной конфигурации пресс-кантов протекает следующим образом. На первой стадии пережатия заготовки с ней контактирует только узкая отжимная кромка и постепенно входящая в контакт наклонная поверхность. Площадь расплавленной в пределах этого контакта зоны деформирования невелика, напряжения сжатия значительны, поэтому процесс пережима основной доли толщины заготовки протекает быстро, однако расплав из зоны деформирования отжимается преимущественно не в оформляющую полость (как следовало бы), а в карман (т.е. в облой). На завершающей же стадии, когда кромкой пережато уже 80–90% толщины заготовки (в зависимости от соотношения размеров  $e$  и  $\delta$ ), часть ее, образующая облой, входит в надежный контакт со сближающимися поверхностями кармана и начинает раздавливаться ими, причем расплав начинает не только истекать из кармана в атмосферу (на рис. 5.11 – вниз) или в еще не занятую им часть полости кармана (на рис. 5.11 – в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа), но и в еще существующий зазор между кромками, составляющий пока  $(0,1 \div 0,2) \delta$  (на рис. 5.11 – вверх).

Гидравлическое сопротивление истечению в последнем направлении намного больше, чем в остальных, поэтому доля втекающего в оформляющую полость расплава, формирующего сварной шов на изделии, невелика, однако оказывается вполне достаточной, так как деформированию подвергается большой объем расплава. Скорость пережатия на этой, завершающей стадии намного меньше, чем на предыдущей, так как напряжения сжатия расплава во много раз меньше. Однако суммарное время пережатия заготовки оказывается в итоге меньшим, чем в случае широких кромок по варианту на рис. 5.10, в, в результате чего получается достаточно тонкий грат.

Следует отметить, что карманы кроме основной своей функции – принятия в себя излишков формуемой заготовки и недопущения попадания их между плоскостями смыкания двух полуформ (в результате которого они не смогли бы смыкаться полностью) – выполняют еще одну, не менее важную функцию – охлаждения облоя. Если облой не охлаждать, то при съеме изделия из формы он, оставаясь в состоянии расплава и будучи соединен с изделием тонкой перемычкой грата, может прилипнуть к изделию, непоправимо испортив его. Необходимость надежного контакта облоя с поверхностями кармана для обеспечения интенсивного отвода тепла – это еще одна причина, по которой глубину кармана  $e$  (см. рис. 5.11) делают несколько меньшей, чем толщина заготовки  $\delta$ .

Размеры и конфигурация отжимных кромок и карманов в плоскости смыкания полуформы показаны на рис. 5.8. Их размер „а” должен быть не меньшим, чем ширина заготовки в пережатом состоянии (контур заготовки, который она приобретает после смыкания полуформ перед раздувом, показан на рис. 5.8, б).

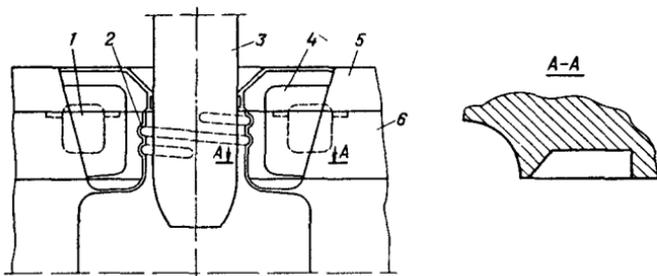


Рис. 5.12. Оформление отжимных кромок и кармана в месте у горловины изделия:

1 — канал водяного охлаждения деталей пресс-канта 5 и 6; 2 — отжимная кромка; 3 — ниппель; 4 — карман

Наиболее сложным является оформление кромок и карманов в области горловины изделия. Пример такого оформления приведен на рис. 5.12.

Необходимое усилие пережима заготовки (или нескольких заготовок при многогнездных формах)  $F_0$  можно рассматривать как сумму двух усилий  $F_0'$  и  $F_0''$ , необходимых для пережатия заготовки в области кромок и карманов соответственно. В настоящее время нет каких-либо расчетов, позволяющих достаточно точно определить  $F_0'$  и  $F_0''$ . Имеющиеся практические данные позволяют лишь ориентировочно считать, что если в процессе пережима между кромками возникает напряжение сжатия, близкое к 3 МПа, а в карманах облой сжимается при напряжениях около 0,4 МПа, то процесс пережима протекает с приемлемой скоростью и получаемая толщина грата допустима. Принимая во внимание эти соотношения, можно записать:

$$F_0 = F_0' + F_0'' = 3s' + 0,4s'', \quad (5.11)$$

где  $s'$  и  $s''$  — суммарные площади отжимных кромок и проекции облой в карманах на плоскость смыкания соответственно.

Следует попутно отметить, что размеры карманов в плане принимают такими, чтобы их объем был несколько больше объема попадающего в них облоя.

Пользуясь соотношением (5.7а) и (5.11), можно выполнять поверочные расчеты при выборе гнездности формы или, если изделие достаточно крупное и сложной конфигурации (т.е. с большим облоем), то и определять принципиальную возможность изготовления данного изделия на имеющемся в наличии выдувном агрегате.

Для ряда изделий в соотношении (5.11) к усилиям  $F_0'$  и  $F_0''$  должно добавляться еще одно слагаемое  $F_0'''$ . Это изделия, у которых формуется монолитные выступы за счет пережима заготовок. Пример формирования таким образом проушины с отверстием для установки в него какой-либо детали (например, ручки сосуда) приведен на рис. 5.13. Участок пережатой заготовки формует выступ 1, причем часть его уходит в облой 6. Отверстие в выступе по варианту „а” на рис. 5.13

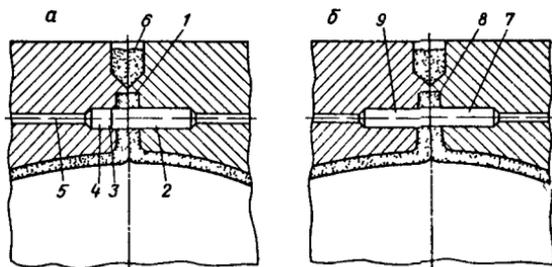


Рис. 5.13. Формование монолитных выступов:

а, б — см. пояснения в тексте: 1 — выступ на изделии; 2 — формирующий знак; 3 — выпрессовываемая при формовании отверстия часть расплава; 4 — отверстие в полуформе для приема выпрессовки; 5 — отверстие для подвода и выпрессовки сжатого воздуха; 6 — облой; 7, 9 — формирующие знаки; 8 — место стыка формирующих знаков

формируется знаком 2, запрессованным в отверстие в правой полуформе. Прошивая отверстие в выступе, выпрессовываемый им расплав 3 знак направляет в отверстие 4 левой полуформы, в которое он входит свободно. Охладившаяся выпрессовка 3 после раскрытия полуформ удаляется из отверстия 4 сжатым воздухом, который подается через отверстие 5. По варианту „б“ отверстие формируется двумя знаками 9 и 7, запрессованными в левую и правую полуформы и сближающимися при их смыкании. Остающийся в отформованном отверстии в месте сближения знаков 8 грат удаляется затем прошивкой или досверливанием.

Напряжения сжатия, которые развиваются в расплаве при формовании подобных монолитных выступов и перемычек, должны быть не ниже 0,8–1,0 МПа. Таким образом, величина  $F_0'''$  определяется так:

$$F_0''' = (0,8 \div 1,0) s''' \quad (5.12)$$

где  $s'''$  — площадь проекции формируемых выступов и перемычек на плоскость смыкания полуформ.

#### 5.4. Система охлаждения

Конфигурация и технология изготовления каналов системы охлаждения, как это видно из разд. 5.2, определяются технологией изготовления формообразующих деталей. Если последние изготавливаются путем обработки резанием из сталей, то каналы выполняются так же, как и в литевых формах, т.е. в виде замкнутого контура сверленных отверстий или фрезерованных полостей. Пример последнего варианта приведен на рис. 5.1. При изготовлении полуматриц заливкой в них заформовывается спрофилированный требуемым образом змеевик или применяются другие варианты систем, рассмотренные ниже.

Особо следует обратить внимание на охлаждение пресс-кантов. Время пребывания изделия в форме на этапе охлаждения очень часто определяется не временем охлаждения его стенки, как это может

показаться на первый взгляд, а временем охлаждения облоя в карманах. Такая ситуация ненормальна, так как охлаждение облоя не должно лимитировать время цикла формования. Причина же ее в том, что при одинаковой интенсивности теплосъема время охлаждения облоя больше из-за того, что он намного толще стенки изделия: толщина облоя равна, как это видно из предыдущего раздела, 1,6–1,8 толщины заготовки, а стенка изделия в 2,5–3,5 раза тоньше стенки заготовки (в соответствии с обычно принимаемыми значениями коэффициента радиува).

Отсюда очевидно, что если форма проектируется для изготовления крупной серии изделий на высокопроизводительном агрегате, то необходимо в ее конструкции предусматривать гораздо более интенсивное охлаждение пресс-кантов по сравнению с основным телом формы. В таких формах, как правило, предусматривают самостоятельные, изолированные системы каналов для пресс-кантов и тела формы с независимым регулированием расхода охлаждающей воды. При выполнении пресс-кантов в виде самостоятельных деталей это вполне технически осуществимо. В теле пресс-кантов предпочтительно выполнение каналов в виде полостей с большой поверхностью теплообмена, расположенной по возможности ближе к рабочим поверхностям карманов, как это показано на рис. 5.12.

Среди различных конструктивных вариантов систем охлаждения можно выделить несколько типов, отличающихся по тому или иному признаку:

1) по месту расположения каналов – а) выполненные непосредственно в теле полуматриц; б) выполненные в теле специальных охлаждающих плит, крепящихся к телу полуматриц;

2) по конфигурации каналов – а) канальные, состоящие из ряда сообщающихся цилиндрических каналов (сверленных в теле или заформованных в него в виде змеевика); б) полостные, состоящие из одной или нескольких сообщающихся полостей с развитой поверхностью;

3) по характеру течения воды в каналах (полостях) – а) системы с монолитным потоком; б) системы с разбрызгиванием воды из коллектора на поверхность полости.

Выбор того или иного из этих типов определяется в основном конфигурацией, толщиной стенок и габаритами изделия.

Системы, выполненные в отдельных охлаждающих плитах, достаточно распространены по следующим причинам. Во-первых, несмотря на отмеченное многообразие технологий изготовления полуматриц, преобладающим являются изготовление из алюминиевых отливок резанием или непосредственное литье без заформовки змеевиков. При выполнении же каналов в таких полуматрицах резанием, как отмечалось, пористость отливок может приводить к проникновению воды к формообразующей поверхности. Во-вторых, исполнение системы каналов или полостей в самостоятельной детали простой конфигурации (плоской плиты) более просто.

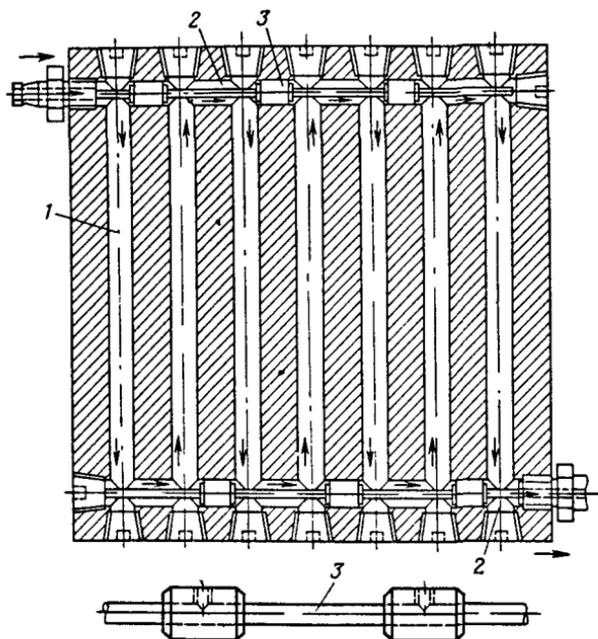


Рис. 5.14. Охлаждающая плита с системой сверленных каналов:

1 — продольные каналы; 2 — поперечные каналы; 3 — пробки

Плиты со сверленными каналами выполняются так, как это показано на рис. 5.14. С целью обеспечения последовательного протекания всего потока жидкости по каждому продольному каналу 1 в поперечный канал 2 вставляются фигурные пробки 3. Такой последовательный, а не параллельный характер течения в каналах обеспечивает более однородное распределение интенсивности теплосъема по всей площади плиты несмотря на то, что, казалось бы, из-за нагрева воды при прохождении по каналам интенсивность теплосъема в правом нижнем углу должна быть ниже, чем в левом верхнем. Дело в том, что из-за незначительных различий размеров продольных каналов гидравлическое сопротивление их различно и, следовательно, различны расходы в каналах при параллельном их соединении. В процессе эксплуатации в каналах с меньшим расходом более интенсивно образование отложений, что усугубляет неоднородность интенсивности теплосъема. Наконец, воздух, попавший в верхний поперечный канал (например, путем десорбции из поступающей в плиту воды), может при параллельном соединении продольных каналов блокировать часть из них.

Применение систем охлаждения рассмотренной конструкции ограничено плитами малых и средних размеров (до 350–400 мм) из-за осложнений, возникающих при сверлении на большую глубину. В

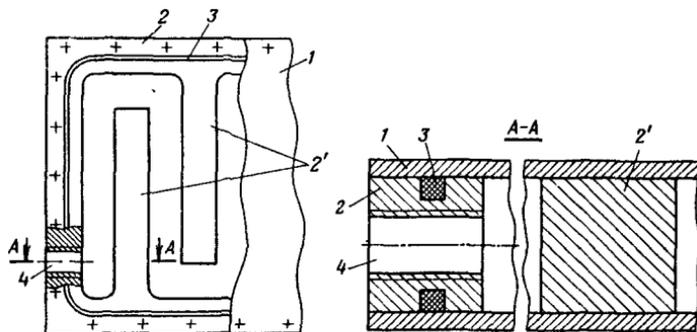


Рис. 5.15. Охлаждающая плита камерной системы:

1 — крышки; 2 — фигурная плита с перемычками 2'; 3 — уплотнение; 4 — отверстие для ввода воды

средних и больших плитах предпочтительно выполнять камерную систему охлаждения. Камерные конструкции плит состоят по крайней мере из двух, чаще из трех элементарных плит (рис. 5.15): двух крышек 1 и средней фигурной плиты 2 с размещенными меж ними уплотнениями 3, плита же 2 имеет два отверстия 4 для подвода и отвода воды.

При больших размерах плит их герметизация (например, по типу, показанному на рис. 5.15) становится ненадежной, так как даже незначительное избыточное давление в камере с монокотом жидкости вызывает очень большие распорные усилия. Система же с разбрызгиванием (рис. 5.16) позволяет поддерживать в камере атмосферное или даже несколько меньшее давление, что повышает надежность герметизации камеры.

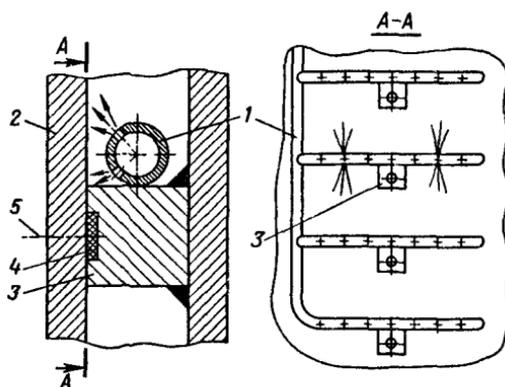


Рис. 5.16. Элементы конструкции охлаждающей плиты с разбрызгиванием:

1 — трубка с отверстиями для разбрызгивания; 2 — крышка плиты, контактирующая с формой; 3 — проставка; 4 — уплотнение; 5 — винт крепежа крышки к проставке

Конструкция охлаждающей плиты с разбрызгиванием близка по конструкции показанной на рис. 5.15, однако средняя плита в этом случае не имеет перемычек 2. В полости плиты размещена трубка 1 (см. рис. 5.16), имеющая ряд горизонтальных ответвлений, через которые разбрызгивается подаваемая в трубку 1 вода, причем разбрызгивается она на ту из крышек 2, которая контактирует с раздувной формой. Стекая по поверхности этой крышки, вода самотеком входит из полости плиты через расположенное внизу отверстие. В полости при этом имеет место практически атмосферное давление. Горизонтальные ответвления трубки 1 укреплены на проставках 3, количество и расположение которых выбирают из соображений достаточной общей жесткости плиты в сборе.

### 5.5. Система вентиляции оформляющих полостей

При экструзии с раздувом эта система имеет гораздо большее значение, чем при литье под давлением. Если при заполнении литьевой формы из нее вытесняется объем воздуха, равный объему поступающего в нее расплава (т.е. объему материала изделия), то при раздуве также за весьма короткий отрезок времени из оформляющей полости необходимо удалить объем воздуха, в десятки раз превышающий объем материала изделия, так как сами изделия полые. В этом случае выполнение системы вентиляции совершенно необходимо (в литьевых формах, как это видно из гл. 3, система вентиляции выполняется далеко не всегда).

Приемы, обеспечивающие удаление воздуха из оформляющей полости в атмосферу, довольно разнообразны. Наиболее распространенным является прием, принципиально невозможный при литье под давлением. Вязкость формуемого при раздуве расплава значительно выше, чем при литье под давлением, а нормальные напряжения, прижимающие расплав к формующей поверхности, в сотни раз меньше. По этой причине расплав не способен воспроизводить все микронеровности формующей поверхности, если она выполнена матовой (шероховатой). Через микроканалы, образованные шероховатой формующей

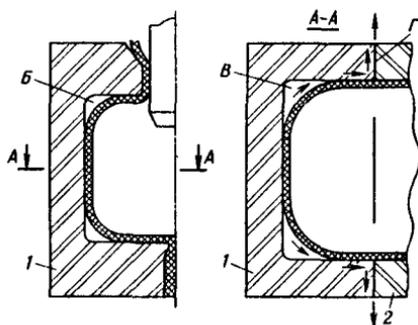


Рис. 5.17. Удаление воздуха из замкнутых раздуваемой заготовкой полостей Б и В;

1, 2 — полуформы; Г — поверхность их смыкания

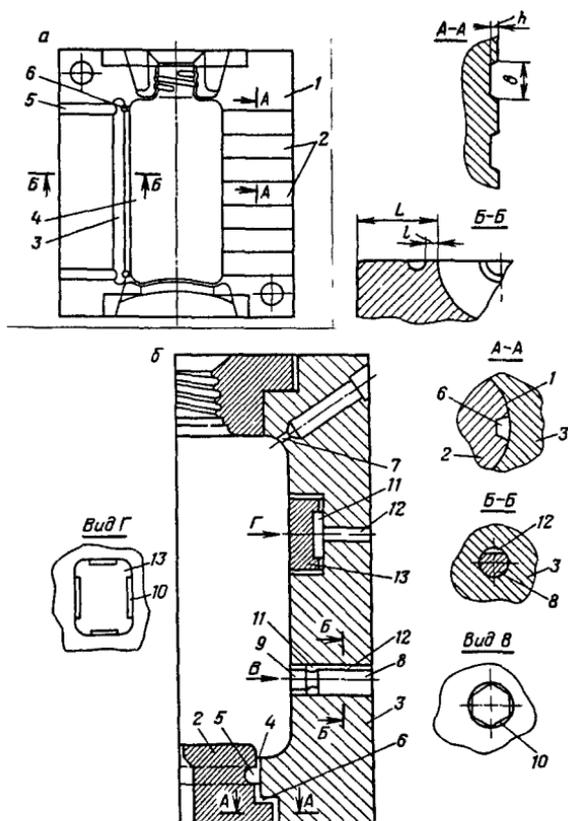


Рис. 5.18. Способы вентиляции оформляющей полости. Пояснения в тексте

поверхностью и поверхностью расплава, воздух, зажатый в тупиковых областях (например, областях Б и В на рис. 5.17), может отводиться к месту смыкания полуформ Г, откуда также через микроканалы, образованные при контакте поверхностей смыкания полуформ, он отводится в атмосферу. Такой способ вентиляции формы называют естественной вентиляцией. Ее интенсифицируют, применяя обработку формующей поверхности и поверхности смыкания, создающую сильно развитую шероховатость их с весьма малыми размерами микронеровностей. Для форм из алюминия и сплавов цветных металлов это может быть пескоструйная обработка. Стали такой обработке поддаются гораздо труднее, для них можно использовать электроэрозионную обработку поверхностей.

Участок микроканалов у поверхностей смыкания имеет значительное гидравлическое сопротивление. Его уменьшают, шлифуя на этих поверхностях 1 каналы 2, как это показано на рис. 5.18, а. Высота  $h$  и ширина  $b$  каналов составляют 0,1–0,3 мм и 5–30 мм соот-

ветственно в зависимости от габаритов изделия и толщины заготовки (большим их значениям соответствуют большие величины  $b$  и  $h$ ). Гидравлическое сопротивление микроканалов на поверхности смыкания уменьшают и иным образом (см. рис. 5.18, а): выполняя на этой поверхности дренажный канал 3 на расстоянии 4–10 мм от оформляющей полости 4. Дренажный канал соединен с каналами 5, отводящими воздух в атмосферу. Из-за большого сечения каналов 3 и 5 гидравлическое сопротивление их ничтожно мало по сравнению с сопротивлением микроканалов, так что при выполнении дренажа это последнее менее размера  $L$ . Помимо дренажного канала в тупиковых местах скопления воздуха (типа Б на рис. 5.17) выполняют дополнительно и отверстия Б (см. рис. 5.18, а) диаметром 0,1–0,3 мм.

Когда требуется получать изделия с высоким глянцем поверхности, формующую полость качественно полируют, и естественная вентиляция становится невозможной. В этом случае вентиляционные каналы выполняют не только на поверхности смыкания, но и в теле формы. Для их выполнения используют прежде всего поверхности стыка отдельных деталей, например, поверхность 1 стыка пресс-канта 2 и полуматрицы 3, как это показано на рис. 5.18, б. Непосредственно у оформляющей полости этот стык выполняется с кольцевым зазором 4, равным 0,1–0,2 мм, который и служит вентиляционным каналом. Ниже его расположен кольцевой же дренажный канал 5, соединенный с атмосферой профрезерованным в теле пресс-канта отводящим каналом 6.

В тупиковых углах оформляющей полости выполняются цилиндрические каналы 7 (подобные каналам 6 на рис. 5.18, а). Рабочую длину их с малым диаметром принимают минимальной как с целью уменьшения гидравлического сопротивления, так и для упрощения изготовления. Вводятся в тело полуматрицы также различные вставки, образующие в нем вентиляционные и дренажные каналы. Например, вставка 8 своим шестигранным хвостовиком 9 образует с цилиндрическим отверстием в матрице шесть вентиляционных щелей 10, соединенных с дренажным 11 и отводящим 12 каналами. Подобные же каналы 10, 11 и 12 образуются прямоугольной вставкой 13. Приемы вентиляции не ограничены рассмотренными здесь примерами.

**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПНЕВМОВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ****6.1. Технологические разновидности формующего инструмента**

Круг изделий, изготавливаемых методов пневмовакуумного формования из листовых и пленочных термопластов, достаточно широк. Диапазон их габаритов составляет от нескольких сантиметров до 1,5–2 метров. По конструкции эти изделия представляет собой оболочки в ряде случаев довольно сложной конфигурации с толщиной стенки от нескольких десятых до 6–8 мм.

Существующее большое количество технологических разновидностей пневмовакуумного метода не определяет, однако, большого принципиального конструктивного разнообразия соответствующего формующего инструмента. По этой причине ниже выделены только те его разновидности, которые имеют сколько-нибудь существенные различия в конструкции инструмента.

Различают методы свободного формования и формования на поверхностях формообразующих деталей форм. В первом случае изготавливают изделия типа сферических элементов (колпаков, плафонов и т. д.) и формообразующие детали у инструмента отсутствуют. Принцип этого метода проиллюстрирован на рис. 6.1. На первой стадии (рис. 6.1,а) лист 1 зажимается между прижимной рамой 2 и пневмовакуумной камерой 3 и нагревается нагревателем радиационного обогрева 4 до высокоэластического состояния. Затем полость камеры 6 сообщается с вакуумом (рис. 6.1,б) и лист под воздействием разности атмосферного и остаточного в камере давлений воздуха втягивается в нее. По достижении требуемой степени вытягивания (однако такой, при которой лист еще не касается стенок камеры) линия вакуума перекрывается и полость таким образом герметизируется; отформованный лист охлаждается и отвердевает, контактируя с атмосферным воздухом и воздухом в камере.

При переработке листов толщиной более 5 мм атмосферного давления на лист оказывается недостаточно для его качественного формования. По этой причине атмосферное давление заменяют повышенным давлением воздуха (до 0,7–1 МПа), подаваемого от компрессора. В этом случае в варианте, показанном на рис. 6.1, после отвода нагревателя 4 на прижимную раму сверху герметично крепится крышка пневмовакуумной камеры (на рисунке не показана) и наряду с сообщением полости под листом с вакуумом в пространство между крышкой и листом подается сжатый воздух.

При формовании на поверхностях формообразующих деталей различают две разновидности метода: негативное и позитивное формование.

При негативном формовании формообразующей деталью является матрица. Она имеет вогнутую формующую поверхность, причем формуемое изделие полностью воспроизводит ее контуры своей

наружной поверхностью. Эту разновидность также можно проиллюстрировать рисунком 6.1, если представить, что под позицией 3 на нем изображена матрица. В этом случае воздух из оформляющей полости матрицы 7 через систему вентиляционных каналов 5 отсасывается вплоть до полного облегания формуемым листом 1 ее формующей поверхности (позиция „в” на рис. 6.1). Отформованное изделие охлаждается при этом преимущественно за счет контакта со стенкой холодной матрицы. В связи с этим в матрицах (так же, как и в пуансонах) часто выполняют систему водяного охлаждения. При формировании же толстых листов с целью интенсификации охлаждения иногда изделие во время пребывания его в охлаждаемой матрице (на пуансоне) дополнительно обдувают холодным воздухом. Эта операция обязательна, если матрица (пуансоны) не имеет системы охлаждения; в этом случае после

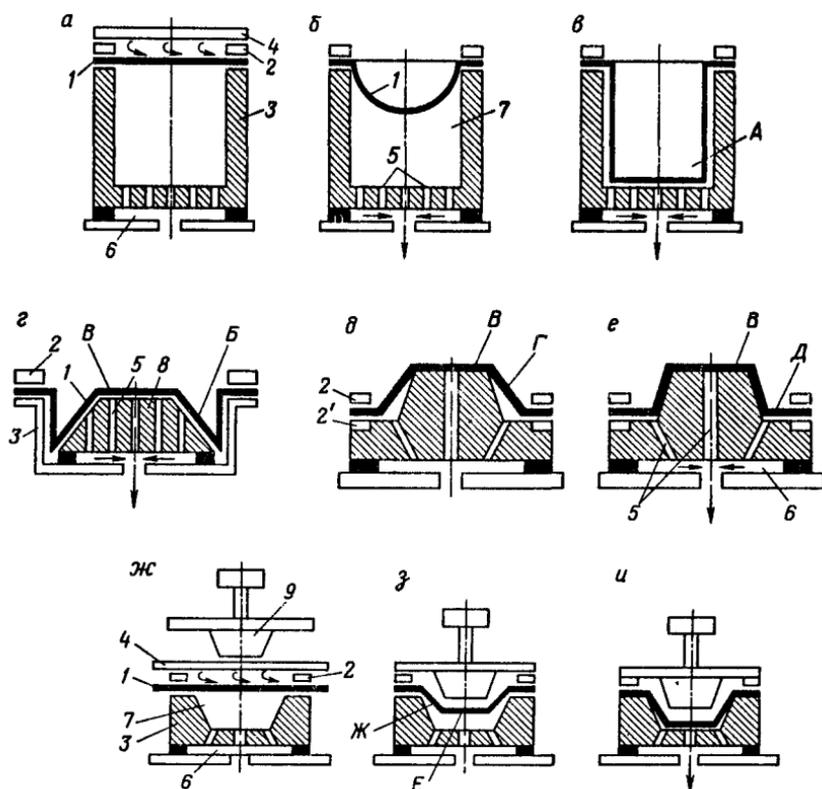


Рис. 6.1. Технологические разновидности пневмовакuumного формирования:

а — е — негативное формирование; з — позитивное формирование; д, е — позитивное формирование с предварительной механической вытяжкой; ж — и — негативное формирование с предварительной механической вытяжкой; 1 — формуемый лист; 2, 2' — прижимная рама; 3 — пневмовакuumная камера (матрица); 4 — нагреватель; 5 — вентиляционные каналы; 6 — вакуумная полость камеры; 7 — оформляющая полость матрицы; 8 — пуансон

извлечения изделия из формы обдувают воздухом и формообразующую деталь, что, однако, удлиняет цикл формования.

Позитивное формование отличается от негативного тем, что формообразующая деталь (пуансон) имеет выпуклую формующую поверхность, причем изделие воспроизводит ее не наружной, а внутренней своей поверхностью. При этой разновидности формования (см. рис. 6.1,2) лист 1 зажимается между рамой 4 и пневмовакuumной камерой 3 и нагревается так же, как и в предыдущих разновидностях. Однако в камере в данном случае помещен пуансон 8, имеющий как и матрица, вентиляционные каналы 5.

Как при негативном, так и при позитивном формовании непосредственно перед прижатием к формообразующей поверхности (посредством атмосферного или избыточного давления воздуха) разогретый лист может подвергаться вытяжке механическим способом до контуров, близких к контурам будущего изделия. Эта разновидность метода называется формованием с предварительной механической вытяжкой. При позитивном формовании эта разновидность может быть реализована так, как это показано на рис. 6.1, д, е. Зажатый в раме (состоящей в данном случае из двух половин 2 и 2') и разогретый лист опускается на пуансон (или, наоборот, пуансон поднимается вверх) и предварительно вытягивается им (поз „д"); затем уже полость и вентиляционные отверстия 5 сообщаются с вакуумом и происходит собственно формование (поз. „е"). При негативном же формовании механическая вытяжка осуществляется специальным вытяжным пуансоном 9, имеющим самостоятельный привод. Существо и последовательность технологических операций в этом варианте формования ясны из позиций „ж", „з", „и" на рис. 6.1.

Съем готовых изделий с матрицы или пуансона можно осуществлять вручную. При этом изделие последовательно по контуру отделяют от формообразующей детали, приподнимая его за края заготовки листа, которые были зажаты рамой. Для облегчения снятия через вентиляционные отверстия формообразующей детали часто подают сжатый воздух, отслаивающий от нее изделие. Однако ручной съем имеет много очевидных недостатков. Во-первых, он затруднен при формовании на пуансонах из-за плотного охвата пуансона изделием вследствие усадки материала последнего при охлаждении. Во-вторых, возможны механические повреждения формующей поверхности. В-третьих, ручной съем значительно изменяет цикл формования. Наконец, в-четвертых, в высокоавтоматизированных линиях, в состав которых входят установки для пневмовакuumного формования, ручной съем просто недопустим. В связи с этим форму часто оснащают системой выталкивания изделия. Конструкции ее разнообразны, примеры показаны ниже.

После формования изделия от него должен быть отделен облой: та часть заготовки листа, которая была зажата в раме или не „вписывается" в контур изделия. Для этого используют вырубные штампы и приспособления. Часто они выполняются как единая конструкция

вместе с формой, и работа их жестко увязана с рабочими движениями других элементов конструкции формы. В этом случае данные устройства можно рассматривать как систему удаления облоя формы. Усилие вырубki довольно значительно, поэтому формы с системой удаления облоя, как правило, эксплуатируются на прессах, по конструкции подобных таковым для прессования изделий из реактопластов.

Так же, как прессовые, литьевые и раздувные, пневмовакуумные формы могут быть одногнездными и многогнездными. Последние часто применяют для формования мелкой тары из тонких листов на автоматических установках.

Таким образом, можно отметить, что рабочие органы пневмовакуумных форм, в зависимости от технологической разновидности метода и конкретных условий его реализации, могут включать в себя пневмовакуумную камеру, зажимную раму, формообразующую деталь, систему удаления облоя.

## **6.2. Факторы, определяющие выбор конструкции формы**

Как видно из предыдущего раздела, в процессе проектирования инструмента при заданном для производства изделия должны быть решены следующие принципиальные вопросы: 1) тип формования (пневматический или вакуумный); 2) позитивное или негативное формование; 3) необходимость предварительной механической вытяжки; 4) гнездность формы; 5) материал формообразующих деталей и технология их изготовления; 6) необходимость встроенной системы охлаждения формы; 7) необходимость системы выталкивания; 8) вариант системы удаления облоя.

Конструктор должен иметь четкое представление о факторах, которые обуславливают то или иное решение по каждому из этих пунктов, определяющих принципиальное конструктивное оформление инструмента. Основные из этих факторов таковы: 1) требования к конфигурации изделия; 2) требуемые серийность изделия и производительность; 3) имеющееся в наличии оборудование.

Ниже показано, как каждый из этих факторов влияет на принимаемые конструктором решения.

### **6.2.1. Требования к конфигурации изделия:**

Наиболее существенными являются три аспекта этого фактора: толщина стенки изделия (и, следовательно, толщина формуемого листа); какая из поверхностей изделия должна иметь лучшее качество (большую точность размеров и, если необходимо, поверхностные рисунок или фактуру); предпочтительный характер разнотолщинности стенок изделия (разнотолщинность при этом методе формования, как показано ниже, неизбежна).

Толщина стенки изделия, как уже отмечалось выше, определяет решение по первому из указанных вопросов: при толщине формуемых листов более 5 мм должно применяться пневматическое формование;

при этом пневмовакuumная камера машины (или автономная пневмовакuumная камера) должна быть рассчитана на развитие давления в ней до 1 МПа и наряду с зажимной рамой иметь крышку с устройством для подвода сжатого воздуха. Следует учесть также, что если формирующая поверхность матрицы или пуансона имеет тонкую текстуру или мелкий объемный рисунок, который должен быть перенесен на изделие, то предпочтительно применение пневматического метода и при формировании листов с толщиной, меньшей 5 мм.

Позитивное или негативное формирование выбирается в соответствии со вторым аспектом рассматриваемого фактора: если отмеченные здесь требования предъявляются к внутренней поверхности изделия, то принимается формирование на пуансоне и наоборот. При отсутствии таких четко выраженных требований следует иметь в виду, что изготовление пуансонов механической обработкой и их поверхностная обработка (обычно шлифовка до  $Ra\ 0,1 - 0,025$ ) более просты, чем матриц. При формировании в матрице усадка несколько больше, чем при формировании на пуансоне; к тому же она имеет большую неоднородность для различных размеров одного и того же изделия. Это объясняется тем, что сам пуансон препятствует развитию усадки. Вместе с тем следует помнить, что сьем изделия с пуансона требует больших усилий, так что, если формообразующие детали выполнены из относительно хрупкого материала (например, из гипса), то повышенный износ имеет место именно у пуансона.

Третий аспект — предпочтительный характер разнотолщинности — также руководит выбором позитивного или негативного формирования и позволяет определить необходимость предварительной механической вытяжки. Рассмотрим причину появления разнотолщинности изделия при его формировании и, как следствие, характер разнотолщинности, получающийся при той или иной разновидности метода.

Можно различить несколько стадий деформирования листа в процессе облегания им формирующей поверхности матрицы или пуансона. Например (см. рис. 6.1, б), до момента касания боковых поверхностей матрицы или ее донной части (что произойдет раньше — зависит от отношения глубины матрицы  $H$  к ее характерному поперечному размеру  $D$ , называемого степенью вытяжки) вытягивающийся лист имеет форму шарового сегмента. По мере вытяжки радиус сегмента уменьшается; площадь поверхности листа растет, а толщина его уменьшается с одинаковой интенсивностью во всех точках сегмента. Вторая стадия деформирования листа характеризуется тем, что втягиваемый в полость матрицы лист начинает контактировать с ее боковыми стенками или дном. У той части листа, которая вошла в контакт с формообразующей поверхностью, образуется слой охлажденного отвердевшего полимера. Этот слой препятствует деформации донной части листа. Деформации и утонению продолжает подвергаться только та часть, которая еще не вошла в контакт. Таким образом, каждая очередная порция листа, входящая в контакт с формой, перестает утоняться и сохраняет в дальнейшем свою толщину. Следующая за ней

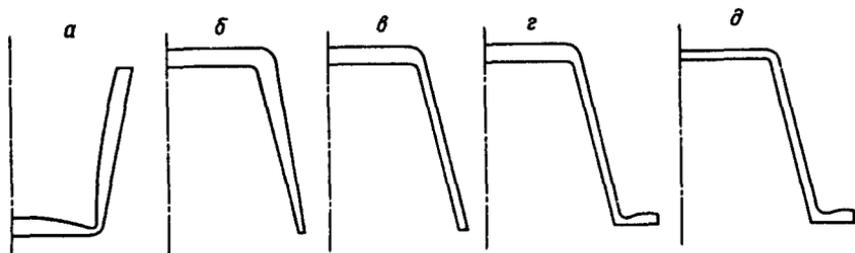


Рис. 6.2. Характер разнотолщинности стенок изделий, получаемых при различных разновидностях пневмовакуумного формования. Пояснения в тексте

порция входит в контакт, имея уже несколько меньшую толщину вследствие вытяжки и т. д. В результате части листа, входящие в контакт с формой в последнюю очередь, имеют минимальную толщину.

При негативном формовании последними формируются углы *A* дна изделия (рис. 6.1, *ж*); соответственно они и имеют минимальную толщину стенок. Характер разнотолщинности изделия при негативном формовании показан на рис. 6.2, *а*. При позитивном формовании (рис. 6.1, *з*) последними формируются места *B*, соответствующие верху изделия, в результате чего разнотолщинность при позитивном формовании (рис. 6.2, *б*) такова, что максимальную толщину стенки и, следовательно, жесткость имеет не верхняя, как в предыдущем случае, а нижняя, донная часть изделия.

В соответствии с рассмотренным здесь механизмом возникновения разнотолщинности, чем меньше степень вытяжки листа ( $H/D$ ), т. е. чем менее глубокое изделие и чем больше радиус кривизны поверхности изделия в местах его, формируемых в последнюю очередь, тем менее разнотолщинным получается изделие. При негативном и позитивном методах максимально допустимая степень вытяжки, как правило, не превышает 0,5; при больших ее значениях вследствие чрезмерной разнотолщинности листа не исключены разрывы его в наиболее тонких местах в процессе вытяжки.

Предварительная механическая вытяжка формирующим пуансоном при позитивном формовании, реализуемая как это показано на рис. 6.1, *д*, *е*, позволяет несколько уменьшить разнотолщинность (в сравнении с вариантом на рис. 6.1, *з*). Действительно, толщина изделия в донной части *B* как при предварительной вытяжке, так и без нее практически одинакова и равна начальной толщине листа, так как в обоих случаях лист касается вершины пуансона и отвердевает в месте контакта, еще практически не претерпев вытяжки. Однако на участке *Г* при механической вытяжке (рис. 6.1, *д*) он уточняется практически одинаково во всех точках по высоте, так как не касается при этом формы; на завершающей же стадии вакуумного формования (рис. 6.1, *е*) абсолютная величина неоднородной вытяжки на этом участке гораздо меньше, чем в вариантах без механической вытяжки.

Таким образом, характер разнотолщинности при позитивном формировании с механической вытяжкой (рис. 6.2, в) качественно подобен варианту на рис. 6.2, б, однако абсолютные значения разнотолщинности гораздо меньше. Здесь допустима степень вытяжки при формировании около 0,75. Есть еще одна важная особенность варианта „д, е”: если изделие и прижимная рама сконструированы таким образом, что материал части листа *D* (в том числе частично и под прижимной рамой) также является частью изделия, то получаемый характер его разнотолщинности таков, как это показано на рис. 6.2, г: в отличие от рис. 6.2, в изделие имеет жесткой не только донную, но и верхнюю свою часть.

Предварительная механическая вытяжка при негативном методе (в отличие от позитивного) осуществляется (см. рис. 6.1, ж–и) не формирующим пуансоном, который должен быть холодным и иметь максимально возможную теплопроводность, а специальным вытяжным пуансоном 9. Он может быть выполнен из очень низкотеплопроводного материала или эксплуатироваться при температуре, большей, чем температура отвердевания материала листа. В этом случае на этапе вытяжки (поз., з” на рис. 6.1) материал листа на участке *E*, контактирующий с пуансоном, не теряет деформативности и так же, как и на участке *Ж*, подвергается вытяжке и утонению. При вытяжке он скользит по контактирующему с ним участку пуансона. Возникающая при этом сила трения, препятствуя вытяжке, уменьшает ее интенсивность по сравнению с участком *Ж*.

Подбирая материал пуансона (и его поверхностную обработку) с тем или иным значением коэффициента трения по листу, а также изменяя степень подогрева пуансона, можно регулировать степень утонения листа на участке *E* от нулевого ее значения до практически такого же, как и на участке *Ж*. В последнем случае разнотолщинность получаемого изделия оказывается минимальной по сравнению с ранее описанными вариантами формирования. В соответствии с рассмотренным, при негативном формировании с механической вытяжкой возможна направленная вариация разнотолщинности получаемых изделий в диапазоне, ограниченном двумя крайними вариантами, показанными на рис. 6.2, г, д. Максимально допустимая степень вытяжки для этой технологической разновидности формирования, как правило, равна 1,5, однако для ряда материалов она может достигать 2.

Таким образом, из рассмотренного видно, что тот или иной характер разнотолщинности изделия, предпочтительный (или допустимый) с точки зрения его эксплуатации, наряду с толщиной стенки и требованиями к точности его размеров является существенным фактором, определяющим выбор типа и принципиального конструктивного оформления формирующего инструмента.

### 6.2.2. Требуемые серийность изделия и производительность

Эти два фактора являются определяющими при выборе гнездности формы, материала и технологии ее изготовления, а также при установлении рациональной степени механизации вспомогательных операций, которая должна обеспечиваться конструкцией формы или проектируемой совместно с ней дополнительной оснасткой.

Гнездность  $n$  непосредственно определяется той производительностью  $Q$ , которая должна быть обеспечена. Очевидно, что фактическая производительность, получаемая на данной форме, должна быть требуемой не менее требуемой  $Q$ :

$$n/t_{\text{ц}} \geq Q, \quad (6.1)$$

где  $t_{\text{ц}}$  – время цикла формования (точнее, время цикла работы формы). Это время с достаточной степенью точности может быть спрогнозировано по аналогии с близкими случаями формования: (например, с такой же толщиной листа из того же материала на той же вакуумформовочной установке при форме, изготовленной из того же материала). При определении значения гнездности  $n$  по условию (6.1) может возникнуть ситуация, при которой это значение окажется большим, чем максимально допустимая величина  $n_{\text{д}}$  по какому-либо иному фактору (например, по фактору имеющегося в наличии оборудования). В этой ситуации конструктор с целью достижения условия

$$n \leq g_{\text{д}} \quad (6.2)$$

может принимать такие решения по конструкции формы, которые приведут к уменьшению  $t_{\text{ц}}$  и, следовательно, согласно (6.1), – к уменьшению  $n$ . Например, может быть принято решение изготовить форму из более теплопроводного материала по сравнению с принятым аналогом (например, из алюминия вместо полимерной композиции) или решение оснастить форму системой охлаждения, которой не было у формы-аналога.

При возникновении такой и ей подобных ситуаций нужно иметь в виду, что практически всегда имеется не одно, а два или более решений, позволяющих разрешить возникшее противоречие. Например, в рассмотренном случае, если зажимная рама и пневмовакуумная камера имеющегося в наличии типоразмера машины могут работать с формой на данное изделие при максимальной гнездности  $n_{\text{д}}$ , не удовлетворяющей условию (6.2), то решение принять другой материал формы не является единственным. Возможен, например, альтернативный вариант: изготовить не одну, а две (или более, сколько нужно) формы из того же материала, что и аналог, и эксплуатировать их одновременно на двух (или более) машинах, если, разумеется, они имеются в наличии.

При выборе предпочтительного из технически возможных вариантов включается в работу еще один фактор: экономический. Предпочтительным является тот вариант, который обеспечивает наименьшую

себестоимость изделия. Предпочтительность какого-либо варианта с этой точки зрения очевидна с первого взгляда далеко не всегда. В связи с этим конструктор должен уметь провести на стадии проектирования формы ориентировочную оценку себестоимости будущего изделия, для чего необходимо систематически накапливать экономические данные, получаемые в ходе освоения производства изделий с тем, чтобы использовать их в качестве аналогов при проведении этой оценки.

На этой предварительной, прогнозной стадии расчета себестоимости с достаточно учитывать лишь три основных ее составляющих: стоимость материала (включая и отходы), приходящуюся на изготовление одного изделия,  $c_m$ ; доля заработной платы основного рабочего, приходящаяся на изготовление одного изделия,  $c_{и}$ ; доля стоимости формы и комплектующей ее оснастки, приходящаяся на одно изделие  $c_{ф}$ . Дополнительный учет прочих составляющих, как правило, не изменяет решения, принятого без их учета. Итак,

$$c = c_m + c_{и} + c_{ф}, \quad (6.3)$$

причем

$$c_{ф} = [c_{фд}(N/S) + 1/N + c_{в}1/N]([n/n_d] + 1), \quad (6.4)$$

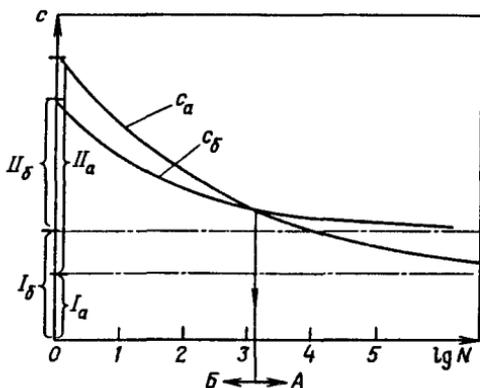
где  $c_{фд}$ ,  $c_{в}$  — стоимость формообразующих и прочих деталей формы соответственно;  $N$  — серийность изделия (т. е. общее число изделий, которое придется изготовить, выполняя данный заказ);  $S$  — стойкость формообразующих деталей (т. е. максимально возможное число изделий, которое может быть отформовано на данной детали до полного ее износа);  $[N/S]$  — целая часть отношения  $(N/S)$ ;  $[n/n_d]$  — целая часть отношения  $(n/n_d)$ , где  $n$  определено формулой (6.1); сумма  $[n/n_d] + 1$  в (6.4) — это число находящихся одновременно (параллельно) в эксплуатации форм для обеспечения требуемой производительности  $Q$ ; сумма  $[N/S] + 1$  в (6.4) — это число комплектов формообразующих деталей, необходимое для одной формы при изготовлении данной серии изделий.

Формулой (6.4) предусматривается, что вспомогательные детали формы износу, как правило, не подвергаются.

На первое из слагаемых формулы (6.3) самое существенное влияние оказывает степень плотности взаимного расположения гнезд в форме, зависящая от разновидности формования, так как именно от нее зависит относительное количество отходов материала после вырубки готовых изделий из листа. Второе же слагаемое — это, по существу, трудозатраты на изготовление одного изделия, которые уменьшаются пропорционально росту степени механизации и автоматизации вспомогательных операций и, следовательно, росту степени сложности (и стоимости) конструкции инструмента и сопутствующей оснастки; уменьшаются они также пропорционально росту производительности машины (или сокращению времени цикла формования), если машина работает в автоматическом режиме. Серийность изделия  $N$  существенно влияет только на третье слагаемое формулы (6.3); влиянием  $N$  на первое и второе слагаемые в рамках оценочных расчетов можно пренебречь.

Рис. 6.3. Зависимость себестоимости изделия  $c$  от серийности  $N$  для форм с автоматической вырубкой изделия (индекс "а") и без нее (индекс "б")

$I = c_m + c_n$ ;  $\Pi = c_{\Phi}$  [см. формулу (6.3)]; Б и А — области серийностей  $N$ , экономически целесообразные для вариантов без автоматической вырубki и с ней соответственно



На рис. 6.3 на качественном уровне на примере сравнения форм с автоматической вырубкой изделий из листа и без нее проиллюстрировано влияние серийности  $N$  на выбор предпочтительного варианта. Составляющие себестоимости здесь условно разделены на две группы, одна из которых (I) не зависит, а вторая (II) зависит от  $N$ . Индексы „а” и „б” соответствуют формам без автоматической вырубki и с ней соответственно. Для варианта „а” трудозатраты на изготовление изделия (и, следовательно, группа I) больше, а стоимость формы (группа II) меньше, что и определяет в конечном счете меньшую себестоимость изделия для формы без вырубki. Однако это справедливо только в области малых серийностей  $N$ . При больших  $N$  ситуация меняется на обратную. Более общее положение, иллюстрированное этим примером, можно сформулировать следующим образом: чем выше серийность изделия, тем большая степень сложности формы, обеспечивающая снижение трудозатрат на изготовление изделия, оказывается экономически целесообразной.

Пример конструкции формы для негативного пневмоформования, целесообразной при серийностях порядка  $(1 \div 8) \cdot 10^4$  шт., показан на рис. 6.4. В форме осуществляются предварительная механическая вытяжка листа пуансоном 6, вырубka изделия из листа ножами 4, независимое выталкивание из формы изделия (механизмом выталкивания 1 и съемным устройством 2) и облоя (подпружиненной плитой 3). Форма спроектирована для работы на прессе, причем верхняя полуформа с матрицей 2 крепятся к подвижной плите пресса, нижняя полуформа — к столу его, а шток вытяжного пуансона — к плунжеру нижнего, выталкивающего гидроцилиндра. При серийностях, больших указанной, целесообразно дополнительно к этой форме проектировать (и эксплуатировать) механизмы автоматической подачи разогретых заготовок и съема готовых изделий (и отделения облоя). При серийностях, меньших  $(4 \div 7) \cdot 10^3$  шт., экономически целесообразна предельно простая конструкция формы типа показанной на рис. 6.1, а.

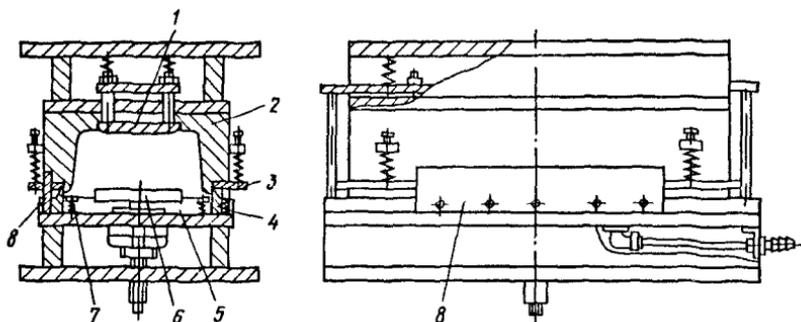


Рис. 6.4. Схема формы для среднесерийных изделий:

1 — механизм выталкивания изделия из матрицы в процессе раскрытия формы; 2 — матрица; 3 — плита прижима листа во время вырубki при смыкании и сталкивании облож при размыкании; 4 — прижимная рама с вырубными ножами; 5 — пневмокамера; 6 — вытяжной пуансон; 7 — выталкиватели изделия; 8 — направляющие

Из (6.4) видно, что величина  $c_{\phi}$  и, следовательно, себестоимость изделия зависят также и от стойкости формообразующих деталей  $S$ , а также от числа одновременно эксплуатируемых форм  $n_{\phi} = [n/n_d] + 1$ . Из соображений желательного минимума  $c_{\phi}$ , как видно на первый взгляд, предпочтителен тот из альтернативных вариантов, для которого, во-первых,  $n_{\phi} = 1$ , т. е.  $n/n_d < 1$ , во-вторых,  $N/S < 1$ . Однако следует иметь в виду, что стремление выйти на эксплуатацию только одной формы, причем без замены формообразующих деталей вследствие их износа в процессе эксплуатации, приводит к минимуму  $c_{\phi}$  в большинстве случаев (т. е. как правило), но не всегда. Дело в том, что стремление уменьшить  $n$  и увеличить  $S$  до значений, соответствующих отмеченным предпочтительным значениям отношений  $n/n_d$  и  $N/S$ , практически неизбежно вызывает увеличение  $c_{\phi d}$  или  $c_b$  [см. формулу (6.4)], так что итоговое уменьшение  $c_{\phi}$  при этом не обязательно. Например, если введение принудительного водяного охлаждения формы увеличивает ее стоимость  $c_{\phi d} + c_b$  в 2,3 раза, а значение  $n/n_d$  за счет уменьшения времени цикла формования уменьшается от 1,64 до 0,86, то, как видно из (6.4), значение  $c_{\phi}$  при этом может возрасти на 20–30%. Точно так же выбор иных материала и технологии изготовления формы с целью увеличения стойкости формы  $S$  может дать как положительный, так и отрицательный результат, приводя к изменению не только собственно  $S$ , но и величин  $c_{\phi d}$  и иногда  $c_b$ . Вывод очевиден: экономическая прогнозная оценка альтернативных вариантов предпочтительна в каждом случае.

В заключение раздела можно отметить, что первые два из четырех рассмотренных факторов (конфигурация изделия, серийность и производительность) являются главными, направляющими выбор конструктора. Третий фактор — имеющееся в наличии оборудование — фактор лимитирующий, ограничивающий возможности принятия конст-

руктором того или иного решения. Четвертый фактор – себестоимость изделия – оказывается существенным только при необходимости выбора предпочтительного варианта из двух или более технически осуществимых.

### 6.3. Формообразующие детали

#### 6.3.1. Материал и технология изготовления

Усилия, возникающие в формообразующих деталях пневмовакuumных форм, существенно (в 3–5 раз) меньше, чем в раздувных формах. Только при пневматическом формовании общая интенсивность напряженного состояния этих двух типов форм практически одинакова. В связи с этим при изготовлении матриц и пуансонов пневмовакuumных форм используют все типы материалов и технологий, описанных в предыдущей главе. В отличие от раздувных форм пневмовакuumные пуансоны и матрицы устанавливаются, как правило, на неподвижных в процессе эксплуатации элементах машин и оснастки, причем опорные поверхности их всегда горизонтальны. Рабочие усилия, действующие со стороны формуемого листа, прижимают пуансоны и матрицы к этим поверхностям, так что в ряде случаев даже не требуется специального крепления формообразующих деталей к указанным элементам. Таким образом, характерные для раздувных формообразующих деталей требования минимальности массы и локальной прочности в местах крепления в данном случае чаще всего отсутствуют. Эта особенность позволяет применять для изготовления матриц и пуансонов еще менее прочные и более технологичные материалы: дерево и гипс.

При столь широком наборе возможных материалов и технологий их формования выбор того или иного из них определяется преимущественно стойкостью формообразующих деталей из них  $S$ , которая, как отмечено в предыдущем разделе, должна быть предпочтительно большей, чем серийность изделия  $N$ . Значения стойкости форм (число циклов формования) из этих материалов приведены ниже:

|  |                   |
|--|-------------------|
| Дерево   | До 500            |
| Гипс   | 50–100            |
| Гипс, поверхностно пропитанный отверждаемыми смолами | До $10^4$         |
| Заливочные полимерные композиции                     | До $5 \cdot 10^4$ |
| Сплавы цветных металлов                              | Неограниченна     |
| Гальванополимерные и гальванобетонные конструкции    | То же             |
| Стали  | "                 |

Меньшая требуемая прочность и возможная большая масса позволяет, в отличие от раздувных форм, при гальванотехнологии формообразующую скорлупу заливать не металлом, а, например, менее прочными полимерными композициями или бетонным раствором на цементном связующем. Как видно из приведенных выше данных, сколько-нибудь заметного износа формообразующих деталей из цветных

сплавов и сталей при любых сколь угодно больших реальных серийностях обнаружить не удастся.

Дерево, применяется при производстве малых серий изделий и для изготовления единичных (например, опытных) образцов. Так как формообразующие детали подвергаются нагреву со стороны формуемого листа, то во избежание выделения смолы на формообразующую поверхность применяют только листовые породы дерева. При изготовлении форм необходимо учитывать, что древесина дает разную усадку вдоль и поперек волокон. На практике это затрудняет получение изделий с размерами, требующими большой точности. Во избежание коробления и растрескивания форм их делают не из монолитного куска, а из блоков, выполненных послойным склеиванием относительно тонких плит или брусков с послойно-перекрестным расположением волокон. Для улучшения износа деревянные формы часто покрывают эпоксидными смолами с последующими шлифовкой и полировкой.

Большой недостаток дерева — его низкая теплопроводность. Длительная непрерывная (без выстоев) работа формы невозможна из-за ее нагрева и очень большого возрастания времени охлаждения изделия. Необходимо один раз за 5–7 циклов формования обдуть деревянную форму с помощью вентилятора или воздушного пистолета, которыми, как правило, оснащаются универсальные пневмовакuumные машины.

Гипсовые формы изготавливают отливкой по моделям из глины, гипса, пластилина, дерева, металла или по оригиналу изделия. Возможно упрочнение поверхности гипсовых форм, как это отмечено в приведенных на с. 339 данных, однако при этом гипс у поверхности теряет ценное в данном случае свойство — пористость. Благодаря пористости значительная часть воздуха, отсасываемого из пространства между формуемым листом и формообразующей поверхностью, может удаляться непосредственно через тело формы, а не через вентиляционные отверстия, число которых может быть значительно сокращено. Необходимо также иметь в виду, что деревянные формообразующие детали предпочтительнее гипсовых, если они имеют отдельные относительно тонкие элементы. Из-за малой прочности гипса при изгибе эти элементы, как правило, недолговечны.

Вентиляционные каналы в теле гипсовых форм выполняются в процессе их отливки введением в нужных местах в залитый уже в опоку (но еще не отвердевший) раствор тонких штырей с нанесенным на них разделительным слоем.

Второй по значимости фактор, определяющий выбор материала формы, — это планируемая интенсивность работы ее, оцениваемая долей времени контакта охлаждающегося изделия с формообразующей поверхностью в общем времени цикла работы формы. Очевидно, что чем выше интенсивность работы формы, тем более интенсивным должен быть отвод от формы тепла, поступающего в нее от охлаждаемого изделия. Интенсивность же работы определяется, во-первых, 340

габаритами изделия и используемым для формования оборудованием (конкретнее – реализованной на нем степенью механизации и автоматизации вспомогательных операций), во-вторых, требуемой производительностью по данному изделию.

Крупногабаритные изделия (например, внутреннюю облицовку двери холодильника) обычно изготавливают на универсальных машинах, причем после формования и охлаждения изделия форма имеет достаточно длительный выстой, в течение которого выполняют снятие изделия из зажимной рамы, зарядку в нее и нагрев нового листа. За время этого выстоя даже деревянные и гипсовые формы успевают охлаждаться естественным путем; во время нагрева листа возможен также обдув их воздухом.

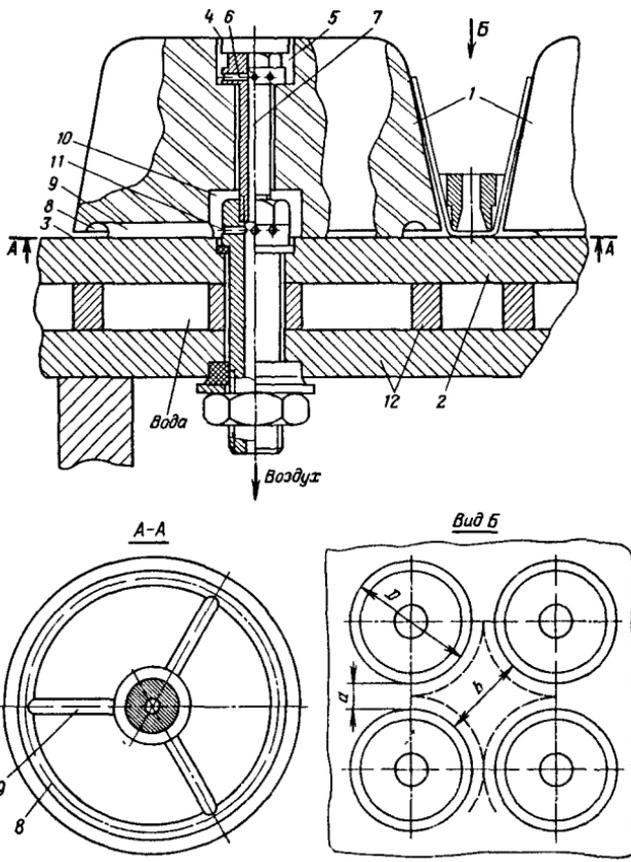
В многопозиционных машинах подобного типа операции формования и охлаждения изделия совмещены с операцией нагрева листовой заготовки, предназначенной для формования в последующем цикле. Время выстоя формы в этом случае намного меньше, чем в предыдущем, и отвод тепла от нее должен быть более интенсивным. Формы из дерева (или гипса) вследствие невозможности (или неэффективности) выполнения встроенной системы водяного охлаждения в этом случае не успевают достаточно охладиться за время цикла. Приходится вводить дополнительные паузы между сериями из 5–7 циклов для обдува их воздухом. Если же требуемая производительность такова, что эти паузы недопустимы, то необходимо выполнять формообразующие детали из металла или металлополимерных композиций. Теплопроводность металлов такова, что формы из них успевают охлаждаться в этом случае естественным образом, однако металлополимерные формы должны оснащаться заформовываемой в них системой водяного охлаждения.

При формировании мелких изделий из тонких рулонов материалов на автоматизированных линиях доля выстоя форм в общем цикле их работы может быть очень малой. Формы могут работать в этом режиме, только если они выполнены из металла и оснащены системой водяного охлаждения. При эксплуатации их без системы охлаждения необходимо увеличивать время выстоя, что снижает производительность линии. Этот вариант возможен, если фактическая производительность линии оказывается не ниже требуемой.

### *6.3.2. Расположение гнезд и расстояния между ними*

При конструировании многогнездных форм с целью минимизации отходов листа, образующихся после вырубki из него отформованных изделий, необходимо стремиться к максимально плотному расположению гнезд. Достигаемые попутно минимальные материалоемкость и габариты формы являются в данном случае (в отличие от прессовых и литьевых форм) менее значимыми факторами.

На рис. 6.5 и 6.6 показаны элементы конструкции многогнездных форм для позитивного и негативного формования. При позитивном



**Рис. 6.5. Многогнездная форма для позитивного вакуум-формования:**  
 1 — пуансон; 2 — плита пуансонов; 3, 4 — вентиляционные каналы; 5-11 — дренажные каналы;  
 12 — элементы охлаждающей плиты

формовании формуемый лист втягивается в пространство между пуансонами 1 (см. рис. 6.5), причем вследствие значительной разности расстояния между гнездами в различных точках по их периметру (сравнить, например, расстояния „а” и „е” в виде Б) степень вытяжки той части листа, которая формирует боковины изделия, также существенно неоднородна: максимальное значение степени вытяжки имеет место в окрестности размера „а”, минимальное — в окрестности размера „е”. Это приводит к значительной поперечной разнотолщинности боковин изделия и часто к образованию складок на листе, а следовательно, на изделии. Уменьшение разности расстояния „а” и „е” возможно только путем увеличения расстояния между гнездами. Практикой установлено, что отмеченные дефекты практически исче-

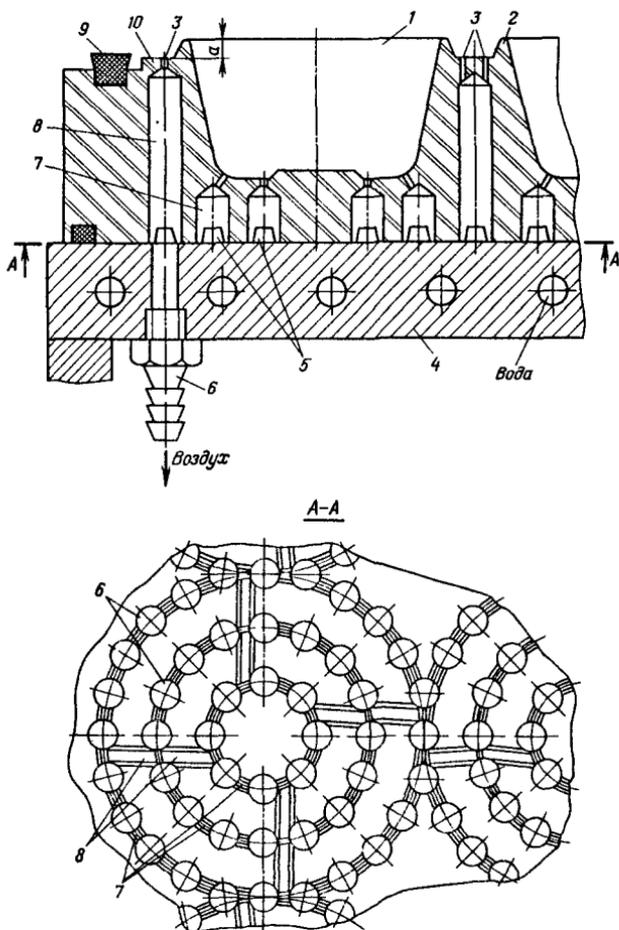


Рис. 6.6. Многогнездная форма для негативного вакуум-формования:

1 — оформляющие полости матрицы; 2 — разделительные канты; 3, 7 — вентиляционные каналы; 4 — охлаждающая плита; 5, 8 — дренажные каналы; 6 — ниппель; 9 — уплотнение, контактирующее с прижимной рамой; 10 — неформирующая поверхность матрицы

зуют, если размер „а” принимается равным или большим характерного размера изделия  $D$  (см. вид. Б). Однако очевидно, что при этом отходы листа могут достигать 80%, что совершенно недопустимо.

Устранение рассмотренных здесь недостатков при минимальных расстояниях между гнездами возможно только при равномерной по всему периметру будущих изделий предварительной механической вытяжке листа. Элементы для вытяжки листа могут крепиться на зажимной раме так, как это показано на рис. 6.7. Рамами подобной конструкции оснащаются автоматические установки для переработки

рулонных листовых материалов. Рама расположена непосредственно над формой и имеет возможность вертикального перемещения. В исходном состоянии два зажимных элемента рамы 1 и 2 находятся в разведенном состоянии, и в пространство между ними поступает очередная порция разогретого листа 3. Верхний элемент 2, опускаясь, вместе с элементом 1 зажимает лист по его периметру. Далее они опускаются совместно, при этом лист входит в контакт с вершинами пуансонов, а соосные с ними вытяжные кольца 4 вытягивают лист до тех пор, пока своими рабочими торцами не прижмут лист к плите пуансонов (поз. 2 на рис. 6.5); это положение колец с листом показано на рис. 6.5 тонкими линиями. Входя в контакт с листом уже на начальных стадиях его вытяжки, холодные кольца образуют у него по месту контакта кольцевые пояски охлажденного и, следовательно, малодеформативного материала. Эти пояски препятствуют вытяжке тех участков листа, которые охвачены штриховой линией на виде Б рис. 6.5. В результате однородной осесимметричной вытяжке подвергается только та часть листа, которая формирует изделие.

При использовании подобных вытяжных устройств минимально возможное расстояние между гнездами, как видно из рис. 6.5, определяется лишь возможностью размещения вытяжных элементов между пуансонами при прижатии листов к плите пуансонов.

При прямоугольных в плане пуансонах в качестве вытяжных элементов могут быть использованы перекрестно натянутые на раму ряды струн; конструкция элемента подобной рамы показана на рис. 6.8.

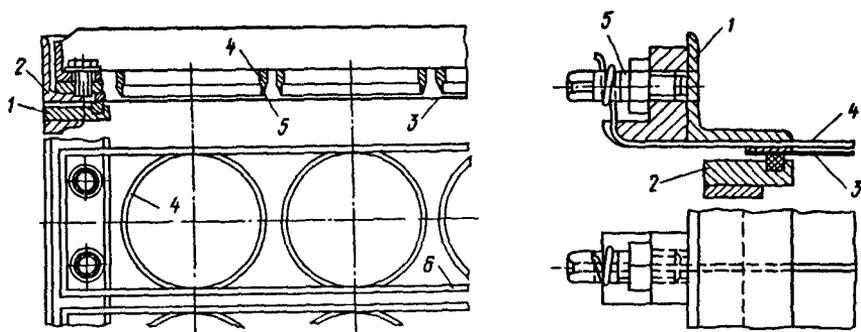


Рис. 6.7. Зажимная рама с элементами для предварительной механической вытяжки листа:

1, 2 — нижний и верхний зажимные элементы соответственно; 3 — лист термопласта; 4 — вытяжное кольцо; 5 — рабочий торец вытяжного кольца; 5 — рабочий торец вытяжного кольца; 6 — крепеж колец к верхнему зажимному элементу

Рис. 6.8. Зажимная рама с элементами струнного типа для предварительной механической вытяжки листа:

1, 2 — верхний и нижний зажимные элементы соответственно; 3 — лист термопласта; 4 — струна; 5 — натяжной винт струны

При негативном формовании могут возникнуть подобные же дефекты изделий. И в этом случае области листа, которые не должны участвовать в формовании изделия (подобные тем, которые отмечены штрихами на рис. 6.5), исключаются из процесса вытяжки, однако это достигается без каких-либо дополнительных устройств. По периметру каждой формирующей полости 1 матрицы (см. рис. 6.6) выполнены разделительные канты 2, имеющие незначительное превышение  $a = 2 \div 5$  мм над неформующей поверхностью матрицы 10. При отсутствии кантов в процессе вытяжки листа в оформляющую полость 1 может затягиваться часть листа, контактировавшая перед этим с неформующей поверхностью 10. Эта переохлажденная часть листа плохо формируется в полости и может образовывать на изделии складки. Канты препятствуют затяжке в полость за счет перегиба листа на них. Перегиб листа на кантах и надежное прижатие его к неформующей поверхности матрицы обеспечиваются откачкой воздуха не только из оформляющих полостей 1 (через отверстия 7), но и из пространства между листом и неформующей поверхностью (через отверстия 3). Таким образом, при негативном формовании минимальное расстояние между гнездами определяется возможностью размещения между ними разделительных кантов 2 и вакуумных отверстий 3 по параметру каждого гнезда.

### 6.3.3. Вентиляционные каналы

При проектировании формы приходится решать четыре основных вопроса: о выборе типа каналов (цилиндрические отверстия или щели), мест расположения каналов, размера каналов и их числа.

Конструктивно вентиляционные каналы могут быть выполнены в виде цилиндрических отверстий 7 (см. рис. 6.6) и щелей малой ширины 3, 4 (см. рис. 6.5), по конфигурации повторяющих очертания изделия и выполненных в местах стыка отдельных элементов его поверхности с целью уменьшения заметности оставляемых на изделии следов. Выполнение каналов в виде щелей предпочтительно, поскольку при той же суммарной площади поперечного сечения они имеют примерно на 30% меньше гидравлическое сопротивление эвакуируемому из формы воздуху.

Располагаются каналы (как и в раздувных формах) во избежание образования замкнутых полостей, откуда воздух не может быть удален, в тех местах оформляющей полости, которые входят в контакт с формируемым листом в последнюю очередь: в местах углов будущего изделия и переходов его поверхности (отверстия 7 на рис. 6.6 и 3 на рис. 6.5). В ряде случаев требуются дополнительные каналы на больших плоских поверхностях изделия (например, отверстие 4 на рис. 6.5), где также может оставаться трудно эвакуируемый воздух.

Характерный размер отверстий каналов на формирующей поверхности должен быть таким, чтобы не оставлять на формируемом изделии заметных следов. Величина прогиба листа толщиной  $\delta$  (рис. 6.9) при вдавли-

вании его в вентиляционное отверстие диаметром  $d$  под воздействием разности давлений  $p$  под листом и над ним может быть рассчитана по формуле

$$y = (3/16)[pd^4/(E\delta^3)](5 + \nu)(1 - \nu), \quad (6.5)$$

полученной из хорошо известного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии тонкой круглой пластины при равномерно распределенной нагрузке. В этой формуле  $E$  – модуль упругости при растяжении,  $\nu$  – коэффициент Пуансона.

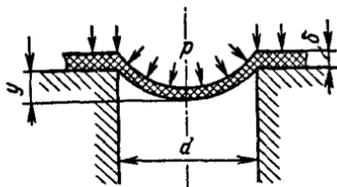


Рис. 6.9. Схема прогиба листа в вентиляционном отверстии. Пояснения в тексте

Величина  $y$  собственно и определяет степень заметности следа на изделии. Таким образом, формально задавшись допустимой величиной  $y$ , для листа известной толщины из данного материала по (6.5) можно рассчитать максимально допустимый диаметр вентиляционного отверстия. Однако при этом возникают неопределенности следующего плана. Во-первых, какую величину  $y$  считать допустимой (это чаще всего субъективный фактор особенностей зрительного восприятия). Во-вторых, модель упругости  $E$  сильно зависит от температуры, и даже если эта зависимость известна, сложно достаточно точно предсказать значение температуры листа в процессе утяжки его в отверстие при учете того, что он одновременно с утяжкой интенсивно охлаждается из-за контакта с формой. В связи с этим формула (6.5) может быть использована лишь для корректной экстраполяции каких-либо известных из практики достоверных данных на конкретный случай, не полностью идентичный по условиям, в которых эти данные получены (например, известен диаметр отверстия  $d$  для данного изделия из листа толщиной  $\delta$  и необходимо определить  $d_1$  для этого же изделия при толщине  $\delta_1$ ). Пример практических рекомендаций по выбору  $d$  приведен в табл. 6.1.

Необходимо отметить, что ширину вентиляционных щелей следует принимать на 20–30% меньшей, чем указанные здесь диаметры отверстий.

Время деформирования листа, определяющее степень его охлаждения в процессе формования и, следовательно, влияющее на разнотолщинность будущего изделия, зависит от общего гидравлического сопротивления вакуумной магистрали, соединяющей ресивер машины с полностью между формируемым листом и формой, поэтому общее число каналов в первом приближении должно выбираться таким,

Таблица 6.1. Значения диаметра вентиляционных отверстий  $d$ , мм\*

| Материал   | $d$ , мм        |                 |
|--|-----------------|-----------------|
|  | $\delta = 2$ мм | $\delta = 6$ мм |
| Полистирол ударопрочный, акрилнитрилбутидиенстирол, полиметилметакрилат, поливинилхлорид | 0,2–0,4         | 0,5–0,7         |
| Полиэтилены, полипропилены   | 0,1–0,2         | 0,4–0,5         |

чтобы их суммарное гидравлическое сопротивление не превышало значительно собственное сопротивление магистрали машины. В таком случае в рабочей (наиболее узкой) части каналов развивается средне-расходоная скорость воздуха, близкая по величине скорости звука в нем  $v_3 = 335$  м/с. Имея в виду этот режим истечения воздуха и задаваясь временем формования  $t$ , можно рассчитать необходимое число отверстий  $n$  из очевидного соотношения

$$(\pi d^2/4)n v_3 = \alpha V/t, \quad (6.6)$$

где  $V$  – объем отводимого воздуха;  $\alpha$  – коэффициент запаса, учитывающий тот факт, что в процессе формования облегающий формующую поверхность лист может перекрыть (закупорить) значительную часть отверстий и на финишной стадии формования произойдет крайне нежелательное снижение скоростей деформирования листа, если общее число отверстий  $n$  не будет принято со значительным запасом; значение  $\alpha$  целесообразно принимать равным 8–10.

Ниже приводятся ориентировочные значения числа цилиндрических отверстий  $n$  в зависимости от объема отводимого воздуха  $V$ :

| $V$ , м <sup>3</sup> | $n$        | $V$ , м <sup>3</sup> | $n$         |
|----------------------|------------|----------------------|-------------|
| 0,001 – 0,005        | 100 – 200  | 0,10 – 0,25          | 1000 – 5000 |
| 0,005 – 0,01         | 200 – 400  | 0,25 – 0,50          | 5000 – 1000 |
| 0,01 – 0,10          | 400 – 1000 |                      |             |

При любых конфигурации и размерах вентиляционных отверстий необходимо выполнять их с минимально возможной длиной с целью минимизации их гидравлического сопротивления. Длина их принимается, как правило, не более  $(10 \div 15) d$ .

Отдельные потоки воздуха от каждого вентиляционного канала объединяются и отводятся из формы системой дренажных каналов. Проходные сечения дренажных каналов принимаются такими, чтобы их гидравлическое сопротивление было ничтожно малым по сравнению с сопротивлением вентиляционных каналов. На рис. 6.5 система дренажных каналов включает в себя полость 5, радиальные отверстия 6 и центральное отверстие 7. От вентиляционной щели 3 воздух отводится кольцевым 8 и тремя радиальными 9 каналами, из которых воздух поступает в камеру 10 и далее в радиальные 11 и центральное 7 отверстия. Возможный вариант системы дренажных каналов в многог-

нездных матрицах показан на рис. 6.6. Вентиляционные отверстия 5 сообщаются с первичными каналами 6, которые объединены в группы кольцевыми каналами 7 трапециевидального сечения, профрезерованными на изнаночной поверхности матрицы. Эти последние сообщаются друг с другом также профрезерованными каналами типа 8. Воздух отводится через один или несколько штуцеров 9.

#### **6.4. Система охлаждения**

Подобно раздувным формам системы охлаждения может быть выполнена как непосредственно в формообразующей детали (например, сверленные отверстия или заформованные змеевики), так и в специальных охлаждающих плитах как канального (поз. 10 на рис. 6.6), так и полостного (поз. 12 на рис. 6.5) типов. Плиты с канальной системой охлаждения могут быть выполнены не сверлением в них отверстий, а напайкой на них трубчатых змеевиков (например, напайкой на нижнюю сторону плиты 2 на рис. 6.5). В последнем случае необходимо обеспечивать надежную герметизацию мест крепления формообразующих элементов к охлаждающим плитам.

Для форм, работающих в интенсивном режиме, целесообразно выполнять поверочный расчет системы охлаждения. Он может выполняться принципиально так же, как и для литьевых форм.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### К гл. 1

1. Чернов Л.Б. Основы методологии проектирования машин. М.: Машиностроение, 1978. 148 с.
2. Калинин Э.Л., Сакоцева М.Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий: Справочное пособие. Л.: Химия, 1987. 416 с.
3. Альшиц И.Я., Благов Б.Н. Проектирование деталей из пластмасс: Справочник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
4. Мягков В.Д., Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: Справочник. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1982. Ч. I. 543 с.; 1983. Ч. 2. 448 с.
5. Переработка пластмасс: Справочное пособие/Под ред. В.А.Брагинского. Л.: Химия, 1985. 296 с.

### К гл. 2

1. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. М.: Химия, 1986. 488 с.
2. Пантелеев А.П., Шевцов Ю.М., Горячев И.А. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. М.: Машиностроение, 1986. 400 с.
3. Филатов В.И. Технологическая подготовка производства пластмассовых деталей. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.
4. Лейкин Н.Н. Конструирование пресс-форм для изделий из пластических масс. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. 1973. 244 с.
5. Брагинский В.А. Прессование. 2-е изд., перераб. Л.: Химия, 1979. 176 с.
6. Казанков Ю.В., Макаров М.С., Миронов В.А. Расчет и конструирование формующего инструмента. Лабораторный практикум. М.: МИХМ, 1988. 84 с.

### К гл. 3

1. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. М.: Химия, 1986. 488 с.
2. Технологическая оснастка для переработки термопластов. Отраслевой каталог. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1983. 384 с.
3. Видеф Н.Б. Основы конструирования литьевых форм для термопластов. М.: Машиностроение, 1979. 264 с.
4. Пантелеев А.П., Шевцов Ю.М., Горячев И.А. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. М.: Машиностроение, 1986. 400 с.
5. Казанков Ю.В., Макаров М.С., Миронов В.А. Расчет и конструирование формующего инструмента. Лабораторный практикум. М.: МИХМ, 1988. 84 с.
6. Брагинский В.А. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из пластмасс. Курсовое проектирование. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1981. 38 с.
7. Бахарев А.С., Брагинский В.А. Опыт проектирования литьевых форм для изделий из термопластов с использованием ЭВМ. Л.: ЛДНТП, 1990. 22 с.

### К гл. 4

1. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. М.: Химия, 1986. 488 с.
2. Техника переработки пластмасс/ Под ред. Н.И.Басова и В.Броя. М.: Химия, 1985. 528 с.

3. Скачков В.В., Торнер Р.В., Стунгур Ю.В., Реутов С.В. Моделирование и оптимизация экструзии полимеров. Л.: Химия, 1984. 152 с.

4. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1977. 462 с.

#### **К гл. 5**

1. Басов Н.И., Скуратов В.К. Раздувное формование. Л.: Химия, 1983. 75 с.

2. Басов Н.И., Ким В.С., Скуратов В.К. Оборудование для производства объемных изделий из термопластов. М.: Машиностроение, 1972. 217 с.

3. Бахарева В.К., Богданов В.В., Брагинский В.А. и др. Переработка пластмасс (справочное пособие). Л.: Химия, 1985. 296 с.

#### **К гл. 6**

1. Стрельцов К. Н. Переработка термопластов методами механо пневмоформования. Л.: Химия, 1981. 231 с.

2. Шерышев М.А. Формование полимерных листов и пленок. Л.: Химия, 1989. 120 с.

3. Шерышев М.А., Ким В.С. Переработка листов из полимерных материалов. Л.: Химия, 1984. 216 с.

Учебное издание

**Басов Николай Иванович**  
**Брагинский Владимир Абрамович**  
**Казанков Юрий Васильевич**

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ  
ФОРМУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор Л.И. Галицкая  
Художественный редактор В.В. Бордунова  
Технический редактор В.В. Лебедева  
Корректор О.Е. Русакова

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающей технике

ИБ № 2238

Подписано в печать 12.05.91. Формат 60х88 1/16  
Бумага офсетная № 2. Гарнитура Пресс-Роман  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,56. Усл. кр.-отт. 21,81  
Уч.-изд. л. 23,53. Тираж 3900 экз. Заказ 13 60

Ордена "Знак Почета" издательство "Химия",  
107076, Москва, Стромынка, 21, корп. 2.

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата"  
при Госкомпечати СССР  
109033, Москва, Волочаевская ул., 40