

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

В. Г. Бортников

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений



ЛЕНИНГРАД
«ХИМИЯ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1983

Бортников В. Г.

Основы технологии переработки пластических масс: Учебное пособие для вузов. — Л.: Химия, 1983. — 304 с., ил.

Изложены вопросы теории и расчета технологических процессов переработки пластических масс. В первой части рассмотрены физико-химические и реологические основы технологии переработки, а также важнейшие технологические свойства пластмасс. Во второй — описаны технологические процессы переработки пластических масс прессованием, экструзией, литьем под давлением, выдуванием, пневмовакуумным формованием и каландрованием.

Для студентов химико-технологических вузов, специализирующихся в области переработки пластических масс. Полезно инженерно-техническим работникам проектных организаций и промышленных предприятий отрасли.

304 с., 248 рис., список литературы 77 ссылок.

Рецензенты: 1. Кафедра технологии переработки пластмасс МИТХТ им. М. В. Ломоносова (зав. кафедрой докт. хим. наук профессор *В. Н. Кулезнев*).

2. Кафедра технологии переработки пластмасс Кузбасского политехнического института (зав. кафедрой канд. техн. наук доцент *С. Д. Евменов*).

3. Кафедра технологии переработки пластмасс Воронежского технологического института (зав. кафедрой канд. техн. наук доцент *В. В. Калмыков*).

Технология переработки полимеров — это область науки и техники, изучающая процессы, предназначенные для получения изделий из пластических масс или улучшения свойств полимеров. Как область техники она возникла в середине XIX века одновременно с появлением первых искусственных полимерных материалов. Изготовление изделий из пластмасс — сравнительно сложный технологический процесс, базирующийся на использовании физико-химических (реологических, термодинамических, теплофизических и др.) закономерностей. В зависимости от условий формования (температуры расплава, скорости течения, давления и времени охлаждения) изменяется степень кристалличности и физико-механические свойства полимеров, поэтому выбор и обоснование этих параметров имеют принципиальное значение.

Технология переработки начала развиваться как самостоятельная область науки после завершения целого ряда фундаментальных исследований по физике и механике полимеров. Особое значение развитие теоретических основ переработки полимеров приобретает в настоящее время в связи с ростом производства пластмасс. Переработка пластмасс в изделия — трудоемкий процесс и чтобы в ближайшие годы обеспечить резкое повышение выпуска изделий из пластмасс без увеличения численности занятых в этой отрасли рабочих, необходимо разрабатывать принципиально новые технологические процессы, автоматические линии и переводить их на управление с использованием ЭВМ. Перевод технологии на автоматизированное управление (АСУТП) требует создания математических моделей, учитывающих весь комплекс протекающих физико-химических процессов.

С учетом вышеизложенного содержание книги и последовательность разделов составлены по принципу преемственности технологических процессов и общности их теоретических основ. В основу данного издания положен курс, читаемый автором в Казанском химико-технологическом институте им. С. М. Кирова. В первой части книги рассмотрены физико-химические и технологические характеристики полимеров. Поскольку курс физики полимеров читается студентам самостоятельно, то в данном учебном пособии кратко рассмотрены только те разделы, которые необходимы для обоснования и описания технологических операций переработки. Раздел реологии полимеров посвящен в основном закономерностям течения расплавов полимеров и изложен в объеме, необходимом для освоения методики решения инженерных задач по технологии переработки. Так как студенты химико-технологических специальностей изучают сокращенный курс высшей математики, то решения реологических задач приведены только для изотермических условий течения расплавов.

Во второй части книги дано описание технологических процессов подготовки полимеров и переработки их в изделия. В связи

с тем, что процессы экструзии, выдувания и литья под давлением имеют однотипную операцию плавления и гомогенизации, вначале рассмотрены закономерности движения полимера в каналах шнека, а затем технология получения труб, пленок, а также изготовления изделий выдуванием и литьем под давлением. В следующих главах описаны каландрование, пневмовакуумформование, переработка реактопластов прессованием и литьем под давлением, а также механическая обработка готовых изделий, причем вначале изложены общие принципы процессов, затем детально рассмотрены технологические операции с их теоретическим обоснованием и приведены методы расчета оптимальных параметров. В тех случаях, когда отдельные закономерности процессов изучены недостаточно, были использованы приближенные методы расчета с введением поправочных коэффициентов.

В данное учебное пособие не включены такие способы изготовления изделий, как контактное формование стеклопластиков, намотка армирующих материалов, а также вспенивание, напыление и метод полива из растворов. В некоторых вузах с этими методами студенты знакомятся в отдельном курсе «Специальная технология изготовления изделий из пластмасс», хотя такое разделение носит чисто условный характер.

Автор отдает себе отчет в том, что ввиду сложности и многообразия описываемых процессов при первом издании учебного пособия некоторые вопросы не нашли освещения или рассмотрены недостаточно подробно, и заранее признателен читателям за советы, критические замечания и пожелания, которые будут учтены в последующих изданиях.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность профессорам В. Н. Кулезневу, Г. В. Сагалаеву, М. С. Акутину, В. Е. Гулю, А. Ф. Николаеву и доцентам С. Д. Евменову, Е. Г. Никитину, В. К. Крыжановскому, С. В. Власову и В. В. Калмыкову, принявшим участие в обсуждении рукописи.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРОВ

Глава 1

РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ

Процесс формования изделий из пластмасс осуществляется, когда полимеры находятся преимущественно в вязкотекучем состоянии и лишь в некоторых случаях (пневмовакуумное формование) — в высокоэластическом. При охлаждении изделий полимер переходит в твердое агрегатное состояние в результате стеклования или кристаллизации. Переход из одного физического состояния в другое, а также процессы плавления и кристаллизации происходят при определенных значениях температур, знание и использование которых необходимо при выборе режимов переработки полимеров. Так, в зависимости от температуры стеклования и плавления (текучести) изменяются время охлаждения изделия, температура формы и рабочих узлов экструзионных агрегатов или литьевых машин. Большое практическое значение имеют такие характеристики, как скорость кристаллизации, теплота плавления, а также изменение размеров и конфигурации структурных образований кристаллизующихся полимеров в зависимости от условий формования и охлаждения изделий. Все перечисленные характеристики достаточно подробно описаны в учебных пособиях по физикохимии полимеров, в данной главе рассмотрены вопросы практического использования их для теоретического обоснования процессов переработки с учетом особенностей строения отдельных групп полимеров.

1.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОСТИ ПОЛИМЕРОВ

Первую информацию о полимерах можно получить из анализа термомеханической кривой. Зависимость деформации полимера от температуры позволяет установить области перехода его из одного физического состояния в другое. Так, при нагревании аморфного полимера, на термомеханической кривой четко просматриваются три физических состояния: стеклообразное, высокоэластическое и вязкотекучее (рис. 1.1). При температуре ниже температуры стеклования (T_c) аморфный полимер находится в твердом агрегатном состоянии, при этом часть сегментов макро-

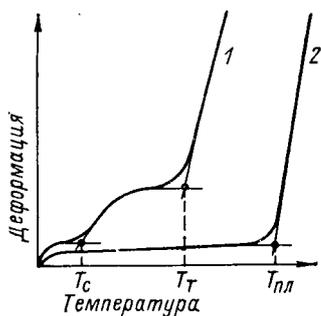


Рис. 1.1. Термомеханические кривые аморфного (1) и кристаллического (2) полимеров.

молекул фиксирована в пространстве, а другая — обладает некоторой свободой перемещения. Под действием больших усилий наблюдается деформация, однако деформация эта сравнительно невелика и зависимость ее от напряжения почти прямопропорциональная. Способность полимеров переходить в стеклообразное состояние позволяет достигать определенной конструкционной жесткости изделий и применять их при температурах ниже T_c в машинах и приборах. В связи с этим температура стеклования является нижней границей, до которой целесообразно проводить охлаждение изделия после формования его в процессе переработки полимеров. Однако, если при извлечении изделий из форм выталкивающие усилия малы, охлаждение осуществляют до температуры несколько выше T_c , так как низкие напряжения и большая скорость нагружения исключают деформацию изделий.

При очень низких температурах в полимерах могут осуществляться только крутильные колебания отдельных звеньев, и полимер приобретает хрупкость. Температура хрупкости ($T_{хр}$) существенно влияет на нижнюю границу температурной области практического использования полимеров в качестве конструкционных материалов, особенно при динамическом нагружении изделий. Следует учитывать ее и при переработке полимеров. Так, эластичные изделия, охлажденные ниже $T_{хр}$, можно подвергать, например, обработке в галтовочных барабанах для снятия облоя после литья под давлением или прессования.

Необходимо отметить, что температура стеклования, а также плотность полимеров в стеклообразном состоянии в значительной мере зависят от скорости охлаждения расплава. Как видно из рис. 1.2, а, T_c и удельный объем $V_{уд}$ с увеличением скорости охлаждения полимера повышаются. Стеклование полимеров связывают с релаксацией сегментов макромолекул, содержащих от 5 до 20 атомов углерода. При высокой скорости охлаждения релаксационные процессы не завершаются и в стеклообразном состоянии образуется менее упорядоченная структура. Противоположная зависимость возникает при сжатии расплава в процессе его охлаждения. Стеклование под высоким давлением приводит к увеличению плотности полимеров. Это наглядно видно из рис. 1.2, б. Полистирол, охлажденный под давлением 200 МПа (линия DEF) имеет температуру стеклования T_c примерно на 60 °С выше температуры размягчения T_p . При снятии давления (отрезок FG) происходит уменьшение плотности (повышение $V_{уд}$) за счет упругого восстановления накопленной деформации; однако

плотность таких образцов все же несколько выше, чем у полимеров, охлажденных без давления.

При температуре выше T_c , т. е. в высокоэластическом состоянии, молекулярная подвижность в полимерах становится настолько большой, что структура полимера в ближнем порядке успевает перестраиваться вслед за изменением температуры, а макромолекулы могут изгибаться под действием внешних сил. Общая деформация полимера в высокоэластическом состоянии складывается из мгновенной упругой и запаздывающей высокоэластической деформации. Напомним, что упругая деформация обусловлена изменением средних межатомных и межмолекулярных расстояний и деформацией валентных углов полимерной цепи, а высокоэластическая — ориентацией и перемещением звеньев гибких цепей. Высокоэластическое состояние используется при формировании изделий такими методами, как штампование, вакуумное формование и др. Если при температуре эксплуатации полимеры находятся в высокоэластическом состоянии, то из них можно изготовлять пленки, гибкие шланги, искусственную кожу.

Несколько иная картина наблюдается для кристаллизующихся полимеров. При охлаждении кристаллизующихся полимеров происходит образование структур за счет совместной укладки отрезков макромолекул, что затрудняет переход их из одной конформации в другую. Вследствие этого гибкость макромолекул в обычных условиях проявиться не может и высокоэластичность исчезает (см. рис. 1.1). Высокоэластичность возникает у этих полимеров только при температурах выше температуры плавления. Таким образом, высокоэластическое состояние у кристаллизующихся полимеров находится между температурой плавления ($T_{пл}$) и температурой текучести (T_t) и зависит в значительной степени от молекулярной массы и скорости охлаждения. При быстром охлаждении кристаллические структуры не успевают полностью сформироваться, поэтому они имеют большое число дефектных областей (малая степень кристалличности); при последующем нагревании таких образцов у полимера появляется высокоэластическое со-

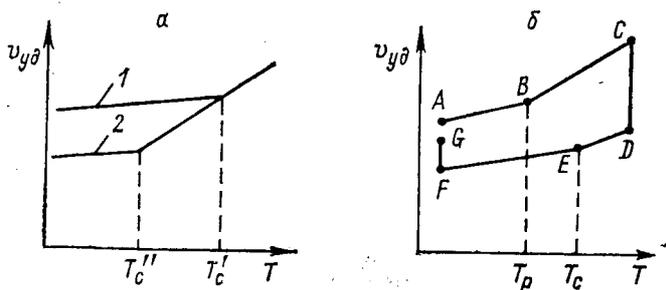


Рис. 1.2. Влияние скорости охлаждения (а) и давления (б) на зависимость удельного объема $V_{уд}$ полистирола от температуры:

1 — быстрое охлаждение; 2 — медленное охлаждение; ABC — нагревание при низком давлении; CD — изотермическое сжатие до 200 МПа; DEF — охлаждение под давлением 200 МПа; FG — снятие давления.

стояние. Кристаллизующийся переохлажденный полимер имеет так называемую замороженную структуру и аналогичен аморфному полимеру, но если в процессе переохлаждения кристаллизация происходит достаточно полно, то у него исчезает высокоэластическое состояние и полимер остается твердым при нагревании вплоть до температуры плавления.

Таким образом, основные физико-химические характеристики стеклообразного и высокоэластического состояний полимеров в значительной степени зависят от условий охлаждения расплава, поэтому последние необходимо учитывать при ведении технологического процесса переработки полимеров.

Не менее важную роль играет и вязкотекучее состояние, в которое полимеры переходят при нагревании до более высоких температур. В вязкотекучем состоянии у полимеров под действием внешних сил развиваются в основном необратимые деформации, т. е. появляется истинное течение, обусловленное движением звеньев макромолекул относительно друг друга. Считают, что при течении вследствие сильного межмолекулярного взаимодействия макромолекулы не могут перемещаться как одно целое, а перемещаются по частям за счет последовательного движения сегментов.

Хотя течение полимера осуществляется вследствие перемещения отдельных частей гибких макромолекул, размер которых не зависит от полной длины макромолекул, тем не менее вязкость полимеров сильно зависит от степени полимеризации (молекулярной массы). Можно предположить, что при увеличении длины цепи в определенных ее точках образуются межмолекулярные зацепления (узлы флуктуационной сетки). Для того чтобы переместить макромолекулу, переплетенную с другой, необходимо усилие большее, чем затрачиваемое на движение отдельной цепи, поскольку молекула захватывает также сцепленные с ней другие макромолекулы. Количество первичных, вторичных и последующих зацеплений резко возрастает по мере увеличения длины цепи, в результате чего зависимость вязкости от молекулярной массы становится нелинейной.

Зависимость вязкости полимеров от молекулярной массы предопределяет их технологическое поведение и диапазон параметров процесса переработки (температура, давление и т. д.). По мере увеличения молекулярной массы затрудняется развитие необратимых деформаций, необходимых для формования, увеличивается склонность к накоплению высокоэластической деформации в готовых изделиях, изменяются механические свойства полимеров. Поэтому появляется необходимость в изменении технологических параметров процесса переработки, выборе соответствующего метода формования и технологической оснастки. Например, маловязкие полимеры используют для нанесения покрытий на бумагу и для формования волокон, а по мере увеличения молекулярной массы оптимальными методами переработки становятся литье под давлением, затем экструзия и прессование. В тех случаях, когда молекулярная масса очень велика и темпе-

ратура переработки становится выше температуры разложения (термодеструкции) полимера, вязкость понижают путем введения пластификаторов или растворителей.

Течение расплавов зависит от ряда факторов и подробно рассмотрено в гл. 2, поэтому в данном разделе остановимся лишь на особенностях перехода различных полимеров в вязкотекучее состояние. Поскольку полимеры способны к развитию необратимых и упругих деформаций как в высокоэластическом, так и в вязкотекучем состоянии, граница между этими областями носит несколько условный характер, а температура текучести зависит от метода ее определения, в частности, от скорости нагревания и условий нагружения. Обычно считают, что переход аморфных полимеров в вязкотекучее состояние происходит при температуре, близкой к температуре текучести, а кристаллических — выше их температуры плавления. К параметрам, определяющим температурную область вязкотекучего состояния, относятся не только скорость охлаждения, но и гидростатическое давление, которое в значительной степени влияет на температуру плавления полимеров. Переход полимеров в вязкотекучее состояние происходит в достаточно широком интервале температур и зависит от внутренних напряжений, возникающих в структурах, а также от неоднородности структур, их видов и размеров.

Определение температуры текучести или плавления необходимо, чтобы установить минимальную температуру переработки полимеров, и тем самым уменьшить развитие необратимых деформаций при формировании изделий из пластмасс. Однако при этом необходимо уточнение температуры переработки в зависимости от результатов реологических исследований и данных дифференциального термического анализа.

Как видно из рассмотренного, каждому физическому состоянию полимера соответствует определенный комплекс физических свойств, знание которых позволяет установить условия переработки и эксплуатации изделий из пластмасс.

1.1.1. Термомеханический анализ полимеров

Температура перехода из одного состояния в другое и вид термомеханической кривой используются для выбора метода и определения условий переработки полимеров. Так, на основании вида термомеханической кривой можно рекомендовать условия переработки. Если переход полимера из кристаллического состояния в вязкотекучее происходит в узком температурном интервале, то при переработке такого полимера необходимо точное регулирование температуры. Аморфные полимеры в интервале применяемых температур переработки могут подвергаться значительному деформированию, например, в зоне плавления экструдера, поэтому шнек в этой зоне может иметь переменную глубину нарезки на сравнительно большой длине. Кристаллические полимеры до температуры плавления почти не деформируются, поэтому для

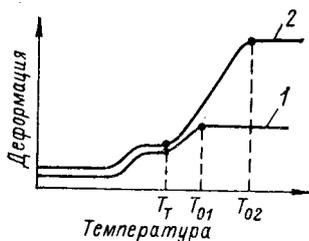


Рис. 1.3. Термомеханические кривые термореактивных материалов с быстроотверждающимся (1) и медленноотверждающимся (2) связующим.

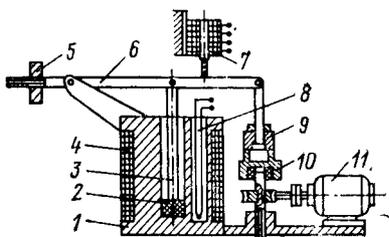


Рис. 1.4. Прибор для измерения термомеханических свойств полимеров:

1 — корпус; 2 — образец; 3 — стержень; 4 — нагреватель; 5 — уравновешивающий груз; 6 — рычаг; 7 — датчик деформации; 8 — термопара; 9 — грузы; 10 — разгружающее устройство; 11 — электродвигатель.

их переработки требуется шнек с длинной зоной загрузки и короткой зоной сжатия, соответственно изменяется и температурный режим нагревания.

Термомеханические кривые термореактивных и термопластичных материалов существенно различаются. После нагревания реактопластов до определенной температуры начинается химическая реакция отверждения связующего и образование пространственной структуры. Вследствие этого вязкость реактопластов повышается, а затем становится настолько большой, что материал теряет способность к развитию необратимых деформаций. При этом в зависимости от исходного состояния и строения связующего изменяется вид термомеханической кривой (рис. 1.3). У пресс-материала, отверждающегося при низкой температуре (кривая 1), температура отверждения T_{01} почти равна температуре текучести T_T , поэтому у него сразу после перехода в вязкотекучее состояние начинается отверждение и исчезает способность к течению. При прессовании такого полимера может наступить преждевременное отверждение, т. е. потеря текучести до завершения процесса формообразования, и изделие получается недопрессованным. У медленноотверждающегося пресс-материала (кривая 2) температуры текучести T_T и отверждения T_{02} значительно различаются, что позволяет варьировать температуру переработки в более широком интервале.

По виду термомеханической кривой можно также косвенно судить о скорости реакции. Чем медленнее происходит отверждение, тем наблюдается более плавный переход от температуры текучести к участку кривой, где отсутствует изменение деформации.

Термомеханические исследования проводят обычно при растяжении плоских образцов или при вдавливании стержня в образец цилиндрической формы. В первом случае испытанию обычно подвергаются пленки, а во втором — образцы, вырезанные из готовых изделий или полученные прессованием из порошка (гранул). Прибор для термомеханических испытаний по вдавливанию стержня (рис. 1.4) состоит из корпуса 1, в измерительную камеру

которого помещается образец испытываемого полимера 2. Деформация образца осуществляется стержнем 3, соединенным с рычагом 6, на который действуют грузы 9. Деформация измеряется с помощью датчика 7, преобразующего линейную деформацию в напряжение, подаваемое на вход двухкоординатного электронного потенциометра. На вход второй координаты потенциометра подается э.д.с. термопары 8, помещенной в камеру с образцом.

Исследование полимеров при действии постоянного внешнего усилия не позволяет выявить количественно высокоэластическую и мгновенную упругую деформации, поэтому применяемые приборы обычно снабжают разгружающим устройством. Для проведения испытаний при циклическом нагружении, прибор имеет электродвигатель 11, который через систему передач и разгружающее устройство 10 периодически поднимает или опускает груз 9. В процессе испытаний груз в течение заданного времени действует на стержень 3 и деформирует образец; затем нагрузка снимается, и образец восстанавливает упругую обратимую деформацию.

Характерная кривая, получаемая при циклическом нагружении, показана на рис. 1.5. Преимущество термомеханической кривой, записанной при циклическом нагружении, заключается в том, что она позволяет более четко выявить переход в высокоэластическое состояние и определить температуру, при которой в вязкотекучем состоянии значительно уменьшаются или полностью исчезают высокоэластические обратимые деформации. Высокоэластическая деформация заметно начинает проявляться выше температуры стеклования, и на диаграмме возникает синусоидальная кривая. Остаточная необратимая деформация до температуры текучести мала, поэтому нижняя ветвь синусоиды идет почти параллельно оси абсцисс, а при $T > T_T$ необратимая деформация значительно возрастает и нижняя ветвь кривой поднимается вверх. Хотя полимер находится в вязкотекучем состоянии, доля обратимой высокоэластической деформации еще сохраняется, эта деформация начинает исчезать несколько выше температуры текучести. Таким образом, амплитуда колебаний кривой является величиной, характеризующей упругую деформацию. Определение температуры исчезновения упругой деформации имеет большое практическое значение, поскольку она связана с эластическим восстановлением струи расплава полимера и, следовательно, влияет на размеры экструзионных изделий.

Из изложенного следует, что термомеханический метод исследования полимеров может быть использован как для определения характерных температур перехода из одного физического состояния

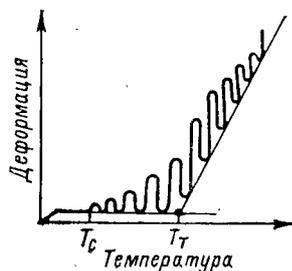


Рис. 1.5. Термомеханическая кривая аморфного полимера, снятая при циклическом нагружении образца.

в другое, так и для оценки перерабатываемости полимеров и выявления некоторых особенностей их строения. Следует заметить, что термомеханический метод не дает полной информации о перерабатываемости полимеров и его обычно используют в сочетании с другими методами, например, с дифференциально-термическим анализом и реологическими исследованиями.

1.1.2. Дифференциально-термический анализ полимеров

Дифференциально-термический анализ (ДТА) основан на измерении разности температур между исследуемым и инертным (эталонным) веществом с помощью дифференциальной термопары. При одновременном нагревании исследуемого и эталонного веществ с постоянной заданной скоростью температура в обеих ячейках будет постоянной до тех пор, пока в веществах отсутствуют какие-либо процессы, сопровождающиеся поглощением или выделением теплоты. При наличии тепловых эффектов в исследуемом полимере его температура будет отличаться от температуры эталонного вещества, в котором тепловые эффекты отсутствуют, что и регистрируется прибором.

Прибор для ДТА (рис. 1.6) состоит из измерительного блока 1, в котором установлены ячейка 2 с эталонным веществом и ячейка 8 с исследуемым полимером. Термопара 4 соединяется с термопарой 7 таким образом, что на входе в усилитель 5 подается разность их э.д.с., пропорциональная разности температур ΔT между измерительной и эталонной ячейками. Температура $T = \varphi(t)$ исследуемого вещества измеряется термопарой 7 и подается одновременно с сигналом разности температур ΔT на вход двухкоординатного потенциометра 6. Изменение температуры во времени осуществляется нагревателем 3 и задается терморегулятором 10, соединенным с термопарой 9 и с программным устройством 11. Для исследования берут навеску полимера в количестве 0,3—1,0 г в виде порошка или гранул и такое же количество эталонного вещества. Эталонное вещество должно иметь примерно такую же теплоемкость и теплопроводность, как у полимера, и у него при нагревании должны отсутствовать фазовые переходы или другие процессы, сопровождающиеся выделением или поглощением теплоты.

Результаты исследований, как правило, записываются на диаграмме, при этом вид кривой зависит от строения полимера

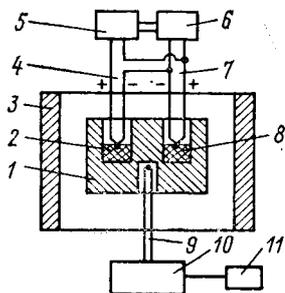
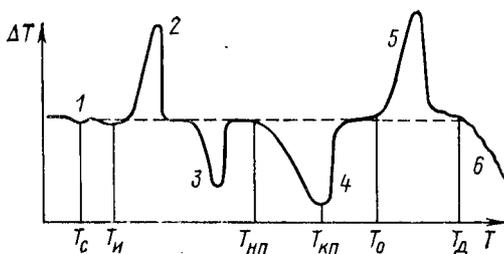


Рис. 1.6. Схема прибора для дифференциально-термического анализа:

1 — измерительный блок; 2 — ячейка с эталонным веществом; 3 — нагревательная печь; 4, 7, 9 — термопары; 5 — усилитель напряжения; 6 — двухкоординатный потенциометр; 8 — ячейка с исследуемым веществом; 10 — терморегулятор; 11 — программное устройство терморегулятора.

Рис. 1.7. Диаграмма ДТА кристаллического полимера.



и его кристалличности. Для пояснения возможных характерных участков кривой записи ДТА рассмотрим рис. 1.7. Первый незначительный перегиб 1 на диаграмме обычно соответствует переходу

из стеклообразного в высокоэластическое состояние, а среднее значение этой области по шкале температур соответствует температуре стеклования T_c . Данный изгиб на кривой ДТА (скачок температуры) обусловлен изменением теплоемкости, поэтому количественно он очень мал и регистрируется лишь на весьма чувствительных приборах. Второй изгиб на кривой ДТА соответствует испарению влаги или улетучиванию низкомолекулярных продуктов, если они имеются в полимере.

Если полимер перед испытанием имел замороженную кристаллическую структуру, то при нагревании может появиться пик кристаллизации (область 2) или эндотермический пик перехода кристалл — кристалл (область 3). При дальнейшем нагревании появляется пик плавления (область 4), при этом нижняя граница области соответствует температуре начала плавления $T_{нп}$, а вершина — температуре окончания процесса плавления $T_{кп}$. Если исследуются образцы различных полимеров при одинаковой навеске, то по площади пика можно косвенно судить о степени кристалличности. Чем больше площадь пика, тем соответственно меньше дефектность кристаллической структуры и больше степень кристалличности. Температура T_0 соответствует началу термоокислительного процесса в полимере (кривая поднимается вверх), если же начинается процесс термодеструкции (температура T_d), то кривая идет вниз. Таким образом по форме кривой ДТА и площадям пиков можно судить о строении полимера; найденная при этом температура плавления $T_{кп}$ должна соответствовать температуре текучести T_t . Интервал температур между $T_{кп}$ и T_0 или T_d определяет в первом приближении температурную область переработки полимеров. Вне этой области температур полимеры, как правило, не перерабатываются. Для отдельных полимеров интервал температур переработки весьма значителен, поэтому далее мы рассмотрим способы его ограничения с выходом на оптимальный температурный режим переработки.

Температура термодеструкции или термоокисления не является определяющей для выбора максимально допустимой температуры переработки, эта температура фактически всегда ниже, поскольку зависит от интенсивности разложения полимера и времени пребывания полимера в нагретом состоянии.

1.1.3. Длительная термостойкость полимеров

Процессы формования изделий обычно осуществляются при заданной температуре в течение определенного времени. Следовательно, для полной характеристики термостойкости полимера нужно знать не только температуру термодеструкции, но и время, в течение которого полимер может подвергаться воздействию этой температуры без заметного изменения свойств, т. е. «длительную термостойкость».

Для определения длительной термостойкости обычно используют зависимости изменения таких показателей полимеров, как механическая прочность, твердость, электрическая прочность, тангенс угла диэлектрических потерь, от продолжительности воздействия температуры. Для лабораторных исследований удобнее косвенные показатели изменения свойств полимеров — количество летучих компонентов, выделяющихся во времени при данной температуре, изменение массы полимера или вязкости его расплава. Для обоснования максимально допустимой температуры переработки обычно применяют зависимости изменения времени, в течение которого полимер сохраняет свои первоначальные свойства, от температуры, т. е. зависимость длительной термостойкости от температуры.

Рассмотрим способ определения длительной термостойкости по изменению массы образца и тепловых эффектов с помощью специального прибора — дериватографа (рис. 1.8). Навеску полимера помещают в ячейку 1, которая устанавливается в нагревательную печь 3 и опирается на одно из плеч коромысла весов 7. Коромысло 7 при помещении навески находится в равновесии, второе его плечо соединено с зеркалом 6 для передачи луча света от осветителя 5 на записывающий барабан 4.

В данном приборе одновременно с регистрацией изменения массы (кривая ΔG) фиксируется скорость изменения массы во времени (дифференциальная кривая изменения массы) dG/dt , для чего коромысло весов соединено с датчиком скорости. Одновременно регистрируются происходящие в полимере тепловые эффекты с помощью термопар, установленных в ячейках 1 и 2 и соединенных, как в приборе ДТА. В случае начала процесса термодеструкции или термоокисления появляется разность э. д. с. термопар, которая замеряется гальванометром 8 и записывается также на барабане 4.

Система находится в равновесии до тех пор,

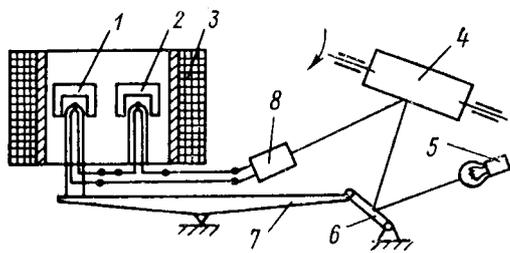


Рис. 1.8. Схема прибора (дериватографа) для исследования длительной термостойкости полимеров: 1 — ячейка для исследуемого вещества; 2 — ячейка для эталонного вещества; 3 — нагревательная печь; 4 — записывающий барабан; 5 — осветитель; 6 — зеркало; 7 — коромысло; 8 — зеркальный гальванометр.

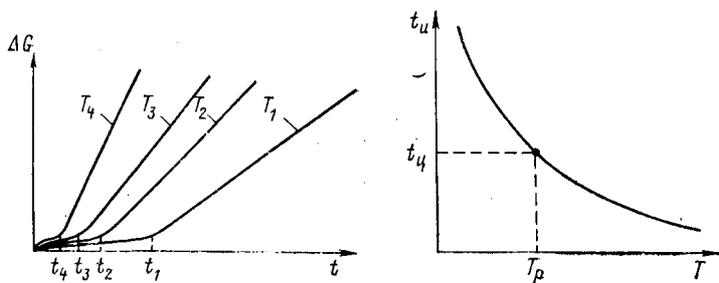


Рис. 1.9. Зависимость изменения массы образцов полимера ΔG от времени t пребывания их при различных температурах T .

Рис. 1.10. Зависимость индукционного периода термодеструкции t_{II} от температуры T .

пока не начнется изменение массы или температуры образца. Время, в течение которого в полимере при данной температуре почти не происходит изменения свойств, принимают за длительную термостойкость. Это время правильнее было бы назвать индукционным периодом термодеструкции T_{II} .

Проведя испытания при различных температурах, получаем серию кривых (рис. 1.9), по точкам перегиба которых можно найти значения индукционного периода при различных температурах. Полученные данные в виде графика (рис. 1.10) используют для определения максимально допустимой температуры переработки полимера. Для того чтобы в процессе переработки свойства полимеров не ухудшались, время пребывания расплава при данной температуре должно быть всегда меньше или равно индукционному периоду. Зная время нахождения полимера в перерабатывающей машине t_{II} (время цикла), по рис. 1.10 находим максимально допустимую температуру нагрева полимера T_p . Повышать температуру переработки больше T_p нецелесообразно, так как могут ухудшаться свойства изделий.

Следует отметить, что при формовании изделий на расплав действуют также сдвиговые усилия, которые могут привести к механодеструкции. Испытания по описанному методу проводятся без сдвиговых деформаций, поэтому найденное значение длительной термостойкости получается завышенным по сравнению с производственными данными.

Более точное значение можно получить при определении длительной термостойкости на ротационных вискозиметрах (см. гл. 2). В этом случае, получив зависимость изменения вязкости от времени при различных температурах, строят график и по точкам перегиба кривых находят длительную термостойкость (индукционный период), а затем максимально допустимую температуру переработки (аналогично рис. 1.9 и 1.10).

1.2. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ И АМОРФНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Полимеры могут находиться в трех фазовых состояниях: кристаллическом, жидком (или аморфном) и жидкокристаллическом.

В кристаллическом фазовом состоянии имеется дальний трансляционный порядок в расположении частей макромолекул, при этом принцип плотной упаковки молекул осуществляется за счет параллельного расположения их осей. Кристаллизация из расплава приводит к образованию полимеров, имеющих микрокристаллическое строение и состоящих из большого числа отдельных полимерных кристаллитов размером примерно от 10^{-8} до 10^{-6} м. Структура кристаллитов определяется строением молекул полимера. Так, для полимеров, имеющих гибкие макромолекулы, термодинамически более выгодной оказывается макромолекула не полностью вытянутая, а многократно сложенная так, что значительные части ее боковой поверхности примыкают друг к другу, при этом на участках складывания образуются домены. Поэтому представляется, что макромолекулы расплава таких полимеров расположены не хаотически, а в известной степени упорядоченно — в виде фибрилл, образованных из доменов, которые связаны проходными участками (рис. 1.11). Локализованные области (домены) состоят из сложенных участков, при этом углеродные атомы макромолекулы расположены в одной плоскости и образуют зигзаг.

Время существования таких образований в расплаве при различных температурах, а также при течении в процессе переработки остается неясным: происходит ли полный их распад или они разрушаются только частично в зависимости от интенсивности сдвига одних слоев расплава по отношению к другим. Вероятнее всего они не разрушаются полностью и при охлаждении становятся центрами кристаллизации.

Несколько доменов, соединяясь друг с другом по плоскостям складывания, образуют первичные структурные элементы — кристаллиты, из которых в процессе охлаждения возникают пластинчатые промежуточные структуры — ламели. Если в процессе складывания концы молекулы находятся в разных плоскостях, то между кристаллитами, а соответственно и между ламелями, образуются «мосты», т. е. они соединяются проходными участками

молекул. Некоторые макромолекулы проходят через ламель только один раз, затем попадают в дефектную кристаллическую область и входят в другие ламели. Другая часть мак-

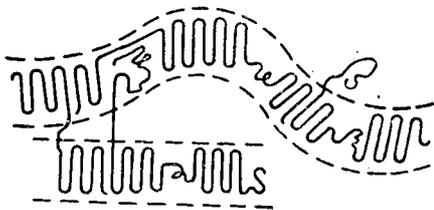
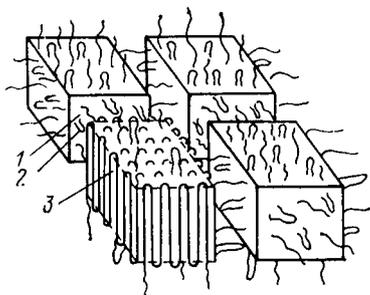


Рис. 1.11. Схематичное изображение структуры расплава полимера, имеющего доменно-фибрилярное строение.

Рис. 1.12. Схематичное изображение строения ламели кристаллического полимера:

1 — кристаллит; 2 — петля; 3 — проходной участок макромолекулы.



ромолекул после выхода из кристаллита может снова вернуться в него, при этом между ламелями образуются петли. Таким образом, ламель состоит из кристаллитов 1, петлеобразных участков макромолекул 2 и проходных участков 3 (рис. 1.12).

Следует отметить, что чем больше между ламелями в данном направлении проходных участков макромолекул и меньше петель, тем прочнее будет в этом же направлении изготовленное изделие. Этот факт имеет принципиально важное значение и его используют в технологии переработки. Так, выбирая условия формования и направление течения расплава, можно изменять качество изделия.

За счет проходных молекул или образования петлеобразных участков, выходящих из плоскости складывания, возникают дефектные (аморфные) области, связанные с кристаллитами. Но при этом полимер, как бы велико не было содержание в нем аморфных областей, остается однофазной кристаллической системой, так как физическое разделение этих областей невозможно. Поэтому неупорядоченные области на границе между ламелями можно рассматривать как дефекты кристаллической структуры. При этом в межламелярное пространство, как правило, вытесняются некристаллические компоненты (низкомолекулярные фракции полимера, примеси, боковые ответвления макромолекул и т. д.). Дефектность кристаллических структур обычно характеризуют степенью кристалличности, которая зависит как от строения полимера, так и от условий кристаллизации. Например, среднее значение степени кристалличности полиэтилена высокой плотности 80—90 %, а полиэтилена низкой плотности 50—60 %. Это снижение степени кристалличности объясняется тем, что узлы разветвлений полиэтилена низкой плотности не входят в кристаллическую решетку или, входя в нее, образуют сильно дефектные решетки.

В зависимости от строения полимера, а также условий кристаллизации образуются кристаллические структуры, состоящие из различных элементарных ячеек, которые отличаются взаимным расположением цепей макромолекул. Так, для поликарбоната, полиэтилена и некоторых других полимеров наиболее характерна орторомбическая кристаллическая ячейка, показанная на рис. 1.13. Подобная ячейка построена из зигзагов макромолекул, сдвинутых относительно друг друга вдоль оси *a*. Ячейка содержит пять звеньев макромолекул, одно в центре и четыре в углах, направленных вдоль оси *c*. Размеры ячейки обозначают с помощью

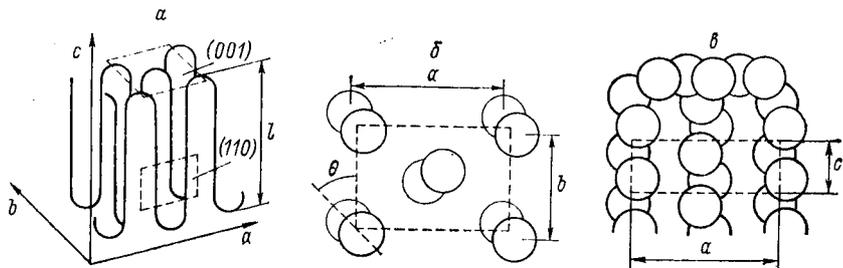


Рис. 1.13. Схема расположения макромолекул в кристаллической структуре, построенной из орторомбических элементарных ячеек:
 а — пространственное расположение зигзагов макромолекул; б — вид вдоль оси c ;
 в — проекция на плоскость $a-c$.

линейных величин по координатам a — b — c . Если проанализировать строение кристаллитов относительно расположения в них зигзагообразных участков (доменов) макромолекул, то вероятнее всего сложенные участки (зигзаги макромолекул) располагаются в плоскости параллельной большой оси a , т. е. в плоскости (110) кристалла (рис. 1.13, а). Плоскость складывания (001) обычно параллельна поверхности ламели. Предположение о параллельности плоскости домена оси a подтверждается экспериментально. Так, в пленках, полученных экструзией (непрерывным выдавливанием расплава через щель), методом поляризационной спектроскопии установлено, что ось a направлена вдоль течения расплава. Из этого следует, что большая ось домена преимущественно всегда направлена при течении расплава вдоль приложенного напряжения сдвига.

Расположение осей элементарной кристаллической ячейки, возникающее в процессе переработки полимеров, имеет большое практическое значение, так как в зависимости от него изменяются прочность, усадка и другие показатели изделий. Изменяя условия течения расплава при формовании, можно целенаправленно управлять технологическим процессом переработки полимеров, обеспечивая высокое качество изделий.

Кроме рассмотренной орторомбической упаковки макромолекулы полимеров могут образовывать триклинную, моноклинную, гексагональную и другие виды ячеек. Моноклинная или триклинная упаковка получается при сжатии (прокатке) полиэтилена (рис. 1.14). Полиморфизм наблюдается также у других полимеров. Например, различные модификации известны у поливинилиденфторида, полиамидов и др.

При замещении атомов водорода в молекулах полимеров атомами хлора или фтора (поливинилхлорид, поливинилфторид) плоский зигзаг возникнуть не может, поэтому полимерные молекулы имеют спиральную конформацию. Таким же строением обладают изотактические полипропилен и полистирол.

Жидкокристаллическое фазовое состояние является промежуточным (мезоморфным) между кристаллическим и жидким (аморф-

ным). Жидкокристаллическую фазу нематического типа образуют жесткоцепные полимеры из концентрированного раствора или расплава, если отсутствуют кинетические помехи. Для жидкокристаллического состояния характерна параллельная упорядоченность молекул в некоторой области пространства (домене), в то время как сами домены расположены беспорядочно. Образование жидкокристаллической фазы в гибкоцепных полимерах возможно только под действием растягивающего поля — механического или гидродинамического. Под действием силового поля происходит разворачивание цепей и уменьшение гибкости макромолекул, так что система переходит в жидкокристаллическую нематическую фазу или истинно кристаллическую с выпрямленными цепями. Подобные приемы используют в технологических процессах получения высокопрочных волокон.

Жидкое фазовое состояние характерно для аморфных полимеров, а также кристаллизующихся полимеров при температурах выше температуры плавления. В жидкое фазовое состояние можно перевести некоторые кристаллизующиеся полимеры при очень быстром охлаждении расплава, при этом наблюдается ближний порядок в расположении отдельных участков макромолекул и отсутствие дальнего порядка. Однако в случае макромолекул, возникает двойственность понятий «близко» и «далеко», так как расстояния, достаточно малые по отношению к длине цепной молекулы, могут быть очень большими по отношению к размеру сегмента. В связи с этим необходимо уточнять, о каких упорядоченных структурных элементах идет речь.

Полимеры в жидком фазовом состоянии могут иметь три типа структур: 1) ближний порядок, когда в пределах малых областей атомы расположены более или менее регулярно; 2) термически нестабильные кристаллиты, которые сохраняются выше температуры плавления, однако вследствие тепловых флуктуаций они непрерывно исчезают и вновь возникают; 3) пачки, способные в свою очередь к образованию более сложных структур дендритного типа. Некоторые из этих структур существуют в расплаве и в стеклообразном состоянии, однако в первом случае они флуктуируют, а во втором «заморожены». Следует отметить, что вероят-

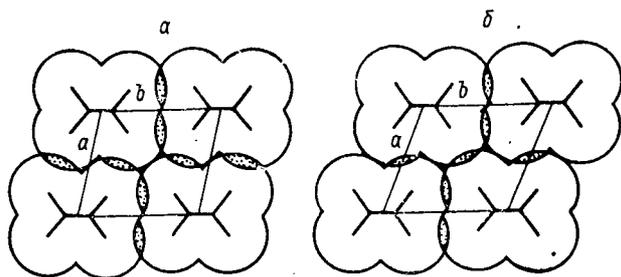


Рис. 1.14. Теоретическая плотная упаковка молекул полиэтилена: а — триклинная; б — моноклинная.

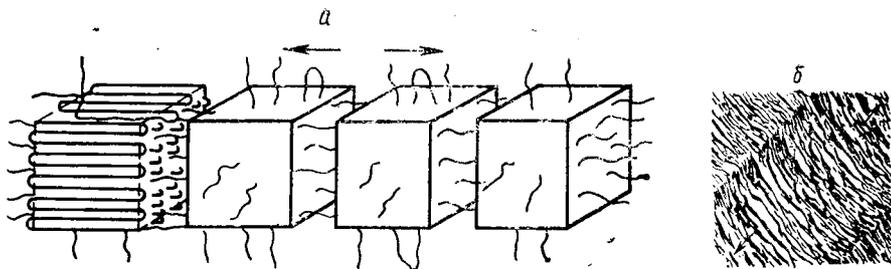


Рис. 1.15. Фибриллярное строение полимеров, подвергнутых холодной вытяжке в направлении, показанном стрелками:

а — схема строения фибриллы; б — электронная микрофотография поверхности образца.

нее всего кристаллиты в жидком фазовом состоянии построены из доменов и характерны для молекул, обладающих гибкостью и способных к образованию плоского зигзага. Структуры в виде пачек возникают преимущественно из молекул, имеющих спиральную конформацию.

В полимерах могут происходить структурные превращения. Так, растяжение аморфных полимеров в высокоэластическом состоянии превращает исходное изотропное тело в одноосноориентированное анизотропное аморфное тело, при этом существенно изменяется весь комплекс его свойств. Появляется анизотропия прочности, оптических и других физических показателей.

Структурные превращения наблюдаются также у кристаллических полимеров при их растяжении или термообработке. Глубина распада исходных кристаллических структур и степень их обновления в основном зависят от условий вытяжки (скорости и температуры), а также от строения макромолекул. Процесс перестройки структуры при растяжении может протекать по двум схемам: 1) поворот структур без их разрушения; 2) распад исходных элементов и образование новых форм. В процессе ориентации по первой схеме вначале начинают вытягиваться проходные участки макромолекул, расположенные в аморфных областях. По мере увеличения деформации начинается сдвиг ламелей друг относительно друга, разворот их и раскручивание в плоскости, перпендикулярной направлению вытяжки. При этом, вероятно, возможны процессы рекристаллизации структур, которые не могут развернуться относительно оси вытяжки. При больших удлинениях ось c ячейки кристалла ориентируется вдоль вытяжки, а оси a и b — перпендикулярно.

Образующаяся структура имеет фибриллярное строение и состоит из почти выпрямленных участков проходных молекул и ламелей, расположенных своими плоскостями перпендикулярно оси вытяжки (рис. 1.15). При этом в плоскости растяжения расположено наибольшее число проходных молекул, что обуславливает высокую прочность вдоль ориентации. Прочность же изделий в перпендикулярном направлении значительно ниже.

Изменяя температуру при вытяжке, можно увеличить или уменьшить большой период l (толщину ламелей) (см. рис. 1.13). Изменение большого периода при ориентации происходит вследствие изменения расстояния между кристаллитами, которое обусловлено растяжением или сжатием аморфных прослоек, а также вращением кристаллитов вследствие межламелярного скольжения, а также изменением наклона складок внутри кристаллитов.

На структурных превращениях основан процесс ориентации полимерных изделий с целью повышения их прочности.

1.3. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ

В процессе изготовления изделий полимер подвергается нагреванию до высоких температур, деформации сдвига или растяжения (сжатия), а также последующему охлаждению. В зависимости от параметров перечисленных операций в значительной мере изменяется структура полимера и конформация макромолекул, а также физико-механические, оптические, диэлектрические и другие характеристики полимеров.

Рассмотрим процесс кристаллизации при переработке полимеров. Способность полимеров кристаллизоваться определяется двумя факторами — кинетическим (подвижностью цепей) и термодинамическим (изменением энергии Гиббса при кристаллизации). Для образования совершенной структуры необходимо, чтобы звенья были регулярно связаны в пределах полимерной цепи. Любое нарушение регулярности понижает склонность полимеров к кристаллизации.

В связи с тем что для осуществления кристаллизации полимеры должны обладать определенной подвижностью сегментов молекул, образование надмолекулярных структур может протекать только в определенном интервале температур, а именно, выше температуры стеклования и ниже температуры плавления. Существует группа жесткоцепных полимеров, у которых температура стеклования выше температуры химического разложения (например, целлюлоза), поэтому они могут находиться только в жидком (аморфном) фазовом состоянии. Большую группу полимеров, не способных кристаллизоваться, образуют терморектопласты, к числу которых относятся, например, фенолоформальдегидные смолы.

Кристаллизация из расплава в равновесном состоянии (без деформации), как правило, приводит к образованию сферолитных структур по схеме, показанной на рис. 1.16. При охлаждении расплава из кристаллита 1 , являющегося центром кристаллиза-

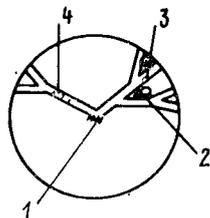


Рис. 1.16. Схема образования сферолита:

1 — зародыш кристаллизации; 2 — аморфная область; 3 — фибриллы; 4 — аморфные участки фибриллы.

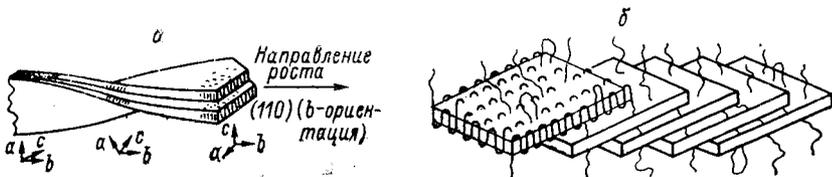


Рис. 1.17. Модель, поясняющая характер молекулярной ориентации в сферолите полиэтилена;

a — поворот фибриллы; *b* — структура фибриллы.

ции, образуются лучеобразные фибриллы 3, состоящие из множества упакованных ламелей. Фибриллы, разрастаясь в радиальном направлении и в ширину за счет боковых ответвлений, образуют сферообразные структуры. Естественно, при образовании сферолитов могут возникать дефектные кристаллические области 2 или 4, которые располагаются между фибриллами или в межламелярном пространстве непосредственно в фибрилле. Благодаря тому, что рост сферолитов происходит из множества центров кристаллизации, весь объем полимера быстро кристаллизуется, при этом в местах контакта сферолитов друг с другом образуются грани. Таким образом, сферолиты представляют собой многогранники несколько произвольной формы и размеров.

В радиальных сферолитах ось *a* и *c* элементарной ячейки перпендикулярны фибрилле сферолита, а ось *b* параллельна ей. При этом ось *c* всегда располагается перпендикулярно к плоскости ламели. За счет агрегации доменов в плоскостях, параллельных оси *a* ячейки, сферолиты увеличиваются в размерах в радиальном направлении и одновременно происходит скручивание фибриллы относительно своей большой оси (рис. 1.17, *a*).

Как показали электронно-микроскопические снимки, кристаллические поверхности полимеров имеют крышеподобный вид. Поэтому фибриллу сферолитов нужно представлять не в виде сплошной ламели, а составленной из множества ламелей, уложенных друг на друга (рис. 1.17, *b*) и скрученных вокруг радиуса сферолита. При наблюдении через оптический микроскоп с использованием поляризованных лучей установлено, что для радиальных сферолитов характерна картина погасания лучей в виде мальтийского креста (рис. 1.18, *a*). Это говорит о приблизительно параллельной, но в достаточной степени беспорядочной ориентации фибриллярных элементов в сферолите. Для кольцевых же сферолитов характерно вырождение картины мальтийского креста в зигзагообразную линию (рис. 1.18, *b*). Это указывает на то, что фибриллы кольцевых сферолитов в процессе роста самопроизвольно скручиваются вокруг центра сферолита и кристаллографическое направление постепенно поворачивается относительно радиуса, образуя право- и левовращающиеся спирали, если смотреть вдоль радиуса. Считают, что кольцевые сферолиты возникают при повышенных температурах кристаллизации или из полимеров, имеющих разветвленное строение макромолекул.

Если кристаллизация происходит из расплава, подвергнутого предварительному деформированию за счет сдвига или вытяжки, то образуются сплюснутые сферолиты или сферолиты в виде эллипсоидов вращения. При этом большая ось эллипсоида и кристаллографическая ось a ячейки совпадают с направлением деформации, так как кристаллизация происходит из фибрилл, ориентированных по направлению действия внешней силы. Изделия в этом случае прочнее в направлении течения, так как вдоль него ориентирована ось a и, следовательно, проходных участков молекул в направлении течения на единицу площади будет больше, чем в направлении, перпендикулярном течению.

При деформировании полимеров непосредственно в процессе кристаллизации могут образовываться структуры, построенные из кристаллов с выпрямленными и сложенными цепями. При действии напряжений сдвига макромолекулы разворачиваются вдоль течения, при этом домены их располагаются в плоскости сдвига xz , как показано на рис. 1.19. При кристаллизации из междоменных ориентированных участков возникают структуры с выпрямленными цепями, а из доменов — кристаллы со сложенными цепями, ось c ячейки которых направлена вдоль оси x . Далее при увеличении силовых воздействий на расплав образуются бикомпонентные кристаллы типа «шиш-кебаб» («шашлыкоподобные» структуры).

В структурах типа «шиш-кебаб» центральное волокнообразное ядро состоит большей частью из пакетных кристаллов, образованных выпрямленными макромолекулами, вокруг которых начинают расти ламелярные структуры из зигзагообразных макромолекул. Содержание кристаллов с выпрямленными цепями возрастает



Рис. 1.18. Различные виды сферолитов:
 a — радиальный; b — кольцевой.

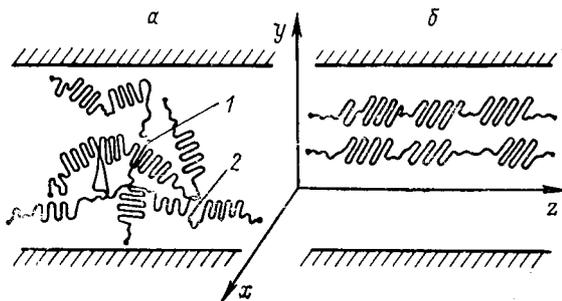


Рис. 1.19. Изменение конформации макромолекул под действием напряжения сдвига:

a — в равновесном состоянии; *б* — при течении расплава.

с увеличением напряжения сдвига или скорости деформации. Следует отметить, что напряжение сдвига повышается с ростом вязкости и скорости течения расплава. Структуры, внешне похожие на рассмотренные, образуются при литье под давлением в холодную форму полиамида П-68. На микросрезках образцов полимера видны чередующиеся слои аморфного и кристаллического строения. При этом по форме кристаллические области вдоль направления течения расплава (рис. 1.20, *a*) и в перпендикулярном течению направлении (рис. 1.20, *б*) различаются. На срезе вдоль течения видны структуры, ориентированные перпендикулярно центральному слою.

Если кристаллизация протекает под высоким давлением (300—500 МПа) и при высокой температуре, то из расплавов преимущественно образуются кристаллические структуры из выпрямленных цепей. При том же давлении, но при быстром охлаждении кристаллизация происходит в основном из сложенных цепей. Макромолекулы в расплаве находятся в виде доменов, и быстрое охлаждение не позволяет им перейти в новую конформацию, т. е. приобрести вытянутую форму. Необходимо отметить, что при увеличении давления изменяется температура кристаллизации (точка перегиба кривых на рис. 1.21). Так у полиэтилена высокой плотности при давлении 200 МПа температура кристаллизации повышается до 185 °С. Это имеет практическое значение, так как

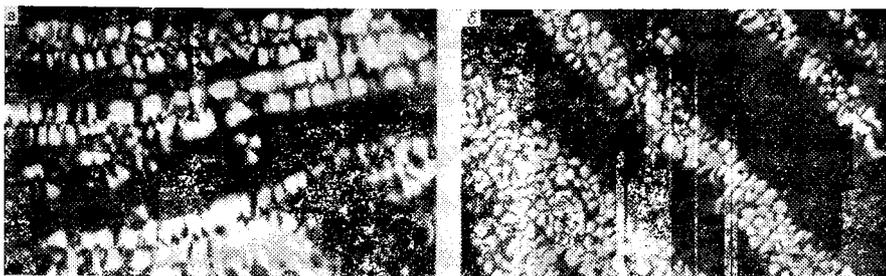


Рис. 1.20. Структура микросреза изделия, полученного из полиамида П-68 литьем под давлением:

a — микросрез вдоль течения расплава; *б* — микросрез поперек течения расплава.

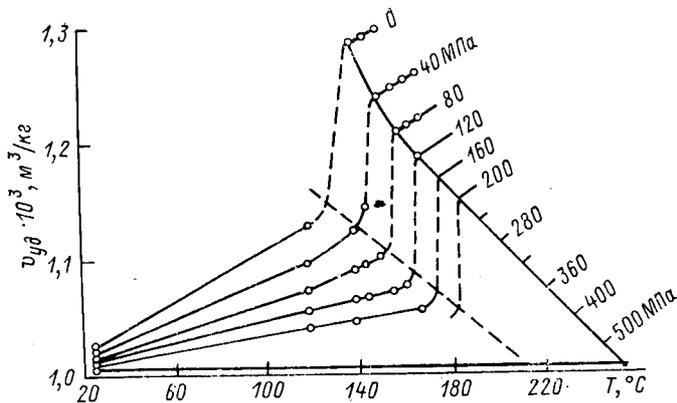


Рис. 1.21. Зависимость изменения удельного объема полиэтилена $V_{уд}$ от температуры T .

при больших давлениях, создаваемых в форме при литье, полимер может непосредственно из расплава без охлаждения переходить в квазикристаллическое состояние; при этом исключаются течение и затормаживаются релаксационные процессы.

При повышении давления вследствие более плотной упаковки макромолекул в значительной степени должна увеличиваться механическая прочность изделий. Даже в тех случаях, когда давление при кристаллизации невелико и образуются структуры из сложенных цепей, прочность изделий выше, чем при кристаллизации без давления. Это объясняется тем, что при кристаллизации под давлением образуются более мелкие сферолитные структуры. Однако имеются данные о неоднозначном изменении свойств полимеров в зависимости от давления. Так, на кривых зависимости от давления плотности, механической прочности и других свойств имеется два максимума при изменении давления от 20 до 200 МПа: один в области 60 МПа, а второй — 140 МПа.

На размеры кристаллических образований очень сильно влияют скорость охлаждения полимеров и температура расплава в процессе переработки. При высокой скорости охлаждения образуются мелкокристаллические структуры, так как времени на перегруппировку молекул недостаточно и кристаллизация заканчивается на промежуточной стадии. Применяя быстрое охлаждение, можно из кристаллизующегося полимера получить полимер с «замороженной» структурой, подобной аморфному. В процессе резкого охлаждения (закалки) в полимере образуются весьма мелкие кристаллические элементы, вероятно, на уровне кристаллитов. С течением времени в таких полимерах при температуре выше температуры стеклования, но немного ниже температуры плавления будет происходить «холодная» кристаллизация с образованием преимущественно пакетных кристаллов. Это наиболее характерно для полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Так, при нагре-

ванны образцов ПЭТФ с замороженной структурой до 130 °С его скорость кристаллизации сопоставима со скоростью ламелярной кристаллизации из расплава при 200 °С, но достигаемая при этом степень кристалличности не превышает 40 %. Повысить степень кристалличности можно только с помощью отжига (термообработки) при более высокой температуре.

Получить полимер с более крупной структурой можно в результате увеличения температуры кристаллизации (выдержка при определенной температуре и медленное охлаждение) или предварительного нагревания расплава перед кристаллизацией до более высокой температуры. Последнее способствует разрушению первичных структурных образований, являющихся центрами кристаллизации, и кристаллизация из такого расплава, содержащего небольшое число центров кристаллизации, приводит к образованию крупнокристаллических структур.

Форму кристаллических структур можно изменять, используя в качестве поверхностей кристаллизации подложки из различных материалов. Так, при кристаллизации полиэтилена на подложке из политетрафторэтилена у поверхности пленки возникает большое число центров кристаллизации и образуется плотноупакованный кристаллический слой. Этот слой состоит из перпендикулярно расположенных у поверхности продолговатых (анизотропных) кристаллов, по форме напоминающих слоевые структуры, показанные на рис. 1.20, а.

Одним из методов воздействия на процесс кристаллизации является введение в расплав небольшого количества искусственных зародышей кристаллизации (1—2 %). При охлаждении расплава они являются дополнительными центрами, в которых начинается кристаллизация, при этом геометрическая форма введенного зародышевого кристалла определяет конфигурацию кристаллических структур. Так, на мелких кристаллах растут сферолитные образования, на длинных игольчатых кристаллах — лентообразные структуры. При использовании в качестве структурообразователей нитевидных кристаллов ализарина образуются пленки с анизодиаметрической ленточной структурой.

В качестве структурообразователей кроме перечисленных ранее веществ используют также окислы алюминия и ванадия, кварц, двуокись титана и др. Вводимые зародыши кристаллизации обычно не влияют на степень кристалличности, большой период складывания и степень молекулярной ориентации кристаллов, но приводят, как правило, к измельчению сферолитной структуры полимера.

Механизм взаимодействия полимера со структурообразователем окончательно не раскрыт, однако считают, что на границе раздела возникают напряжения, способствующие началу кристаллизации. Наличие напряжений в процессе кристаллизации приводит к созданию структурных элементов, устойчивых к более высоким температурам, чем при кристаллизации в равновесных условиях. Вследствие адгезионных сил на кристаллической по-

верхности структурообразователей могут образовываться монослои с упорядоченной укладкой макромолекул, что в дальнейшем обеспечивает направленную кристаллизацию полимера и создание упорядоченных структур. Кроме этого, вводимые частицы обладают обычно большей теплоемкостью, чем полимер, поэтому на границе с этими центрами могут возникать температурные градиенты, инициирующие начало кристаллизации вследствие местного переохлаждения.

При переработке полимеров обычно имеют место нестационарные условия теплопередачи и скорость охлаждения изменяется по толщине изделия. Поэтому в большинстве случаев образуются неоднородные по размерам кристаллические структуры (более мелкие в поверхностных слоях) и полимер имеет меньшую степень кристалличности. У таких полимеров, как поликарбонат, полиамид, полиэтилентерефталат, поверхностный слой имеет аморфное строение, а во внутренних слоях образуются кристаллические структуры больших размеров.

В тех случаях, когда необходимо достичь однородности свойств по толщине изделия, применяют отжиг или последующую термообработку изделий при температурах ниже температуры плавления. При отжиге происходит увеличение большого периода l , т. е. длины складывания участка макромолекулы (см. рис. 1.13, а). Механизм утолщения ламели состоит в том, что отдельные сегменты сложной цепи выходят из ламели, вследствие чего образуются более длинные зигзаги. При этом число складок уменьшается, а их длина соответственно увеличивается. В результате уменьшения объема, занимаемого в полимере проходными молекулами и их петлеобразными участками, с увеличением большого периода возрастает плотность полимера (рис. 1.22). При этом чем выше температура и чем больше время выдержки, тем выше плотность полимера.

Термообработка целесообразна в тех случаях, когда необходимо повысить твердость, модуль упругости,

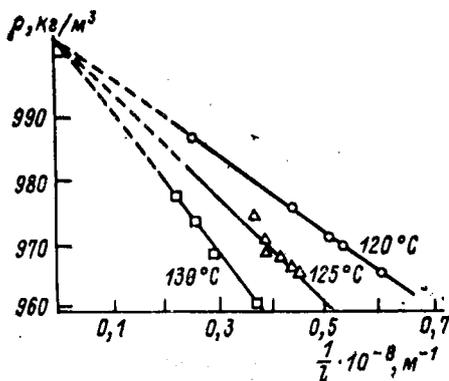


Рис. 1.22. Зависимость плотности монокристаллов полиэтилена от обратной величины большого периода $1/l$.

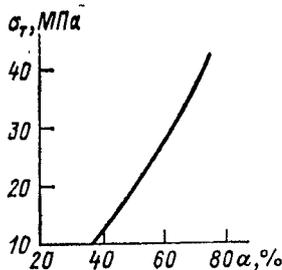


Рис. 1.23. Зависимость предела текучести полипропилена от степени кристалличности α .

механическую прочность, теплостойкость и стойкость к циклическим нагрузкам. Однако такие показатели, как относительное удлинение, ударная вязкость, при термообработке понижаются.

Из изложенного следует, что в зависимости от размеров и формы кристаллов изменяются свойства полимеров. Несмотря на некоторые частные зависимости, обусловленные строением полимеров, для большинства из них характерна взаимосвязь механической прочности и степени кристалличности. Так, для полипропилена эта зависимость (рис. 1.23) весьма существенна и предел текучести (предел вынужденной эластичности) изменяется почти в 4 раза, а ударная вязкость и относительное удлинение уменьшаются.

В большинстве случаев, когда изделия должны эксплуатироваться под нагрузкой в течение длительного времени, наилучшей структурой полимера является мелкокристаллическая. Однако окончательный выбор условий кристаллизации с целью получения заданной структуры может быть сделан лишь с учетом комплекса требований, предъявляемых к изделию. Например, если изделие предназначено для эксплуатации в условиях повышенных температур, то полимер должен иметь высокую степень кристалличности. При этом всегда нужно помнить, что свойства полимеров зависят не только от формы и размеров кристаллических структур, но и от упаковки макромолекул (гексагональная, моноклинная и т. д.). По-разному деформируются полимеры, построенные из сферолитов кольцевого или радиального типа. Пленки, изготовленные из полимеров, имеющих структуру в форме радиальных сферолитов, обладают большей механической прочностью, чем пленки из полимеров, построенных из кольцевых сферолитов.

Таким образом, вопросы структуры полимеров весьма важны для управления технологическими процессами и наряду с реологией представляют собой основы теории переработки полимеров.

Глава 2

ОСНОВЫ РЕОЛОГИИ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ

Реология — наука, изучающая деформацию и течение, происходящие в материалах под воздействием сил. Как уже было рассмотрено в гл. 1, полимеры при нагревании выше температуры текучести или плавления переходят в вязкотекучее состояние, т. е. становятся способными к развитию больших необратимых деформаций — к течению. При приложении внешних сил (например, гидростатического давления) или при движении поверхностей, контактирующих с расплавом полимера, возникает течение, основная особенность которого заключается в том, что одновременно развиваются три вида деформации: мгновенная упругая, высоко-

эластическая (запаздывающая упругая) и пластическая (необратимая). В зависимости от условий деформирования, скорости и времени течения, а также стационарности процесса (постоянство параметров) расплавы полимеров могут проявлять свойства вязких, вязкоупругих или тиксотропных жидкостей. Кроме этого, в процессе течения расплавов полимеров возникают эффекты, не характерные для других жидкостей, — эффект Вайссенберга, эффект Барруса и эластическая турбулентность. Таким образом, расплавы полимеров являются сложными реологическими системами.

Для анализа закономерностей течения жидкостей используют феноменологический подход и метод, основанный на использовании молекулярно-кинетических представлений. При феноменологическом (формализованном) подходе используются модели, характеризующие реальные свойства, и дается их математическое описание, а во втором случае особенности течения рассматриваются с точки зрения строения полимеров на молекулярном и надмолекулярном уровнях.

Характер течения жидкостей оценивается с помощью зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига или скорости деформации. Эта зависимость может быть представлена графически или в виде аналитической функции — реологическим уравнением состояния. Применимость его для анализа реологических свойств наиболее просто проследить на примере рассмотрения вязких жидкостей.

2.1. ВЯЗКИЕ ЖИДКОСТИ

Вязкие жидкости по характеру течения, а точнее в зависимости от соотношения напряжения и скорости сдвига, подразделяются на четыре вида: ньютоновские, вязкопластичные, дилатантные и псевдопластичные.

Ньютоновские жидкости. Ньютоновские жидкости характеризуются прямопропорциональной зависимостью напряжения сдвига от скорости сдвига (рис. 2.1, а). К ньютоновским жидкостям относятся низкомолекулярные жидкости, у которых диссипация энергии вязкого течения обусловлена столкновением небольших молекул и вязкость не зависит от скорости сдвига (гра-

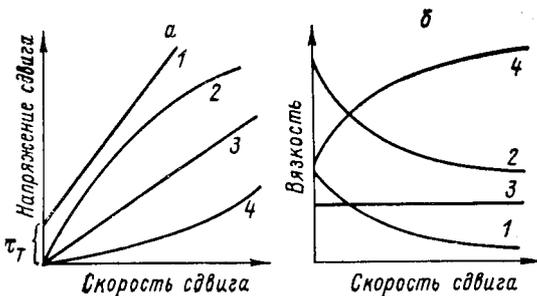


Рис. 2.1. Зависимость от скорости сдвига напряжения сдвига (кривые течения) (а) и вязкости (б) для различных жидкостей:

1 — вязкопластичная (тело Шведова — Бингама); 2 — псевдопластичная; 3 — ньютоновская; 4 — дилатантная.

диента скорости). Вязкость ньютоновских жидкостей изменяется только от температуры или строения вещества. Изменение вязкости достаточно хорошо отображается графически: чем выше вязкость, тем больше угол наклона линейной зависимости.

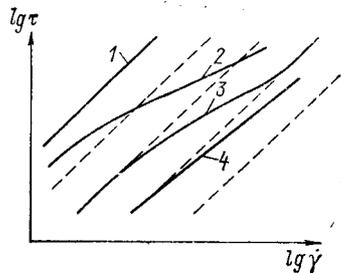
Вязкопластичные жидкости (тело Шведова—Бингама). Для вязкопластичных жидкостей характерно наличие предельного напряжения сдвига при течении. Течение таких жидкостей происходит лишь в том случае, когда напряжение сдвига при приложении силы больше предельного напряжения текучести τ_t (см. рис. 2.1, а). Такое поведение жидкостей, вероятно, объясняется тем, что они способны к образованию пространственных структур, которые препятствуют сдвигу слоев, т. е. при определенных напряжениях такие жидкости проявляют свойства упругого тела. После того как под действием внешних сил эти структуры разрушатся, появляется течение. Данные структуры являются обратимыми и после снятия деформации в статическом состоянии через некоторое время восстанавливаются.

По характеру течения к вязкопластичным жидкостям относятся буровые растворы, шламы, масляные краски. Так, при нанесении краски под действием внешних сил (движение кисти) происходит ее течение и равномерное распределение по поверхности. Если краска нанесена тонким слоем и напряжения, возникающие под действием сил гравитации, меньше, чем напряжение текучести, краска со стены не стекает. При нанесении толстого слоя соотношение напряжений изменяется и вследствие течения краски образуются подтеки. При течении вязкопластичных жидкостей по трубам в центральных слоях, там где напряжения меньше предела текучести, сдвиг слоев жидкости отсутствует. Жидкость течет как бы имея центральное ядро, с прямоугольным профилем скорости.

Дилатантные жидкости. Течение дилатантных жидкостей характеризуется увеличением вязкости с ростом скорости сдвига. Это хорошо видно по увеличению угла наклона касательной к кривой на графической зависимости (рис. 2.1, б, кривая 4). При увеличении скорости течения подобных жидкостей напряжение сдвига опережает рост скорости сдвига, т. е. отношение напряжения сдвига к скорости сдвига, численно характеризующее вязкость, непрерывно увеличивается. Такой тип течения был впервые обнаружен Рейнольдсом в суспензиях при большом содержании твердой фазы. Некоторые исследователи считают, что когда подобные материалы подвергаются сдвигу с небольшой скоростью деформации, вероятно, жидкость служит как бы смазкой, уменьшающей трение частиц, а при больших скоростях сдвига плотная упаковка частиц нарушается и материал несколько увеличивается в объеме. При новой структуре жидкости уже не достаточно для смазки трущихся друг о друга частиц, и напряжения сдвига увеличиваются значительно быстрее, чем градиент скорости, поэтому вязкость возрастает.

Рис. 2.2. Графическое изображение реологических зависимостей вязких жидкостей в логарифмических координатах:

1 — ньютоновская; 2 — псевдопластичная с одной ньютоновской областью течения; 3 — псевдопластичная с двумя ньютоновскими областями течения; 4 — псевдопластичная с малой вязкостью и постоянной степенью аномалии вязкости.



Псевдопластичные жидкости. Для псевдопластичных жидкостей характерно уменьшение вязкости с увеличением скорости сдвига (рис. 2.1, б, кривая 2).

В данном случае напряжение сдвига растет медленнее, чем скорость сдвига, и угол наклона касательной к кривой уменьшается. К псевдопластичным жидкостям относятся некоторые суспензии, содержащие асимметричные частицы. Проявление аномалии вязкости, в данном случае уменьшение ее с ростом скорости сдвига, объясняется тем, что с увеличением скорости течения асимметричные частицы постепенно ориентируются. При этом вязкость убывает до тех пор, пока сохраняется возможность дальнейшего ориентирования частиц, а затем зависимость напряжения от градиента скорости становится линейной.

Свойствами псевдопластичных жидкостей обладают также растворы и расплавы большинства полимеров. Однако для них аномалия вязкости обусловлена строением макромолекул и характером надмолекулярных образований, возникающих в расплаве. Для расплавов полимеров характерно также изменение степени аномалии вязкости в зависимости от скорости сдвига, т. е. изменение вязкости при различных скоростях сдвига неодинаково. Заметить это в обычных координатах $\tau = \varphi(\dot{\gamma})$ очень сложно, поэтому для анализа кривых течения применяют графическую зависимость в двойных логарифмических координатах. Как видно из рис. 2.2, для ньютоновской жидкости характерна линейная зависимость $\lg \tau$ от $\lg \dot{\gamma}$ с постоянным наклоном, которая при уменьшении вязкости сдвигается вправо.

Реологические кривые для псевдопластичных жидкостей располагаются под некоторым углом к линиям ньютоновских жидкостей (пунктирные линии). При этом чем большей аномалией вязкости обладает жидкость, тем сильнее это отклонение. Из сравнения кривых 2 и 4 на рис. 2.2 видно, что у первой жидкости вязкость уменьшается в зависимости от скорости сдвига значительно сильнее, чем у второй.

Степень изменения аномалии вязкости системы отражается отклонением графической зависимости от прямолинейной. Так, из рис. 2.2 видно, что такое изменение отсутствует для жидкости 4. Кривая 2 при малых скоростях сдвига идет параллельно прямой 1 для ньютоновской жидкости, а затем отклоняется. Это указывает на то, что для такой жидкости характерно наличие первой ньютоновской области, когда аномалия вязкости отсутствует, т. е. при малых градиентах вязкость постоянна и имеет максимальное значение. Такое значение называют наибольшей ньютоновской вяз-

костью и обозначают η_0 . Большинство растворов полимеров имеют две ньютоновские области (кривая 3), при этом вязкость для второй области обозначают η_∞ . Таким образом, анализ реологических зависимостей в логарифмических координатах дает достаточно подробную качественную характеристику течения и широко используется для оценки реологических свойств расплавов полимеров.

Рассмотренные зависимости можно представить в виде математической функции, т. е. описать с помощью реологического уравнения состояния, которое выражает зависимость напряжения сдвига от скорости деформации (скорости сдвига) и является математической моделью, отражающей реальные свойства среды.

Для несжимаемых вязких ньютоновских жидкостей уравнение имеет вид:

$$\tau_{ij} = \eta \Delta_{ij} \quad (2.1)$$

где τ_{ij} — компонента напряжения сдвига, Па; η — вязкость расплава, Па·с; Δ_{ij} — тензор скорости деформации, определяемый по уравнению:

$$\Delta_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (2.2)$$

В зависимости от системы координат запись имеет следующий вид:

В прямоугольных координатах:

$$\tau_{xy} = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

$$\tau_{yz} = \eta \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

$$\tau_{xz} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

В цилиндрических координатах:

$$\tau_{rz} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

$$\tau_{r\theta} = \eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] \quad (2.7)$$

$$\tau_{z\theta} = \eta \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) \quad (2.8)$$

Напряжения сдвига расположены в плоскости сдвига слоев жидкости и направлены по одной из координат, что обозначается с помощью индексов. Первый индекс у напряжения сдвига означает координату, перпендикулярную к поверхности, в которой возникает напряжение, а второй индекс — направление этого напряжения.

Приложение сдвиговых напряжений неизбежно вызывает растяжение или сжатие элементов жидкости в соответствующих направлениях, т. е. при течении появляются нормальные напряжения. Они возникают также при создании в жидкости гидро-

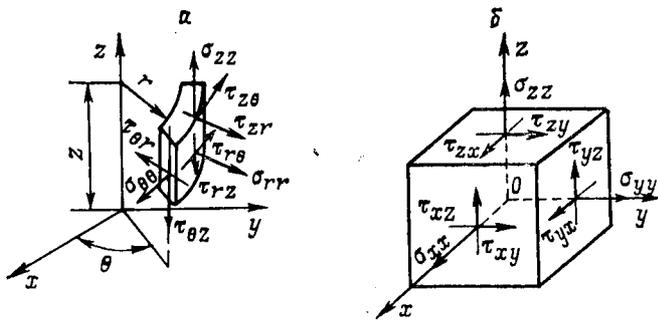


Рис. 2.3. Пространственное расположение векторов напряжений в элементе деформируемой жидкости с использованием цилиндрических (а) и прямоугольных (б) координат.

статического давления. Сжимающие или растягивающие нормальные напряжения обычно обозначают буквами с двумя одинаковыми индексами σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и т. д.

Нормальные напряжения связаны с деформацией уравнениями и для несжимаемых ньютоновских жидкостей имеют следующий вид:

В прямоугольных координатах:

$$\tau_{xx} = 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \tau_{yy} = 2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \tau_{zz} = 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (2.9)$$

В цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} \tau_{rr} &= 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r}; & \tau_{\theta\theta} &= 2\eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right); \\ \tau_{zz} &= 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Пространственное расположение векторов напряжений показано на рис. 2.3.

В соответствии с законом парности касательных напряжений имеем:

$$|\tau_{xy}| = |\tau_{yx}|; \quad |\tau_{yz}| = |\tau_{zy}|; \quad |\tau_{zx}| = |\tau_{xz}|$$

Таким образом, из девяти компонент тензора напряжений независимыми являются только шесть: три нормальных и три касательных напряжения.

Тензор скорости деформации зависит от характера действия внешних сил и вида течения вязкой среды. Так, при простом сдвиговом течении, когда имеется только одна составляющая скорости, одна из компонент скорости деформации становится равной нулю, и реологическое уравнение (2.1) принимает вид уравнения Ньютона:

$$\tau_{ij} = \eta \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.11)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, с^{-1} .

По физическому смыслу скорость сдвига — это интенсивность изменения скорости потока по координате, нормальной к плоскости сдвига. Для вязкопластичных жидкостей, имеющих предельное напряжение сдвига, реологическое уравнение состояния равно:

$$\tau_{ij} = \tau_T + \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

Для дилатантных и псевдопластичных жидкостей наблюдается зависимость вязкости от скорости сдвига. Так как на вязкость влияет режим течения, вводят понятие эффективной вязкости, т. е. вязкости, измеряемой при определенном значении скорости сдвига. Для вычисления вязкости используют уравнение:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

В более общем виде вязкость является функцией скорости деформации:

$$\eta = \varphi (J_2/2) \quad (2.13)$$

где J_2 — второй инвариант тензора скоростей деформации.

В прямоугольных координатах:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J_2 = 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \\ + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

В цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J_2 = 2 \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ + \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right]^2 + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right]^2 + \\ + \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Уравнение (2.13) принимает конкретный вид в зависимости от реальных свойств жидкости. Так, для расплавов полимеров, проявляющих постоянную степень аномалии вязкости в достаточно широком интервале скоростей сдвига и не имеющих выраженной ньютоновской области, применяется степенное уравнение Оствальда:

$$\eta = K (J_2/2)^{(n-1)/2} \quad (2.16)$$

где K — коэффициент, численно равный вязкости системы при $\dot{\gamma} = 1$; n — показатель степени, для расплавов полимеров $n < 1$.

При наличии на реологической кривой первой ньютоновской области используются уравнения Прандтля — Эйринга (2.17) или Виноградова — Малкина (2.19), а для жидкостей с первой

и второй ньютоновскими областями — уравнение Пауэлла — Эйринга (2.18):

$$\eta = \frac{\eta_0 \operatorname{arsh}(A \sqrt{J_2/2})}{A \sqrt{J_2/2}} \quad (2.17)$$

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \frac{\operatorname{arsh}(B \sqrt{J_2/2})}{B \sqrt{J_2/2}} \quad (2.18)$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + C_1 \sqrt{(J_2/2)^{0,355}} + C_2 \sqrt{(J_2/2)^{0,71}}} \quad (2.19)$$

где η_0 — наибольшая ньютоновская вязкость (при малых скоростях сдвига); η_∞ — вязкость, соответствующая второй ньютоновской области (при больших скоростях сдвига); A , B , C_1 , C_2 — постоянные.

Кроме приведенных имеется ряд уравнений других авторов. Возможность практического использования того или иного уравнения определяется точностью описания ими реальных реологических свойств и удобством решения конкретных задач технологии переработки. Примеры решения подобных задач будут рассмотрены в разделах 2.3—2.7.

2.2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СДВИГОВОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ

В данном разделе мы рассмотрим установившееся течение, когда скорость деформации не изменяется во времени или по длине канала. При таких условиях течения влиянием упругих деформаций и проявлением тиксотропии можно пренебречь. Как уже было рассмотрено ранее, большинство линейных полимеров при температурах выше температуры плавления способны сохранять упорядоченную надмолекулярную структуру в виде кристаллитов (микроблоков). В соответствии с принципами статистической термодинамики данную структуру необходимо рассматривать как набор различных подсистем, обладающих ограниченной автономностью и зависящих от фактора времени. Непосредственной структурно-кинетической характеристикой является подвижность, определяемая временем жизни образующихся структурных элементов.

В статическом состоянии, т. е. при отсутствии внешних сил, микроблоки не имеют пространственной ориентации, как схематично показано на рис. 1.19, а. При воздействии силы появляется сдвиговое течение, при этом возникающие напряжения зависят от скорости деформации системы. При низких скоростях сдвига течение расплавов таких полимеров происходит за счет смещения слоев по границам микроблоков.

Поскольку отдельные структурные элементы связаны проходными участками макромолекул или петлеобразными перехлестами, то возникающие при разрушении таких пространственных узлов напряжения велики, т. е. расплав обладает большой вязкостью.

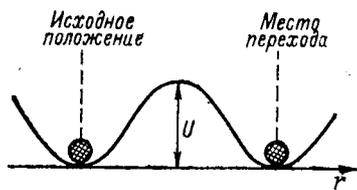


Рис. 2.4. Кривая потенциальной энергии элемента течения.

При этом разрушенные пространственные узлы под действием тепловой флуктуации возникают снова на других участках. Если скорость образования их соизмерима со скоростью разрушения, то напряжения сдвига пропорциональны градиенту скорости и расплав течет как ньютоновская жидкость, т. е. наблюдается первая ньютоновская область.

При увеличении скорости течения число пространственных узлов постепенно уменьшается, так как они разрушаются быстрее, чем образуются вновь, поэтому напряжение сдвига отстает от роста скорости сдвига и вязкость системы снижается, т. е. появляется аномалия вязкости. Начинает происходить разворот структурных элементов и их ориентация относительно направления деформации. При высоких скоростях сдвига, когда напряжения велики, частично микроблоки (структуры) разрушаются, однако они непрерывно возникают вновь за счет агрегирования доменов из ориентированных в определенной степени макромолекул (см. рис. 1.19, б). При последующем сдвиге системы, состоящей из таких ориентированных микроблоков, течение облегчается, т. е. происходит снижение вязкости. Кроме того, при последовательном разрушении пространственных узлов основная цепь макромолекулы располагается в узком слое, что облегчает деформирование системы и приводит к уменьшению вязкости.

Процесс течения, т. е. развитие необратимой деформации, происходит в результате последовательного перемещения сегментов макромолекул. При этом передача внешнего импульса по цепи макромолекулы аналогична волновому движению. Потенциальная энергия элемента течения относительно исходного положения и места перехода имеет два минимума, разделенных потенциальным барьером с высотой U (рис. 2.4). Согласно теории Френкеля и Эйринга, элементарный акт течения осуществляется путем перехода через энергетический барьер молекулярно-кинетической единицы под воздействием внешней энергии, создаваемой при сдвиге слоев жидкости.

Таким образом, существование флуктуационных упорядоченных структур в расплавах полимеров объясняет их неньютоновское поведение и высокую вязкость. Снижение вязкости линейных полимеров на несколько порядков при увеличении скорости сдвига можно объяснить обратимым разрушением упорядоченных структур, связанных свободными проходными участками макромолекул в единую пространственную сетку. При этом разрушение происходит посредством индивидуального отрыва (передвижения) сегментов как отдельных кинетических единиц.

При воздействии напряжения сдвига наблюдается также ориентация проходных участков макромолекул, что приводит к раз-

витию упругой запаздывающей (высокоэластической) деформации. Одновременно изменяются также валентные углы основной цепи и увеличиваются расстояния между складками в доменах, вследствие чего накапливается мгновенная упругая деформация, значение которой определяется напряжением сдвига и гибкостью макромолекул, и появляются нормальные напряжения при течи.

У полимеров, не способных к образованию флуктуационных упорядоченных структур в расплаве, аномалии вязкости при течении расплавов не наблюдается или она проявляется незначительно. Течение расплавов таких полимеров также осуществляется за счет последовательного перемещения отдельных сегментов, но без разрушения пространственных узлов, поэтому вязкость зависит лишь от межмолекулярного взаимодействия и молекулярной массы полимера. При этом зависимость вязкости от молекулярной массы у таких полимеров должна быть линейной. Слабо выраженная аномалия вязкости при течении таких полимеров может быть обусловлена разворотом макромолекул и частичной их ориентацией в направлении течения. При этом осуществляется переход макромолекул в узкие монослои, по которым происходит сдвиг расплава при последующем течении, и вязкость понижается. Если же в расплавах могут образовываться упорядоченные структуры, то при достижении определенной молекулярной массы M_c , зависимость эта становится нелинейной. Это объясняется тем, что при $M > M_c$ возникает сетка флуктуационных межмолекулярных зацеплений, и на разрушение узлов этой сетки при течении требуется больше энергии, чем на перемещение сегмента. При течении с малыми скоростями сдвига, когда эти узлы успевают восстанавливаться, возникают большие напряжения сдвига. С увеличением молекулярной массы число узлов сетки растет значительно быстрее, поэтому зависимость вязкости отклоняется от линейной (рис. 2.5).

При течении с большими скоростями сдвига в результате перемещения и ориентации проходных и петлеобразных участков макромолекул, а также вследствие уменьшения числа узлов пространственной сетки, вязкость становится пропорциональной молекулярной массе, так как в этом случае она обусловлена только межмолекулярным взаимодействием.

Зависимость вязкости расплава полимера от молекулярной массы можно описать уравнением:

$$\eta = CM^\alpha \quad (2.20)$$

где C — постоянная, зависящая от вида мономера; $1 \leq \alpha \leq 3,5$, при малых скоростях сдвига $\alpha \approx 3,5$, а при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$, $\alpha \approx 1$.

На реологические свойства расплавов полимеров значительное влияние

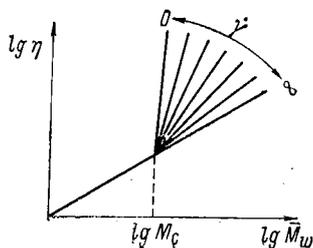


Рис. 2.5. Логарифмическая зависимость вязкости расплава полимера от его молекулярной массы при различных скоростях сдвига.

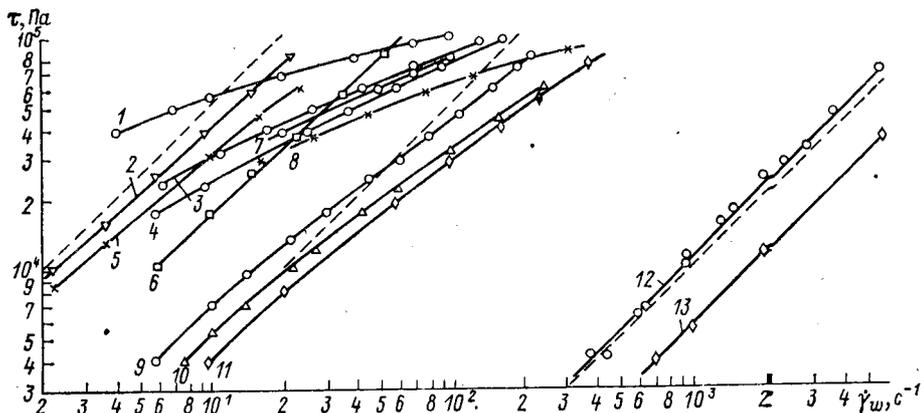


Рис. 2.6. Кривые течения расплавов полимеров:

1 — поливинилхлорид кабельный, 185 °С; 2 — дифлон, 260 °С; 3 — полиформальдегид, 210 °С; 4 — полиэтилен низкой плотности, 190 °С; 5 — макролон, 260 °С; 6 — дифлон, 270 °С; 7 — полиэтилен высокой плотности; 8 — полистирол ударопрочный, 200 °С; 9 — полиамид П-68н, 240 °С; 10 — полиамид П-68, 250 °С; 11 — полиамид П-6810т, 250 °С; 12 — лавсан, 270 °С; 13 — лавсан, 280 °С.

оказывает молекулярно-массовое распределение (ММР): чем оно больше, тем сильнее проявляется аномалия вязкости. Объясняется это тем, что у полимеров с широким ММР образуются полидисперсные флуктуационные структуры, вследствие чего в расплаве возрастает число узлов пространственной сетки. Сдвиговое течение, сопровождаемое разрушением этих узлов, обуславливает более сильное уменьшение вязкости у расплавов полимеров с широким ММР.

Экспериментально установлено, что при течении полимеров с широким ММР, низкомолекулярные фракции преимущественно располагаются около неподвижных поверхностей, а высокомолекулярные за счет большей длины цепи перемещаются в область течения с большими скоростями. Таким образом, увеличение содержания низкомолекулярных фракций в слоях, подвергающихся наиболее интенсивному сдвигу, облегчает течение расплава, при этом фактически уменьшается вязкость не всей системы, а только этих слоев, т. е. происходит кажущееся снижение вязкости расплава.

О различии реологических свойств расплавов полимеров можно судить по рис. 2.6. Если проанализировать кривые течения (зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига), то можно заметить, что расплавы таких полимеров, как поликарбонат, полиамид, полиэтилентерефталат (лавсан), почти не проявляют аномалии вязкости и по характеру течения приближаются к ньютоновским жидкостям (для сравнения на рис. 2.6 пунктирными линиями нанесены зависимости для ньютоновских жидкостей). Слабое проявление аномалии вязкости у перечисленных полимеров указывает на то, что при их течении почти не происходит разрушения узлов пространственной структурной сетки или они отсут-

ствуют в расплавах данных полимеров. Наибольшей вязкостью из рассматриваемых полимеров обладает поликарбонат, что обусловлено сильным межмолекулярным взаимодействием за счет карбонатных групп, входящих в полимерную цепь. Вязкость расплава полиэтилентерефталата, наоборот, на три порядка ниже, чем расплава поликарбоната. Наиболее сильно аномалия вязкости проявляется при течении расплавов пластифицированного поливинилхлорида, полиэтилена, полистирола, полиформальдегида, полипропилена и некоторых других полимеров. При малых скоростях сдвига вязкость таких полимеров равна или даже выше, чем у поликарбоната, а при больших скоростях сдвига становится почти равной вязкости полиэтилентерефталата, т. е. изменяется в очень широких пределах.

Такое сравнение реологических характеристик различных полимеров позволяет проследить закономерности изменения их в зависимости от строения и конформации макромолекул. Получаемые реологические данные могут быть использованы для оценки перерабатываемости полимеров и расчетов технологических параметров.

Как уже отмечалось ранее, для описания реологических зависимостей применяются различные уравнения состояния. Наиболее часто в инженерных расчетах используется степенное уравнение, которое для сдвигового одномерного течения имеет вид:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n = K \dot{\gamma}^n \quad (2.21)$$

Преимущество степенного уравнения заключается в том, что оно содержит два коэффициента, которые легко определяются графически или аналитически по данным реологических исследований. Представим уравнение (2.21) в логарифмическом виде:

$$\lg \tau = \lg K + n \lg \dot{\gamma} \quad (2.22)$$

Тогда $K = \tau$ при $\dot{\gamma} = 1$, а $n = \lg \tau / \lg \dot{\gamma}$ или для удобства использования табличных данных:

$$n = \frac{\lg (\tau_2/\tau_1)}{\lg (\dot{\gamma}_2/\dot{\gamma}_1)} \quad (2.23)$$

где τ_2 и τ_1 — напряжения сдвига, а $\dot{\gamma}_2$ и $\dot{\gamma}_1$ — скорости сдвига, соответствующие двум точкам реологических измерений.

В тех случаях, когда зависимость $\tau = \varphi(\dot{\gamma})$ в логарифмических координатах не является линейной, для нахождения коэффициентов K и n спрямляют участок кривой, который представляет практический интерес для расчетов, а линейная зависимость интерполируется на ось ординат.

Для более точных расчетов с использованием ЭВМ применяют реологическое уравнение:

$$\lg \tau = a_0 + a_1 \lg \dot{\gamma} + a_1 (\lg \dot{\gamma})^2 + a_2 T + a_{22} T^2 + a_{12} T \lg \dot{\gamma} \quad (2.24)$$

где a_i — постоянные; T — температура полимера.

Если сопоставить уравнения (2.24) и (2.22), имеем:

$$\lg K = a_0 + a_2 T + a_{22} T^2 \quad (2.25a)$$

$$n = a_1 + a_{11} \lg \dot{\gamma} + a_{12} T \quad (2.25b)$$

Таким образом, используя приведенные равенства, можно при расчетах применять степенное уравнение в достаточно широком интервале скоростей сдвига, так как оно охватывает нелинейную область кривой течения.

Зависимость вязкости расплавов полимеров от температуры также имеет нелинейный характер, и влияние температуры при различных скоростях сдвига неоднозначно. Если сравнить изменение вязкости с повышением температуры при малых скоростях сдвига, то оно значительно больше, чем при больших. Это объясняется тем, что течение при низких скоростях не вызывает значительного разрушения микроблоков и узлов пространственной сетки, поэтому при высоких температурах происходит их разрушение под действием тепловой флуктуации и вязкость с ростом температуры сильно уменьшается.

При тении с большими скоростями, когда структуры практически уже разрушены, повышение температуры изменяет вязкость незначительно. В данном случае влияние температуры сводится к изменению межмолекулярного взаимодействия и подвижности макромолекул. Влияние температуры на эффективную вязкость можно проследить на рис. 2.7. При высоких температурах у расплавов полимеров аномалия вязкости уменьшается, это можно установить по углу наклона линий, так как показатель степени n становится больше, чем при низких температурах.

Чтобы получить зависимость вязкости от температуры, находят ее значения при постоянной скорости сдвига, для чего проводят ряд сечений на рис. 2.7 при $\dot{\gamma} = \text{const}$, а затем строят график в координатах $\lg \eta - T$ или $\lg \eta - 1/T$. При изменении температуры в небольшом интервале наблюдается линейная зависимость между $\lg \eta$ и температурой. Однако эта зависимость

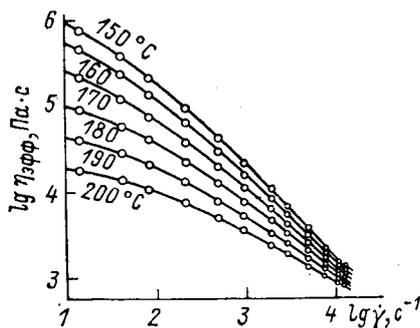


Рис. 2.7. Логарифмическая зависимость вязкости расплава поливинилхлорида от скорости сдвига при различных температурах.

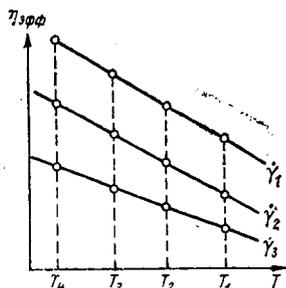
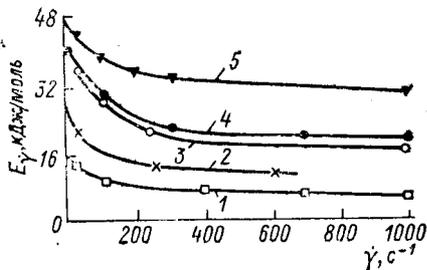


Рис. 2.8. Зависимость эффективной вязкости от температуры расплава полимера при различных скоростях сдвига ($\dot{\gamma}_3 > \dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$).

Рис. 2.9. Зависимость энергии активации от скорости сдвига для расплавов полимеров:

1 — полиэтилен высокой плотности; 2 — полиэтилен низкой плотности; 3 — поливинилхлорид пластифицированный; 4 — полипропилен; 5 — блочный полистирол.



изменяется с изменением скорости сдвига. При больших скоростях сдвига угол наклона данной зависимости уменьшается (рис. 2.8). Это указывает на то, что энергия активации вязкого течения зависит от скорости сдвига.

Зависимость вязкости от температуры описывается уравнением (2.24) или следующими экспоненциальными уравнениями:

$$\eta = Ae^{E/RT} \quad (2.26)$$

$$\eta = K_0 e^{-b(T-T_0)} \quad (2.27)$$

где A — постоянная; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; K_0 — коэффициент реологического уравнения (2.21) при T_0 ; E и b — коэффициенты, характеризующие степень влияния температуры на вязкость, иногда E называют энергией активации вязкого течения.

Чем больше E (энергия активации), тем сильнее влияние температуры на вязкость. Для вычисления E запишем уравнение (2.26) в логарифмическом виде для двух значений температуры T_1 и T_2 ; вязкость расплава при данных температурах равна η_1 и η_2 при постоянной скорости сдвига ($\dot{\gamma} = \text{const}$):

$$\ln \eta_1 = \ln A + E\dot{\gamma}/RT_1; \quad \ln \eta_2 = \ln A + E\dot{\gamma}/RT_2$$

Решая совместно эти уравнения, находим:

$$E_{\dot{\gamma}} = \frac{RT_1 T_2 \ln(\eta_1/\eta_2)}{T_2 - T_1} \quad (2.28)$$

Индекс при $E_{\dot{\gamma}}$ означает, что значения вязкостей η_1 и η_2 были найдены при постоянной скорости сдвига. Если они определяются при $\tau = \text{const}$, то энергия активации обозначается E_{τ} .

Отношение рассмотренных значений энергии активации $E_{\tau}/E_{\dot{\gamma}}$ зависит от степени аномалии вязкости и равно:

$$E_{\tau}/E_{\dot{\gamma}} = 1/n \quad (2.29)$$

Таким же методом можно составить уравнения для расчета постоянной b в уравнении (2.27). Найденные значения энергии активации широко используются при расчете температуры переработки полимеров, при этом учитывается, что $E_{\dot{\gamma}}$ и b являются функциями скорости сдвига (рис. 2.9). Зная выбранное для расчета значение скорости сдвига, можно определить $E_{\dot{\gamma}}$ и b , а затем рассчитать температуру.

Вязкость расплавов существенно зависит от давления. Как уже было показано ранее (см. рис. 1.21), при увеличении давления возрастает плотность расплава полимера, макромолекулы сближаются и межмолекулярное взаимодействие растет. Рассматриваемая зависимость качественно не меняется до достижения не-

которого критического давления, выше которого в расплаве полимера могут протекать процессы, аналогичные кристаллизации, и вязкость резко возрастает. Значение критического давления зависит от температуры расплава. Так, для расплава полиэтилена при 150 °С критическое давление равно 60 МПа, а при 165 °С — около 120 МПа.

При переработке полимеров расплавы, как правило, подвергаются сдвиговому течению и сжатию одновременно, поэтому критические давления «кристаллизации» могут уменьшаться вследствие ориентации макромолекул под действием напряжения сдвига. Подобные явления могут происходить, в частности, при литье под давлением. В области давлений ниже критических для расчета вязкости η_p с учетом сжатия расплава под действием давления можно использовать уравнение:

$$\eta_p = \eta_0 e^{\beta p} \quad (2.30)$$

где η_0 — вязкость при нулевом давлении; p — давление, Па; β — постоянная, для полиэтилена $\beta = 1,2 \cdot 10^{-8} + 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$, для полистирола $\beta = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$.

Постоянная β носит несколько условный характер, так как зависит от температуры и скорости сдвига. Влияние давления на вязкость для различных полимеров неодинаково. Особенно сильно изменяется вязкость у разветвленных полимеров или у полимеров, имеющих громоздкие боковые группы типа бензольного кольца, как у полистирола. Например, при изменении давления от 35 до 175 МПа вязкость полистирола при 196 °С увеличивается в 135 раз, а у полиэтилена при 150 °С — в 4—6 раз. Естественно такое сильное изменение необходимо учитывать при течении расплавов полимеров в процессе их переработки.

В целом рассмотренные зависимости широко применяются для расчетов технологических параметров. Так, зная скорость сдвига при течении в соответствующих узлах агрегатов, по реологическому уравнению состояния можно рассчитать напряжение сдвига, а затем определить перепад давления. По значению энергии активации можно определить температуру или разность температур при переходе от одной вязкости расплава к другой. Эти же зависимости используются для расчета колебаний температуры при ее регулировании, исходя из заданного предела изменения вязкости системы.

2.3. ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ТЕЧЕНИЕ АНОМАЛЬНО ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

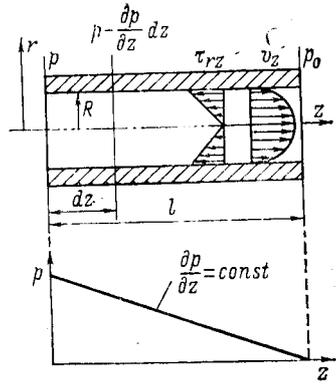
При переработке полимеров возникает необходимость расчета напряжения и скорости сдвига по значению перепада давления и расхода. Для приобретения навыков и освоения методики — в данном разделе для примера приведен наиболее распространенный вывод основных уравнений течения расплавов полимеров.

Рассмотрим течение расплава полимера под действием перепада давления вдоль оси канала с радиусом R и сравнительно

Рис. 2.10. Схема течения расплава в цилиндрическом канале.

большой длиной l . Давление на входе в канал равно p , а на выходе p_0 . Так как течение установившееся, то принимаем, что $\partial p / \partial z = \text{const}$ (рис. 2. 10), т. е. начальный входной участок канала не рассматривается. Перепады давлений по другим координатам равны нулю:

$$\frac{\partial p}{\partial \Theta} = \frac{\partial p}{\partial r} = 0$$



Соответственно скорости и напряжения сдвига также равны нулю:

$$v_r = v_\Theta = 0; \tau_{r\Theta} = 0; \tau_{\Theta z} = 0$$

Поскольку течение установившееся, то скорость вдоль оси z и во времени не изменяется, т. е.:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \frac{\partial v_z}{\partial t} = 0$$

Для решения принимаем следующие допущения: 1) вязкость расплава не изменяется во времени; 2) скольжение на стенках канала отсутствует, т. е. при $r = R$ $v_z = 0$; 3) нормальные напряжения при течиении остаются постоянными, т. е.

$$\frac{\partial (r\sigma_{rr})}{\partial r} = 0; \frac{\partial \sigma_{\Theta\Theta}}{\partial \Theta} = 0; \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0$$

4) гравитационные силы не учитываем, так как они намного меньше сил, обусловленных напряжением сдвига, поэтому:

$$\rho g_r = \rho g_\Theta = \rho g_z = 0$$

5) инерционные силы равны нулю:

$$\rho \frac{dv}{dr} = \rho \frac{dv}{d\Theta} = \rho \frac{dv}{dz} = 0$$

Рассмотрим произвольный элемент жидкости, расположенный внутри цилиндрической поверхности, и запишем для него уравнение движения.

Проекция на направление r :

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\Theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \Theta} - \frac{v_\Theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \\ & = - \frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\sigma_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\Theta}}{\partial \Theta} - \frac{\sigma_{\Theta\Theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r \quad (2.31) \end{aligned}$$

Проекция на направление Θ :

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_{\Theta}}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_{\Theta}}{\partial r} + \frac{v_{\Theta}}{r} \frac{\partial v_{\Theta}}{\partial \Theta} + \frac{v_r v_{\Theta}}{r} + v_z \frac{\partial v_{\Theta}}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \Theta} + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \tau_{r\Theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\Theta\Theta}}{\partial \Theta} + \frac{\partial \tau_{\Theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_{\Theta} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Проекция на направление z :

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_{\Theta}}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \Theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\Theta z}}{\partial \Theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (2.33)$$

Если проанализировать уравнения (2.31) и (2.32) с учетом принятых условий и допущений, то видно, что все члены этих уравнений равны нулю, а из уравнения (2.33) можем записать

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial z}$$

Поскольку $\partial p / \partial z = \text{const}$, то последнее уравнение можно преобразовать в обычное дифференциальное уравнение:

$$d(r \tau_{rz}) = \frac{dp}{dz} r dr$$

Интегрируя последнее выражение, находим:

$$\tau_{rz} = \frac{dp}{dz} \frac{r}{2} + \frac{C_1}{r} \quad (2.34)$$

На стенках канала скорость равна нулю, а в центре при $r = 0$ она максимальна. Следовательно, вследствие симметрии потока на равных расстояниях от оси скорости также будут равны, поэтому в центре канала отсутствует скорость сдвига $\frac{dv_z}{dr} = 0$ и $\tau_{rz} = 0$. Подставив в уравнение (2.34) $r = 0$ и $\tau_{rz} = 0$, находим $C_1 = 0$, тогда:

$$\tau_{rz} = \frac{dp}{dz} \frac{r}{2} \quad (2.35)$$

Эпюра распределения напряжений показана на рис. 2.10. Максимальное значение напряжения будет на стенке канала при $r = R$.

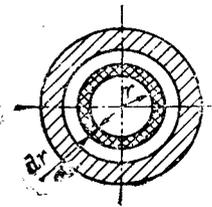
Для установившегося потока, когда

$$\frac{dp}{dz} = \frac{p_0 - p}{l} = \frac{-\Delta p}{l}$$

напряжение сдвига на стенке канала равно:

$$\tau_w = -\Delta p R / 2l \quad (2.36)$$

Рис. 2.11. Сечение цилиндрического канала с выделенным элементарным кольцом толщиной dr .



Знак минус указывает на то, что напряжения сдвига направлены в сторону, противоположную направлению оси z .

Для нахождения скорости потока воспользуемся реологическим уравнением (2.6), в которое вместо вязкости подставим степенное уравнение (2.16). С учетом принятых условий и допущений все члены уравнения (2.15), кроме $\partial v_z / \partial r$, равны нулю. Поэтому в окончательном виде после подстановки уравнений (2.15) и (2.16) в уравнение (2.6) имеем:

$$\tau_{rz} = K \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^n$$

Подставив это значение τ_{rz} в уравнение (2.35), из нового равенства находим:

$$dv_z = \left(\frac{1}{2K} \frac{dp}{dz} \right)^{1/n} r^{1/n} dr$$

Интегрируя это уравнение по r , получаем:

$$v_z = \left(\frac{1}{2K} \frac{dp}{dz} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} r^{(1+n)/n} + C_2$$

Из условия прилипания расплава к стенкам канала следует, что $r = R$, $v_z = 0$, тогда:

$$C_2 = - \left(\frac{1}{2K} \frac{dp}{dz} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} R^{(1+n)/n}$$

Подставив вместо C_2 его значение, получаем:

$$v_z = v_0 \left[1 - (r/R)^{(1+n)/n} \right] \quad (2.37)$$

Здесь

$$v_0 = - \left(\frac{R}{2K} \frac{dp}{dz} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} R \quad (2.38)$$

Уравнение (2.37) при $r = 0$ приводится к выражению (2.38), т. е. $v_z = v_0$ или v_z равна максимальной скорости потока.

Для вывода уравнения объемного расхода расплава воспользуемся рис. 2.11. Взяв в сечении канала элементарное кольцо с радиусом r и толщиной dr , находим его площадь:

$$S = 2\pi r dr$$

Обычно расход расплава V равен произведению площади сечения канала S на скорость потока v_z . Для полного сечения канала имеем:

$$V = 2\pi \int_0^R v_z r dr$$

Подставив вместо v_z его значение из (2.37), получаем:

$$V = 2\pi v_0 \int_0^R r dr - 2\pi v_0 \frac{1}{R^{(1+n)/n}} \int_0^R r^{(1+2n)/n} dr$$

После интегрирования и преобразований получаем уравнение расхода расплава:

$$V = \frac{1+n}{1+3n} \pi v_0 R^2 \quad (2.39)$$

Для нахождения скорости сдвига продифференцируем уравнение (2.37):

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = \pm \frac{v_0}{R^{(1+n)/n}} \frac{1+n}{n} r^{1/n}$$

Заменив в этом выражении v_0 значением, найденным из уравнения (2.39) $v_0 = (1+3n) V / (1+n) \pi R^2$, получаем:

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = \pm \frac{1+3n}{n} \frac{V}{\pi R^{(1+3n)/n}} r^{1/n} \quad (2.40)$$

Скорость сдвига на стенке канала при $r = R$ равна:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{1+3n}{n} \frac{V}{\pi R^3} \quad (2.41)$$

Полученные уравнения для напряжения и скорости сдвига потока широко применяются при расчете экструзионных головок, литниковых каналов пресс-форм и в капиллярной вискозиметрии.

Если в уравнение (2.41) подставить $n = 1$, то получаем скорость сдвига для потока ньютоновской жидкости:

$$\dot{\gamma}_H = 4V / \pi R^3 \quad (2.42)$$

2.4. ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ТЕЧЕНИЕ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЦИЛИНДРАМИ

Рассмотрим движение расплава, вызванное вращением внутреннего цилиндра вокруг своей оси с угловой скоростью ω , когда перепад давления по оси z отсутствует. Для вывода уравнений течения принимаем те же допущения, что были приняты при решении задачи для течения в цилиндрическом канале.

Схема течения показана на рис. 2.12. Канал образуется внутренним цилиндром с радиусом R_1 и внешним цилиндром с радиусом R_2 .

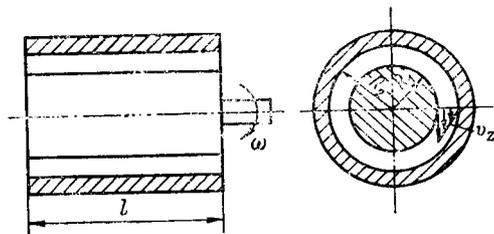
Из анализа уравнений движения (2.31), (2.32), (2.33) видно, что, поскольку осевое течение отсутствует, члены уравнений, содержащие τ_{rz} , будут равны нулю, а действующим будет напряжение $\tau_{r\theta}$, возникающее на концентрических поверхностях, перпендикулярных к радиусу r . Соответственно:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{\partial p}{\partial r} = 0$$

Рис. 2.12. Схема течения расплава между вращающимися цилиндрами.

Проанализировав уравнения движения, как было сделано в разделе 2.3, получаем:

$$\frac{d(r^2\tau_{r\theta})}{dr} = 0$$



После интегрирования этого выражения имеем:

$$\tau_{r\theta} = C_1/r^2 \quad (2.43)$$

Реологическое уравнение для данного случая течения с учетом уравнений (2.7), (2.15) и (2.16) имеет вид

$$\tau_{r\theta} = K \left[r \frac{d(v_\theta/r)}{dr} \right]^n$$

Подставив это выражение $\tau_{r\theta}$ в уравнение (2.43) имеем:

$$r \frac{d(v_\theta/r)}{dr} = \left(\frac{C_1}{K} \right)^{1/n} \frac{1}{r^{2/n}} \quad (2.44)$$

Разделив оба члена на r и проинтегрировав, получаем:

$$v_\theta = - \left(\frac{C_1}{K} \right)^{1/n} \frac{n}{2} r^{(n-2)/n} + C_3 r \quad (2.45)$$

Заменив выражение новой постоянной

$$- (C_1/K)^{1/n} n/2 = C_2 \quad (2.46)$$

имеем:

$$v_\theta = C_2 r^{(n-2)/n} + C_3 r \quad (2.47)$$

Постоянные интегрирования находим из условий:

$$r = R_1, \quad v_\theta = \omega R_1; \quad r = R_2, \quad v_\theta = 0$$

Подставив эти значения в уравнение (2.47), имеем:

$$\omega R_1 = C_2 R_1^{(n-2)/n} + C_3 R_1 \quad 0 = C_2 R_2^{(n-2)/n} + C_3 R_2$$

Решив совместно систему уравнений, находим:

$$C_2 = \omega R_1^{2/n} R_2^{2/n} / (R_2^{2/n} - R_1^{2/n}); \quad C_3 = - \omega R_1^{2/n} / (R_2^{2/n} - R_1^{2/n}) \quad (2.48)$$

Подставив вместо C_2 и C_3 их значения в уравнение (2.47), получаем уравнение для профиля скоростей:

$$v_\theta = \frac{\omega R_1^{2/n} R_2^{2/n}}{R_2^{2/n} - R_1^{2/n}} \left(r^{(n-2)/n} - \frac{r}{R_2^{2/n}} \right) \quad (2.49)$$

Для определения скорости сдвига потока воспользуемся уравнением (2.44) и равенством $\dot{\gamma} = r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_\theta}{r} \right)$. Тогда:

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{C_1}{K} \right)^{1/n} \frac{1}{r^{2/n}}$$

Подставив в это выражение значение $(C_1/K)^{1/n}$ из уравнения (2.46) и C_2 из (2.48), имеем:

$$\dot{\gamma} = - \frac{2\omega R_1^{2/n} R_2^{2/n}}{n (R_2^{2/n} - R_1^{2/n})} \frac{1}{r^{2/n}} \quad (2.50)$$

Скорость сдвига на поверхности внутреннего цилиндра определяем из уравнения (2.50) при $r = R_1$

$$\dot{\gamma}_{R_1} = -2\omega R_2^{2/n} / n (R_2^{2/n} - R_1^{2/n}) \quad (2.51)$$

а на поверхности внешнего цилиндра при $r = R_2$:

$$\dot{\gamma}_{R_2} = -2\omega R_1^{2/n} / n (R_2^{2/n} - R_1^{2/n}) \quad (2.52)$$

Подобные решения можно получить также для других случаев течения, принимая соответствующие граничные условия.

Напряжение сдвига на поверхности цилиндра можно определить, используя равенства:

$$\tau_{R_1} = \frac{M_{кр}}{2\pi R_1^2 l} = \frac{K R_2^2 (\gamma\omega)^n}{[n (R_2^{2/n} - R_1^{2/n})]^n} \quad (2.53)$$

$$\tau_{R_2} = \frac{M_{кр}}{2\pi R_2^2 l} = \frac{K R_1^2 (\gamma\omega)^n}{[n (R_2^{2/n} - R_1^{2/n})]^n} \quad (2.54)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент, возникающий при вращении цилиндра; l — длина цилиндра.

Полученные уравнения используются для обработки данных ротационной вискозиметрии, а также при расчете формующих головок экструдеров.

2.5. ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ТЕЧЕНИЕ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ

Рассмотрим движение в щелевом канале, образованном двумя пластинами шириной B и длиной l , расстояние между которыми H (рис. 2.13). Течение осуществляется вдоль оси z под действием перепада давления, при этом $\partial p / \partial z = \text{const}$.

Так как градиенты давлений равны нулю, скорости, а соответственно и напряжения сдвига равны нулю: $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$; $v_x = v_y = 0$; $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$.

Для решения принимаем допущения, приведенные в разделе 2.3. Уравнения движения в прямоугольных координатах имеют следующий вид.

Проекция на ось x :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \\ = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.55)$$

Проекция на ось y :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \\ = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y \end{aligned} \quad (2.56)$$

Проекция на ось z :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \\ = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (2.57)$$

Проанализировав уравнения движения с учетом принятых условий и допущений, получаем исходное выражение:

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z}$$

Так как $\partial p / \partial z = \text{const}$, после интегрирования имеем:

$$\tau_{yz} = \frac{dp}{dz} y + C_1$$

Используя граничные условия $y = 0$, $\frac{dv_z}{dy} = 0$ (градиент скорости в центре канала равен нулю), имеем $\tau_{yz} = 0$; тогда $C_1 = 0$. С учетом полученных значений имеем:

$$\tau_{yz} = \frac{dp}{dz} y \quad (2.58)$$

Напряжение сдвига на стенке при $y = H/2$ и перепаде давления в канале $\Delta p = p_0 - p$ равно:

$$\tau_w = - \frac{\Delta p H}{2l} \quad (2.59)$$

Реологическое степенное уравнение для движения между пластинами с учетом (2.4), (2.14) и (2.16) имеет вид:

$$\tau_{yz} = K \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^n$$

Подставив вместо τ_{yz} его значение из (2.58), находим:

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} = \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{K} \right)^{1/n} y^{1/n}$$

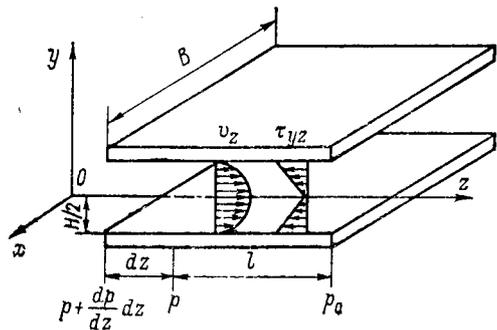


Рис. 2.13. Схема течения расплава между двумя неподвижными пластинами.

Проинтегрировав это выражение, получаем

$$v_z = \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{K} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} y^{(1+n)/n} + C_2$$

Постоянная интегрирования находится при $y = H/2$, $v_z = 0$; тогда:

$$C_2 = - \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{K} \right)^{1/n} \frac{n}{1+n} \left(\frac{H}{2} \right)^{(1+n)/n}$$

Подставив вместо C_2 его значение, находим:

$$v_z = v_0 \left[1 - \left(\frac{2y}{H} \right)^{(1+n)/n} \right] \quad (2.60)$$

где $v_0 = - \frac{n}{1+n} \frac{H}{2} \left(\frac{H}{2K} \frac{dp}{dz} \right)^{1/n}$.

Для вывода уравнения расхода расплава выделим в сечении элемент толщиной dy и шириной B .

Проинтегрировав произведение скорости v_z на площадь сечения Bdy в пределах от 0 до $H/2$, находим объемный расход расплава:

$$V = \frac{n+1}{2n+1} BHv_0 \quad (2.61)$$

Уравнение скорости сдвига получаем, продифференцировав (2.60) и используя (2.61):

$$\frac{dv_z}{dy} = \pm \frac{2n+1}{n} \frac{V}{BH} \left(\frac{2}{H} \right)^{(1+n)/n} y^{1/n} \quad (2.62)$$

Скорость сдвига на поверхности пластины при $y = H/2$ равна:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2V(1+2n)}{nBH^2} \quad (2.63)$$

Полученные уравнения используются при расчете экструзионных щелевых головок. В несколько видоизмененном виде их можно применить для расчета кольцевых формирующих головок (трубных и пленочных), когда течение осуществляется в канале между двумя цилиндрами с отношением радиусов $R_1/R_2 \geq 0,9$. Для этого кольцевой канал мысленно разрезаем и развертываем в плоскую щель, тогда глубина канала $H = R_2 - R_1$, а ширина $B = 2\pi R_{cp} = \pi(R_1 + R_2)$.

Используя уравнение (2.59) и (2.63), находим:

$$\tau_w = \frac{\Delta p (R_2 - R_1)}{2l} \quad (2.64)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2n+1}{n} \frac{2V}{\pi(R_2 - R_1)^2 (R_1 + R_2)} \quad (2.65)$$

Следует заметить, что при решении более сложных задач кроме рассмотренных уравнений используется также уравнение неразрывности, вытекающее из закона сохранения материи и

выражающее постоянство массы в замкнутой системе. При записи в прямоугольных координатах уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0$$

При наличии перепада температуры по длине канала или по его сечению задача решается с применением уравнения энергии. Подобные задачи ввиду сложности их решения не включены в настоящее учебное пособие.

2.6. ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В КАНАЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВХОДОВЫХ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрим движение расплава в цилиндрическом канале сравнительно небольшой длины с радиусом R . Расплав постукает из канала большого сечения и течет под действием перепада давления, создаваемого по длине канала (рис. 2.14).

При переходе расплава из большого резервуара в канал происходит сравнительно быстрое изменение скорости, которая стабилизируется на некотором удалении от входа. Отдельные авторы считают, что вначале профиль скорости имеет почти прямоугольную форму, однако эксперименты, выполненные на прозрачных каналах при течении с контрастным наполнителем, этого не подтверждают. Формование профиля начинается перед входом за счет образования конического гидродинамического конфузора, как показано на рис. 2.14. Центральная струя имеет наибольшую скорость, которая уменьшается по мере удаления от оси канала и, если канал имеет прямоугольный вход, то в углах могут образоваться циркуляционные потоки (вихревые зоны).

Как уже было рассмотрено ранее, под действием напряжений сдвига в расплавах полимеров может происходить разрушение структуры и изменение конформации макромолекул, т. е. течение сопровождается развитием упругой деформации. Поскольку на входе скорость изменяется по длине, т. е. имеется градиент скорости ($dv_z/dz \neq 0$), то упругая деформация постоянно возрастает. При увеличении скорости расплава полимера повышается степень разрушения структуры и уменьшается число пространственных узлов. Поскольку все эти процессы протекают не мгновенно, то завершаются они с некоторым отставанием от темпа развития скорости. Следовательно, по мере течения расплава по длине канала изменяется напряжение сдвига и меняется доля энергии, затрачиваемой на развитие упругой дефор-

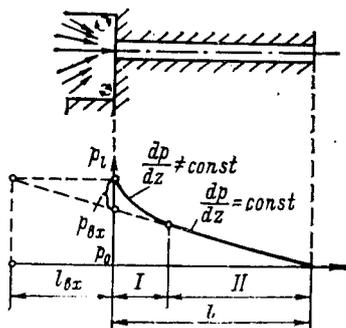


Рис. 2.14. Изменение давления по длине канала при неустановившемся течении расплава.

I — неустановившееся течение; II — установившееся течение.

мации и разрушение структурных элементов системы. На входе затрата энергии максимальна, а затем она постепенно уменьшается и при переходе к установившемуся режиму энергия расходуется лишь на развитие вязкого течения. Часть затраченной на входе энергии переходит в теплоту, а другая часть в виде потенциальной энергии (накопленная упругая деформация) сохраняется в расплаве и реализуется на выходе из канала. Такое неравномерное потребление энергии вызывает непропорциональные потери давления по длине канала.

Таким образом, в зависимости от режима течения канал можно разбить на два участка. Первый — участок входа, когда $(dp/dz) \neq \text{const}$, на котором потери давления зависят от трех составляющих: 1) неустановившееся течение в сходящемся потоке на входе в канал, 2) вязкие потери при перестройке профиля и изменении скорости потока, 3) развитие упругих деформаций. Второй — участок с установившимся течением при $(dp/dz) = \text{const}$, где перепад давления обусловлен преимущественно вязкими потерями в расплаве. Если решение для неустановившегося течения выполняется с учетом входных потерь и проявления упругих деформаций, то в реологическое уравнение необходимо ввести дополнительные компоненты, описывающие вязкоупругие свойства. Кроме того, в уравнении движения (2.33), в отличие от решения, рассмотренного в разделе 2.3, необходимо учесть целый ряд дополнительных членов (dv_z/dz , $d\sigma_{zz}/dz$ и $dp/dz = \varphi(z)$), что очень затрудняет решение.

Для инженерных расчетов целесообразнее использовать косвенный метод, для чего процесс течения рассматриваем как установившийся, а непропорциональное изменение давления заменяем линейной функцией с введением поправочного входного коэффициента $p_{вх}$ или $l_{вх}$ (см. рис. 2.14), т. е. общий перепад давления заменяем суммой:

$$p_l - p_0 = \frac{dp}{dz} l + p_{вх} \quad (2.66)$$

где $\frac{dp}{dz}$ — градиент давления, $\frac{dp}{dz} = \text{const}$; l — длина канала; $p_{вх}$ — потери давления на входе; p_l , p_0 — давление на входе и выходе из канала.

Таким приемом мы как бы искусственно все дополнительные затраты энергии на входном участке сосредотачиваем на входе в канал и сводим решение задачи к установившемуся режиму течения, когда

$$\frac{dp}{dz} = (p_l - p_0 - p_{вх})/l$$

Далее решение проводим аналогично рассмотренному в разделах 2.3 и 2.5. Находим уравнение для расчета напряжения сдвига.

Для цилиндрического канала:

$$\tau_{\omega} = (\Delta p - p_{вх}) R/2l \quad (2.67)$$

Рис. 2.15. Зависимость входного поправочного коэффициента для полиэтилена от скорости сдвига при различных температурах.

Для плоскощелевого канала:

$$\tau_w = (\Delta p - p_{вх}) H / 2l \quad (2.68)$$

где $\Delta p = p_l - p_0$.

Для определения скоростей сдвига пригодны уравнения (2.41) и (2.63).

Приведение к установившемуся течению можно выполнить также вторым способом. Продолжим пропорциональную зависимость распределения давления влево от оси ординат до пересечения с линией давления, равного p_l . При этом мы искусственно удлинняем канал на величину $l_{вх}$ (см. рис. 2.14) и течение заменяем установившимся. В этом случае напряжения сдвига будут равны:

$$\tau_w = \frac{\Delta p R}{2(l + l_{вх})} \quad \text{и} \quad \tau_w = \frac{\Delta p H}{2(l + l_{вх})} \quad (2.69)$$

Обычно для удобства расчетов вместо $l_{вх}$ используют входовой поправочный коэффициент m :

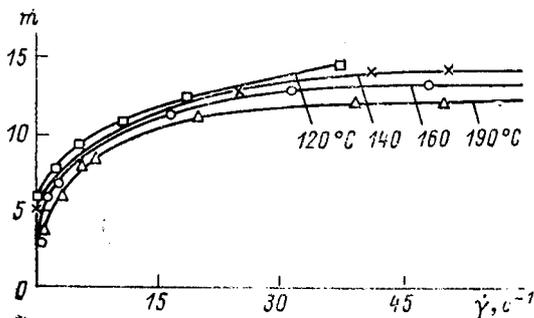
$$m = l_{вх} / R \quad (2.70)$$

Поскольку входные потери связаны с развитием дополнительных вязкоупругих деформаций и разрушением структуры, они зависят от скорости сдвига и температуры (рис. 2.15).

Для экспериментального определения входных потерь давления или поправочного коэффициента обычно используют каналы (сопла) различной длины, но одинакового диаметра. Измеряют последовательно зависимость давления от объемного расхода для каналов различной длины и строят график (рис. 2.16). Затем находят давления на входе в канал при постоянных расходах для каждой длины (горизонтальные сечения). Определив p_1 , p_2 и p_3 , строят графическую зависимость давления от длины канала. Если длина наиболее короткого канала больше, чем длина входового участка с неустановившимся течением, то получаем линейную зависимость (рис. 2.17). Для слишком коротких каналов линейной зависимости не получается, поэтому такой метод использовать нельзя. Интерполируя полученную линейную зависимость на ось ординат, находим значение входных потерь давления $p_{вх}$ для различных расходов (скоростей сдвига).

Если проинтерполировать полученную зависимость до пересечения с осью абсцисс, то отсекаемые отрезки будут численно равны поправочному коэффициенту $m = l_{вх} / R$.

Графическую зависимость, показанную на рис. 2.16, можно использовать также для расчета напряжения сдвига третьим способом. При постоянном объемном расходе скорость сдвига



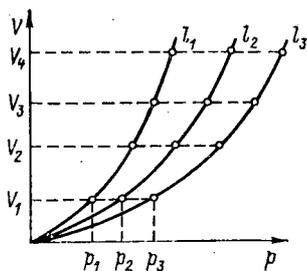


Рис. 2.16. Зависимость объемного расхода от давления при различной длине канала ($l_3 > l_1$).

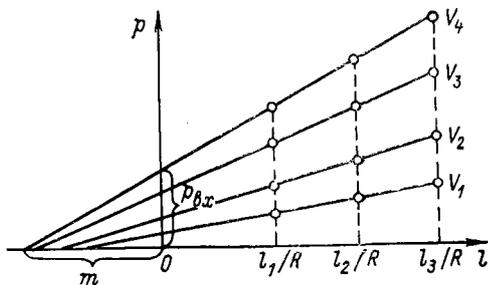


Рис. 2.17. Зависимость давления от длины канала, используемая для нахождения входных потерь.

и входные потери для каналов равных радиусов также будут постоянными. Поэтому для каналов различной длины можем записать:

$$\tau_1 = \frac{(p_1 - p_{вх}) R}{2l_1}; \quad \tau_2 = \frac{(p_2 - p_{вх}) R}{2l_2}$$

Решая совместно эти уравнения и считая, что $\tau_1 = \tau_2$ при $V_1 = V_2$, находим:

$$\tau_w = \frac{(p_2 - p_1) R}{2(l_2 - l_1)} \quad (2.71)$$

Таким образом, подставив значения давлений p_2 и p_1 , найденные из графика рис. 2.16, мы можем найти изменение напряжения сдвига от скорости сдвига для различных расходов.

Полученные уравнения применяются для обработки данных капиллярной вискозиметрии, а также для нахождения перепада давления (обратная задача) при течении расплавов полимеров в формующих экструзионных головках или в каналах формы при литье под давлением.

2.7. НЕУСТОЙЧИВОЕ ТЕЧЕНИЕ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ (ЭЛАСТИЧЕСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ)

При высоких скоростях выдавливания из формующих каналов экструзионных головок на поверхности экструдата (струи) появляется шероховатость или разрывы. Это явление неустойчивого течения называется эластической турбулентностью, однако в данном случае она не имеет ничего общего с турбулентностью, возникающей при течении ньютоновских жидкостей.

Начало неустойчивого течения можно зафиксировать визуально. Вначале появляется матовость (мелкая шероховатость), затем, по мере увеличения скорости, экструдат становится винтообразным или возникают дефекты поверхности типа «апельсиновая кожура», затем периодические дефекты — «поверхность бамбука» и, наконец, на поверхности появляются разрывы или рас-

плав распадается на отдельные части. Начало неустойчивого движения соответствует достижению определенных значений скорости и напряжения сдвига, называемых критическими $\dot{\gamma}_{кр}$ и $\tau_{кр}$.

Наступление неустойчивого течения в основном обусловлено пристенным скольжением расплава на стенке канала. При низких скоростях сдвига напряжения сдвига, возникающие на стенках канала, меньше сил адгезии расплава, и дефектов не наблюдается. По мере увеличения скорости потока напряжения сдвига возрастают и появляется местное проскальзывание расплава по поверхности. При этом напряжения сдвига резко падают за счет перехода параболического профиля скорости к прямоугольному. Затем вновь происходит сцепление расплава с поверхностью и переход на установившееся течение, а потом наступает новый срыв. Такое периодическое пульсирующее течение вызывает колебание высокоэластических деформаций, которые нарушают гладкость струи и обуславливают появление дефектов типа «поверхность бамбука». Если срыв происходит не по всей поверхности одновременно, возникает закручивание струи и образование винтообразной поверхности. При очень больших напряжениях сдвига отрыв расплава вызывает большие высокоэластические деформации и в поверхностных слоях возникают разрывы. Таким образом, неустойчивое течение связано не вообще со скольжением, а с периодическим процессом скольжение—прилипания (*stick—slip*).

Поскольку неустойчивое течение приводит к уменьшению и повышению напряжений сдвига, возникает связь поверхностных дефектов с высокоэластическими свойствами расплавов полимеров. Периодическое проскальзывание обуславливает неравномерное развитие упругой высокоэластической деформации, которая, релаксируя на выходе из канала, вызывает неоднородное изменение размеров экструдата (струи). В связи с этим появляются периодические кольцевые утолщения, а при срыве струи по винтовой линии происходит закручивание струи.

Обработка многочисленных экспериментальных данных показала, что неустойчивое течение наступает при достижении определенных напряжений сдвига $\tau_{кр}$ или при развитии критического значения высокоэластической упругой деформации ϵ_y .

На критическое значение напряжения сдвига оказывает влияние длина канала. Чем короче канал, тем при меньших скоростях наступает неустойчивое течение. Это объясняется тем, что при больших напряжениях сдвига, возникающих во входовой части канала, они при малой длине канала не успевают полностью отрелаксировать, и течение происходит при неустановившемся режиме, т. е. большие напряжения сохраняются до выхода из канала и не стабилизируют потока.

Склонность потока к появлению неустойчивого течения возрастает в случае применения каналов с плоским входом. При резком переходе от одного сечения канала к другому во входовой части появляются значительные эластические деформации и гладкость поверхности экструдата нарушается при более низких

скоростях, чем при плавном переходе (применение конфузора). Исследования потока полиэтилена низкой плотности методом двойного лучепреломления показывают, что максимальные нормальные напряжения образуются в тонком слое в резервуаре перед входом в канал и возрастают с увеличением расхода. Как уже было показано в разделе 2.6, перед плоским входом возникают вихри, вызывающие циркуляционное течение в угловой зоне. При достижении критической скорости в области вихрей появляются сильные пульсации и в резервуар периодически попадает расплав из циркуляционной зоны (вихрей). Поскольку расплав в области вихрей имеет меньшую накопленную эластическую деформацию, то это неизбежно приводит к колебанию размеров экструдата на выходе из канала. Таким образом, при неправильно сконструированных каналах неустойчивое течение может быть обусловлено как проскальзыванием, так и пульсацией расплава в вихревых зонах. Повысить глянец поверхности, уменьшить шероховатость можно за счет повышения температуры.

При высоких температурах напряжения сдвига уменьшаются, вязкоупругие свойства проявляются значительно слабее и в результате увеличения гибкости макромолекул быстрее происходят релаксационные процессы, т. е. уменьшается длина входовой части канала. Поэтому при более высоких температурах можно получать качественные изделия при сравнительно высоких скоростях течения расплава.

Важность описанных эффектов для технологии производства изделий из полимерных материалов обусловлена тем, что появление поверхностных дефектов существенно ограничивает производительность экструзионных агрегатов при изготовлении труб, пленок, листов, оболочек кабелей, профилей и волокна.

2.8. ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛИМЕРАХ

Как уже было рассмотрено ранее, при сдвиговом течении расплавов полимеров происходит изменение конформации макромолекул и переход их в неравновесное состояние. С термодинамической точки зрения процесс развития больших упругих деформаций в расплавах полимеров носит необратимый характер, поскольку всегда сопровождается необратимой диссипацией энергии вследствие вязкого течения. Аналогичная картина наблюдается при растяжении полимеров или при продольном течении.

Развитие высокоэластической деформации в полимерах происходит во времени и зависит как от условий деформирования (напряжения, скорости деформации и температуры), так и от строения полимеров. Выход на равновесную деформацию после приложения внешней силы **сбычно** характеризуют временем запаздывания, которое оценивается отношением вязкости к модулю упругости. Изменение напряжения при постоянной деформации называют процессом релаксации, параметром этого процесса является время релаксации.

В полимерах релаксационные процессы состоят из стадий быстрой и медленной релаксации, которым соответствуют разные участки релаксационного спектра. Когда полимерная макромолекула под воздействием температуры или внешней среды начинает изменять конформацию, разным элементам структуры (релаксаторам) соответствуют разные времена релаксации. Так, для поворота боковой группы вокруг связи, соединяющей ее с главной цепью, требуется некоторое минимальное время t_1 ; для поворота одного звена относительно другого — время t_2 ; для согласованного поворота двух звеньев — большее время t_3 ; для изменения ориентации сегмента — время t_s ; для изменения конформации макромолекулы — еще большее время t_N . Таким образом, свойства системы оценивают набором времен релаксации отдельных элементов и представляют в виде функции распределения этих релаксаторов по временам жизни — релаксационного спектра.

Конформационные превращения — основа развития высокоэластических деформаций. Однако деформация в значительной степени зависит также от плотности флуктуационной сетки, которая в свою очередь определяется скоростью деформации. С изменением плотности флуктуационной сетки меняется эффективная длина участков цепей между соседними микроблоками или зацеплениями. При сдвиговом течении вследствие различия скоростей перемещения отдельных слоев жидкости внешнее усилие в виде напряжения сдвига передается через проходные участки макромолекул, в результате чего они начинают ориентироваться. Под действием этих же сил путем последовательного движения звенья цепи выходят из микроблоков, т. е. узлы флуктуационной сетки разрушаются и увеличивается средняя длина проходных участков, которые являются основным источником накопления мгновенной упругой и высокоэластической деформации. Разрушение узлов флуктуационной сетки измеряется числом элементарных переходов звеньев из одного положения в другое, следовательно, этот процесс протекает во времени. Поэтому чем больше плотность флуктуационной сетки в начале развития деформации, тем больше время запаздывания; и наоборот: при переходе от ориентированного состояния к равновесному время релаксации меняется в зависимости от степени ориентации цепи и способности макромолекул к образованию новых узлов флуктуационной сетки. Поскольку все конформационные переходы макромолекул взаимосвязаны, они зависят от межмолекулярного взаимодействия и гибкости цепи, а следовательно, в значительной степени определяются температурой. С изменением температуры весь релаксационный спектр смещается и деформируется.

Зависимость времени релаксации индивидуальных релаксаторов от температуры можно описать уравнением Больцмана:

$$t_i = \beta_i \exp(E_i/kT) \quad (2.72)$$

где E — энергия активации релаксационного процесса; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

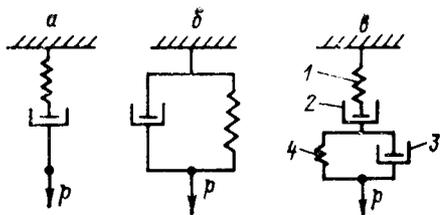


Рис. 2.18. Механические модели вязкоупругих жидкостей:

a — модель Максвелла; *б* — модель Фойхта — Кельвина; *в* — обобщенная модель; 1, 4 — пружины; 2, 3 — демпферы.

Для анализа протекающих в полимерах релаксационных процессов ввиду их сложности используют механические модели, составленные из пружин и демпферов. Пружина моделирует мгновенную упругую деформацию, а демпфер (поршень, перемещающийся в жидкости) — вязкое течение.

Наиболее простой является модель Максвелла, состоящая из последовательно соединенного демпфера и пружины (рис. 2.18, *a*). При приложении постоянной нагрузки модель Максвелла деформируется. Общая деформация модели равна сумме деформаций упругого ϵ_y и вязкого ϵ_B элементов:

$$\epsilon = \epsilon_y + \epsilon_B \quad (2.73)$$

Упругая деформация из закона Гука равна:

$$\epsilon_y = \tau/G \quad (2.74)$$

где τ — напряжение сдвига; G — модуль сдвига.

Подставив (2.74) в (2.73) и переписав в дифференциальной форме, находим

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{d\epsilon_B}{dt} \quad (2.75)$$

Для случая простого одноосного сдвига скорость сдвига вязкого течения равна:

$$\frac{d\epsilon_B}{dt} = \frac{\tau}{\eta}$$

Подставив полученное выражение в (2.75), после преобразований получаем:

$$\eta \frac{d\epsilon}{dt} = \tau + \frac{\eta}{G} \frac{d\tau}{dt} \quad (2.76)$$

Здесь $\eta/G = \lambda$ называется временем релаксации напряжения. Физический смысл этой величины заключается в том, что по истечении времени $t = \lambda$ первоначальное напряжение уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма). Это вытекает из следующего условия. Если зафиксировать свободный конец втянутой или сжатой модели Максвелла, то общая деформация останется постоянной ($\epsilon = \text{const}$), а под действием растянутой пружины будет деформироваться только вязкий элемент, вследствие чего будет происходить уменьшение (релаксация) общего напряжения в системе. При $d\epsilon/dt = 0$ из (2.76) имеем:

$$dt = - \frac{\eta}{G} \frac{d\tau}{\tau} \quad (2.77)$$

Проинтегрировав это выражение, находим:

$$t = -(\eta \ln \tau)/G + C_1$$

Для нахождения C_1 принимаем, что при $t = 0$ напряжение равно исходному значению $\tau = \tau_0$. Тогда:

$$\tau = \tau_0 e^{-Gt/\eta} \quad (2.78)$$

Действительно, если через промежуток времени, равный $t = \eta/G$, подсчитать напряжение, то первоначальное его значение уменьшается в e раз, так как $Gt/\eta = 1$.

Недостатком модели Максвелла является то, что она не учитывает развития высокоэластической деформации в момент приложения или снятия внешней нагрузки.

Для описания развития высокоэластической деформации применяется модель Фойхта—Кельвина (см. рис. 2.18, б). При нагружении происходит одновременное деформирование вязкого и упругого элементов. При этом деформация пружины задерживается во времени демпфером. Прекращается деформирование, когда внешняя нагрузка уравнивается усилием пружины. При этом $d\varepsilon/dt = 0$.

При параллельном соединении элементов общее напряжение сдвига равно:

$$\tau = \tau_y + \tau_v \quad (2.79)$$

Заменяв напряжения $\tau_y = G\varepsilon_y$, а $\tau_v = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$, получаем:

$$\tau = G\varepsilon_y + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.80)$$

Введем подстановку $\tau/G - \varepsilon = y$, тогда при условии постоянства нагрузки ($\tau = \text{const}$) производная будет равна $-d\varepsilon = dy$. Подставив новые переменные в (2.80), получаем:

$$\frac{dy}{y} = -\frac{G}{\eta} dt \quad (2.81)$$

После интегрирования:

$$\ln y = -Gt/\eta + C_2$$

Подставляя вместо y его значение и считая, что в момент приложения нагрузки ($t = 0$) $\varepsilon = 0$, получаем:

$$\varepsilon = \tau(1 - e^{-Gt/\eta})/G \quad (2.82)$$

Если $t \rightarrow \infty$, то $e^{-Gt/\eta} \rightarrow 0$. Поэтому конечная деформация будет обусловлена жесткостью (упругостью) пружины и равна $\varepsilon = \tau/G$.

Недостатком модели Фойхта—Кельвина является то, что она не описывает мгновенной упругой деформации и вязкого течения.

Этого недостатка можно избежать, если воспользоваться обобщенной моделью (см. рис. 2.18, в). При нагружении такой модели деформирование происходит за счет мгновенного растяжения пружины 1 с одновременным вязким течением в демпфере 2. В резуль-

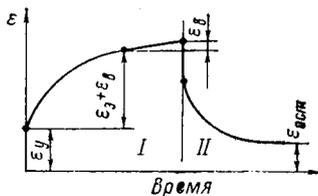


Рис. 2.19. Зависимость развития деформации во времени для модели Алфрея-Гарни: I — нагружение; II — восстановление деформации после снятия нагрузки.



Рис. 2.20. Модель Каргина и Слонимского.

тате перемещения поршня демпфера 3 начинает развиваться высокоэластическая деформация, которая прекращается через некоторое время при достижении равновесия в пружине 4. Дальнейшее деформирование модели осуществляется только за счет перемещения демпфера 2 (рис. 2.19), т. е. происходит вязкое течение.

Таким образом, если нагрузка не меняется во времени, то деформация будет равна накопленной упругой деформации пружины модели Максвелла, высокоэластической деформации модели Фойхта—Кельвина и нарастающей во времени деформации вязкого элемента модели Максвелла. Отсюда следует, что изменение упругих деформаций происходит в момент приложения или изменения внешней силы.

После снятия нагрузки мгновенно восстанавливается деформация упругого элемента 1, а затем происходит восстановление запаздывающей высокоэластической деформации (элементы 3 и 4), т. е. идет процесс релаксации. Если перейти к рассмотрению полимеров, то время релаксации связано у них с переходом макромолекул в новую равновесную конформацию и зависит от ряда факторов, прежде всего от гибкости цепи и межмолекулярного взаимодействия. Особенно сильно это проявляется при сдвиговом течении, когда создается неравномерная степень ориентации по слоям сдвига.

Из предыдущих разделов известно, что скорость сдвига, как правило, меняется по глубине канала, поэтому напряжения сдвига будут также различными. При релаксации такой неоднородной системы конформационные переходы макромолекул задерживаются соседними и количественно зависят от плотности узлов флуктуационной сетки. При пространственной флуктуации отдельных напряженных (ориентированных) участков макромолекул в них создаются напряжения, под действием которых происходит перемещение звеньев и узлов флуктуационной сетки, т. е. процесс релаксационных переходов удлиняется во времени с ростом плотности флуктуационной сетки.

Рассмотренная обобщенная модель не учитывает межмолекулярного взаимодействия и гибкости макромолекул. Поэтому для описания поведения полимерных систем применяют модель, предложенную В. А. Каргиным и Г. Л. Слонимским (рис. 2.20). Модель состоит из последовательно соединенных обобщенных моделей,

погруженных в вязкую жидкость, которая имитирует межмолекулярное взаимодействие.

Релаксационные явления имеют большое практическое значение при переработке полимеров. Так, в зависимости от условий течения расплавов полимеров формируются изделия, обладающие анизотропией, которая может изменяться во времени или при нагревании. Происходящие при этом процессы можно понять и объяснить, только используя теорию релаксационных явлений. Для быстрого развития ориентации волокон и пленок желательно снижать время релаксации, то же самое необходимо осуществлять при формировании изделий экструзией и литьем под давлением, если необходимо снизить анизотропию их механической прочности, усадки и других характеристик. И наоборот, когда нужна высокая анизотропия, время релаксации должно быть большим, что достигается понижением температуры расплава и увеличением вязкости или быстрым охлаждением изделий.

Следует отметить, что помимо рассмотренных механических релаксационных явлений в полимерах могут протекать электрические и магнитные релаксационные процессы, которые следует учитывать при переработке полимеров или эксплуатации изделий. На них основано также исследование свойств полимеров физическими методами.

2.9. ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ

Наличие конформационных переходов при течении, а также развитие упругой деформации обуславливают проявление специфических эффектов, характерных для течения расплавов и расплавов полимеров, таких, как нормальные напряжения при сдвиговом течении, эффект Барруса, эффект Вайссенберга.

Развитие нормальных напряжений. При течении под воздействием напряжений сдвига макромолекула подвергается силовому воздействию. Поскольку одна часть макромолекулы задерживается межмолекулярным взаимодействием, а другая ее часть увлекается в движение, то происходит ориентация; в то же время тепловая флуктуация вызывает частичную дезориентацию, поэтому в зависимости от скорости сдвига и температуры устанавливается динамическое равновесие. Однако в целом ориентированное состояние является неравновесным, поэтому вдоль основной цепи возникает усилие, обуславливающее появление нормальных напряжений. Значение этих напряжений пропорционально напряжению сдвига и накопленной упругой деформации. Обычно подобные зависимости записывают относительно разности нормальных напряжений. Так, в случае осевого течения в цилиндрическом канале первую разность нормальных напряжений можно вычислить по формуле Вайссенберга—Муни—Ривлина:

$$\sigma_{zz} - \sigma_{rr} = \tau_{rz} \varepsilon_{\gamma} \quad (2.83)$$

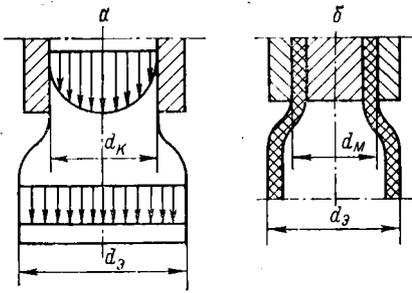


Рис. 2.21. Изменение размеров расплава после выхода из канала:

a — круглый профиль; *б* — трубчатая заготовка.

При очень малых упругих деформациях применяют формулу Лоджа:

$$\sigma_{zz} - \sigma_{rr} = 2\tau_{rz}\varepsilon_y \quad (2.84)$$

Соответственно подобные уравнения применяют для течения в плоскощелевых прямоугольных каналах.

Относительно второй разности нормальных напряжений существуют различные мнения. Некоторые авторы считают, что $\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} \approx 0$. Однако указывается также, что эта разность значима, но имеет отрицательную величину.

Упругая деформация, возникающая при сдвиговом течении, зависит от напряжения сдвига и описывается уравнением:

$$\varepsilon_y = \tau_{rz}/G(\dot{\gamma}) \quad (2.85)$$

где $G(\dot{\gamma})$ — модуль упругости, который является функцией градиента скорости или напряжения сдвига.

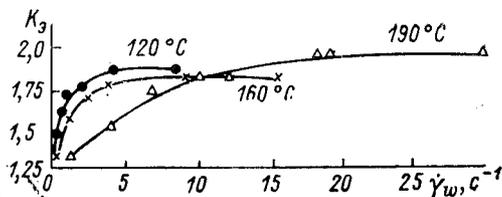
Эффект Барруса. После выхода расплава из формующих каналов под действием нормальных напряжений возникает эластическое восстановление струи, так называемый эффект Барруса. Эластическое восстановление — это изменение сечения экструдата. Так, при течении в цилиндрическом канале на выходе наблюдается увеличение диаметра, а при истечении из кольцевых каналов изменяется как диаметр, так и толщина стенки трубчатого экструдата (рис. 2.21). Обычно в качестве показателя эластического восстановления используют коэффициент K_3 :

$$K_3 = \frac{R_c}{R_R} = \frac{R_3}{R_R} \left(\frac{\rho_0}{\rho_p} \right)^{1/3} \quad (2.86)$$

где R_c — радиус струи расплава; R_3 — радиус экструдата после охлаждения; R_R — радиус канала; ρ_p — плотность расплава; ρ_0 — плотность полимера при 20°C.

Изменение линейных размеров экструдата (уменьшение длины и увеличение сечения) связано с протеканием релаксационных процессов. Упругая деформация, накопленная в расплаве при течении в канале, восстанавливается после снятия внешней силы, т. е. при выходе из канала макромолекулы переходят в равновесное состояние. Однако этот процесс происходит при свободном выходе. Если же расплав отводится с помощью тянущего приемного устройства, то он на выходе подвергается действию растягивающих напряжений от принудительной вытяжки, и если эти напряжения больше нормальных, обусловленных напряжениями сдвига, то сечение экструдата уменьшается и процесс экструзии

Рис. 2.22. Зависимость коэффициента эластического восстановления от скорости сдвига для полиэтилена низкой плотности при различных температурах.



осуществляется с вытяжкой расплава. В дальнейшем мы будем рассматривать процесс со свободным выходом расплава.

Поскольку ориентация макромолекул количественно связана с напряжением сдвига, то коэффициент эластического восстановления зависит от скорости сдвига, температуры и длины канала. При увеличении скорости сдвига происходит нелинейный рост коэффициента эластического восстановления (рис. 2.22). При низких температурах высокая степень ориентации достигается при малых значениях скорости сдвига, а при повышении температуры зависимость эта становится более плавной, так как возрастает процесс дезориентации макромолекул под действием тепловой флуктуации. Следует заметить, что при достижении некоторого значения скорости сдвига темп роста коэффициента эластического восстановления $K_э$ замедляется, а в некоторых случаях даже уменьшается значение $K_э$. Это явление связано с появлением эластической турбулентности или проскальзыванием расплава по поверхности канала.

При увеличении длины канала $K_э$ снижается, что объясняется входными потерями давления. Поскольку на входе в канал развиваются большие напряжения сдвига, то при течении в коротких каналах они не успевают снизиться к выходу и расплав вытекает с большой степенью ориентации, а коэффициент эластического восстановления больше, чем в длинных каналах. При увеличении длины каналов напряжения постепенно снижаются и на некотором расстоянии от входа в канал при переходе к установившемуся режиму течения становятся минимальными. Поэтому высокая степень ориентации, достигнутая на входе, постепенно к выходу из канала уменьшается, что сказывается на значении коэффициента «разбухания» струи (рис. 2.23).

Используя аналогичный анализ, можно предсказать изменение $K_э$ с изменением других факторов, влияющих на реологические характеристики. Основным критерием оценки эластического восстановления должны служить напряжение сдвига и время релаксации. Так, применение конического участка на входе в канал позволяет значительно снизить $K_э$, однако увеличение

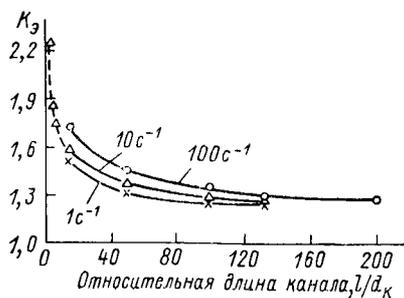


Рис. 2.23. Зависимость изменения коэффициента эластического восстановления струи от длины канала при различных скоростях сдвига.

коэффициента будет наблюдаться до более высоких скоростей сдвига, поскольку напряжения сдвига на входе уменьшаются и неустойчивое течение, т. е. срыв струи, сдвигается в область больших скоростей сдвига.

Для количественного описания процесса эластического восстановления струи принимаем следующие условия: 1) на выходе расплава из канала сохраняется изотермичность потока; 2) гравитационные силы, действующие на расплав, незначительны (масса выдавленного полимера мала); 3) жидкость не сжимаемая; 4) течение в канале установившееся; 5) время восстановления велико и достаточно для осуществления процесса релаксации напряжений на выходе из канала.

Если на расплав действует нормальное напряжение σ_{zz} , то вся накопленная упругая и высокоэластическая деформация струи будет равна:

$$\epsilon_z = \sigma_{zz}/E \quad (2.87)$$

где E — модуль упругости при сжатии; σ_{zz} — среднее значение нормальных напряжений.

Однако накопленная упругая деформация восстанавливается не полностью, поскольку часть нормальных напряжений уравновешивается гидростатическим давлением, которое создается внутри струи на выходе после эластического восстановления струи.

При сдвиговом течении в каналах возникают напряжения сдвига, которые являются функцией радиуса или глубины канала (см. разделы 2.3 и 2.5). Возникающая под действием напряжения сдвига ориентация макромолекул также изменяется по глубине канала. При этом в центре она минимальна, а на поверхности канала имеет максимальное значение. При эластическом восстановлении растянутые внешние слои сжимают расплав и внутри струи возникает избыточное давление, под действием которого внешние слои расплава растягиваются в тангенциальном направлении. Таким образом, внешние слои экструдата можно рассматривать как упругую цилиндрическую оболочку, находящуюся под давлением. Из теории прочности цилиндрических оболочек следует, что равновесие деформации наступает, когда

$$2\sigma_{zz} = \sigma_{\theta\theta} \quad (2.88)$$

Таким образом, упругая осевая деформация будет происходить до момента установления равновесия осевых и тангенциальных напряжений и количественно будет равна:

$$\epsilon'_z = (l_1 - l_2)/l_2 = l_1/l_2 - 1 \quad (2.89)$$

где l_1 и l_2 — длина экструдата до и после эластического восстановления.

С учетом этого остаточная осевая деформация после восстановления струи будет равна:

$$\epsilon''_z = \epsilon_z - \epsilon'_z \quad (2.90)$$

Деформация в тангенциальном направлении зависит от коэффициента Пуассона и осевой деформации эластического восстановления струи:

$$\epsilon_{\theta} = \mu \epsilon_z' \quad (2.91)$$

Переходя от деформации к напряжениям сдвига, с учетом равенства (2.88) из уравнений (2.90) и (2.91) имеем:

$$2 [\sigma_{zz} - E (l_1/l_2 - 1)] = \mu E (l_1/l_2 - 1) \quad (2.92)$$

Это равенство означает, что остаточное осевое напряжение уравнивается нормальным напряжением, возникающим в тангенциальном направлении при восстановлении струи. Поскольку при эластическом восстановлении масса не изменяется, можем записать:

$$\rho_p \pi R_c^2 l_1 = \rho_p \pi R_k^2 l_2$$

Тогда при равенстве плотностей изменение линейных размеров будет равно:

$$l_1/l_2 = (R_c/R_k)^2 = K_3^2 \quad (2.93)$$

Поскольку на внешние слои расплава на выходе действует только атмосферное давление, можно принять, что $\sigma_{rr} \approx 0$, тогда, используя уравнение (2.83) и (2.85), а также заменяя среднее напряжение сдвига его значением на поверхности канала, имеем:

$$\sigma_{zz} = \frac{4}{9} \frac{\tau_w^2}{G(\psi)} \quad (2.94)$$

Из равенства (2.92) с учетом (2.93) и (2.94) получаем:

$$K_3 = \sqrt{\frac{8\tau_w^2}{9G(\psi)E(2 + \mu)} + 1} \quad (2.95)$$

Данное уравнение получено для канала сравнительно большой длины. Поэтому при переходе к коротким каналам необходимо учесть напряжения, возникающие на входе в канал, и их частичную релаксацию. Используя уравнение, полученное для модели Максвелла (2.78), можем определить напряжения сдвига при течении в коротких каналах:

$$\tau_l \approx 1,5\tau_w \exp [\pi R_k^2 G(\psi) (l_y - l_p) / \eta(\psi) V] \quad (2.96)$$

где l_y — длина канала, в котором развивается установившееся течение; l_p — длина рассчитываемого канала; V — объемный расход расплава; τ_w — напряжение, соответствующее установившемуся течению.

С учетом экспериментальных данных (см. рис. 2.23) можно с некоторым приближением принять $l_y \approx 200R$. Подставляя τ_l в уравнение (2.95), можно рассчитать коэффициент эластического восстановления для канала любой длины.

Используя уравнения (2.83) и (2.92), а также равенство $\sigma_{zz} - \sigma_{rr} = G\epsilon_y^2$ (где ϵ_y — упругая деформация), можно полу-

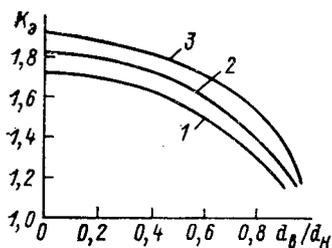


Рис. 2.24. Зависимость коэффициента эластического восстановления от отношения диаметров кольцевого канала:

1 — полипропилен; 2 — полиэтилен низкой плотности; 3 — полиэтилен высокой плотности.

читать уравнение для расчета первой разности нормальных напряжений:

$$\sigma_{zz} - \sigma_{rr} = \tau_i \sqrt{5/3} (K_3^2 - 1) \quad (2.97)$$

Таким образом, полученное решение учитывает восстановление упругой деформации струи расплава, имеющей неоднородную степень ориентации макромолекул полимера по сечению.

Другие авторы, в частности Мендельсон, Фигнер и Бэгли, неоднородную степень ориентации учитывают только усреднением напряжений, что справедливо для упругих тел, а не для расплавов полимеров.

При течении расплавов полимеров в кольцевых каналах закономерности изменения коэффициента восстановления струи в зависимости от длины канала, температуры и скорости сдвига сохраняются, однако одновременно с увеличением наружного диаметра увеличивается и толщина стенки. При этом на значение эластического восстановления влияет соотношение внутреннего и наружного радиусов канала: чем меньше R_n/R_n , тем больше разбухание. При близких значениях R_n и R_n наружный размер заготовки увеличивается, а внутренний уменьшается, т. е. конформационные переходы происходят одновременно за счет увеличения диаметра и толщины стенки. В том случае, когда диаметр дорна мал, происходит увеличение заготовки по наружному диаметру (рис. 2.24). Такое непропорциональное изменение размеров объясняется тем, что деформация и нормальное напряжение для цилиндрических оболочек пропорциональны радиусам.

Зависимость коэффициентов эластического восстановления струи при выходе расплава из кольцевого канала может быть выражена следующим образом:

$$K_{R_{cp}} K_\delta = \tau_i^2 / 2G(\psi) E (2 + \mu) + 1 \quad (2.98)$$

где $K_{R_{cp}}$, K_δ — коэффициенты восстановления струи по среднему радиусу и толщине стенки экструдата.

В значительной степени изменяется картина проявления эластического восстановления струи при наложении на осевые напряжения сдвига тангенциальных. Этого можно достигнуть, например, при вращении одного из цилиндров кольцевого канала. В данном случае, если тангенциальные напряжения малы, то изменение размеров экструдата происходит, как и при одноосном течении, т. е. наблюдается увеличение диаметра. При больших значениях $\sigma_{\theta\theta}$, когда достигается определенное отношение $\sigma_{zz}/\sigma_{\theta\theta}$, расплав на выходе уменьшается в диаметре (рис. 2.25, а).

Под действием кругового течения макромолекулы полимера ориентируются и располагаются в кольцевых слоях сдвига, что показано в виде модели на рис. 2.25, б. Так как векторы нормальных сил $\sigma_{\theta\theta}$ расположены под некоторым углом (по дуге окружности), возникает составляющая силы, стягивающая расплав к оси вращения, т. е. заготовка стремится уменьшиться в диаметре. Однако под действием нормальных напряжений σ_{zz} появляется противодействие. Поэтому в зависимости от этих напряжений происходит сужение или расширение струи.

Зависимость между коэффициентами эластического восстановления струи и нормальными напряжениями имеет вид:

$$K_{Rcp} K_{\delta} = \frac{2\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta} (1 + 2\mu)}{E (2 + \mu)} + 1 \quad (2.99)$$

Или, переходя от нормальных напряжений к касательным, получаем:

$$K_{Rcp} K_{\delta} = \frac{\tau_i^2 - 2\tau_{r\theta} (1 + 2\mu)}{2G_{(\psi)} E (2 + \mu)} + 1 \quad (2.100)$$

Экспериментальные и расчетные данные имеют хорошую сходимость (отклонение 2÷5 %), поэтому их можно применять для расчета скорости или температуры при производстве пустотелых изделий, профилей, гранул. Исходя из условия обеспечения заданных размеров этих изделий, т. е. по известным размерам формующей головки и значению K_{δ} , можно рассчитать размеры выходящего экструдата. По данным уравнениям решается также обратная задача, т. е. определяются размеры формирующих каналов при известных условиях течения расплава.

Эффект Вайссенберга. Исследуя различные случаи круговых течений расплавов полимеров, Вайссенберг показал, что жидкости, обладающие высокоэластичностью, при сдвиге по цилиндрическим плоскостям как бы стягиваются к оси вращения, преодолевая центробежные силы. При сдвиговом течении между вращающимися цилиндрами, дисками или между дисками

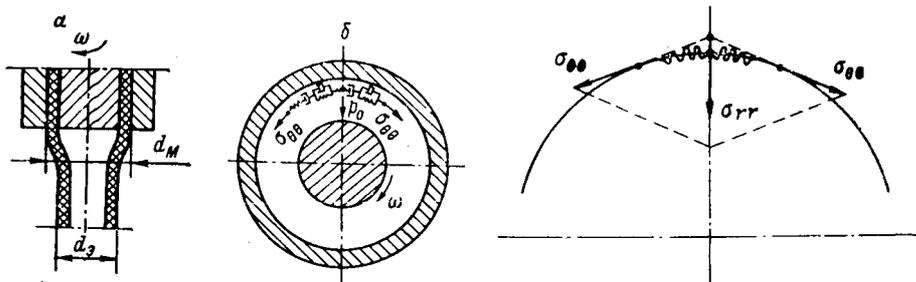


Рис. 2.25. Изменение размеров экструдата (а) и схема возникновения тангенциальных нормальных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ (б) при течении между вращающимися цилиндрами.

Рис. 2.26. Схема расположения векторов напряжений при круговом течении расплава.

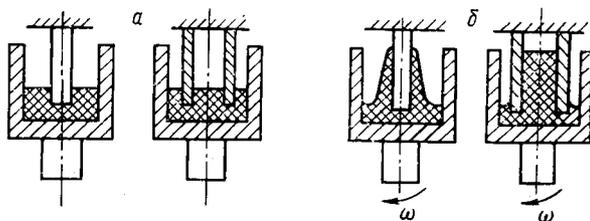


Рис. 2.27. Различные формы проявления эффекта Вайссенберга; положение расплава до вращения (а) и в момент вращения (б) стержня и пустотелого цилиндра.

и конусами ориентация макромолекул происходит по дуге окружности тел вращения. При этом, если молекулу представить в виде упругой обобщенной механической модели, то модель, деформируясь, также будет располагаться по дуге окружности, как показано на рис. 2.25, б. Макромолекулы, находясь в такой неравновесной конформации, стягиваются к оси вращения, так как при сложении векторов $\sigma_{\theta\theta}$ появляются радиальные нормальные напряжения σ_{rr} .

Из геометрического построения (рис. 2.26) видно, что нормальное напряжение σ_{rr} обуславливает сжатие полимера (создает гидростатическое давление) и количественно связано с нормальным напряжением $\sigma_{\theta\theta}$. Отсюда становится понятным необычное поведение расплава при сдвиговом круговом течении. Так, при вращении стержня происходит подъем расплава по стержню вверх (рис. 2.27), а при вращении пустотелого цилиндра расплав течет по внутреннему отверстию, преодолевая силы гравитации.

Эффект Вайссенберга имеет практическое значение: на нем основано измерение первой разности нормальных напряжений в реогониметрах, на этом принципе работают дисковые экструдеры.

Глава 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

Выбор методов переработки полимеров и расчет технологических параметров проводится с учетом технологических свойств материалов: текучести, влажности, времени отверждения, дисперсности, усадки, таблетуемости, объемных характеристик. В зависимости от значений этих показателей полимеры можно считать технологичными или нетехнологичными. Однако понятие технологичности является несколько условным, так как характеризует способность полимеров к переработке существующими в данное время методами и на серийно выпускаемом оборудовании.

С учетом измеренных значений технологических характеристик могут разрабатываться новые методы переработки, технологическая оснастка или оборудование. Поэтому целесообразнее использовать не общее понятие технологичности полимеров, а оценивать технологические свойства количественно.

3.1. ТЕКУЧЕСТЬ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

Текучесть характеризует способность полимеров к вязкому течению при воздействии внешних усилий и численно равна обратной величине вязкости $1/\eta$. Наиболее полная количественная оценка текучести может быть дана с использованием реологических характеристик, рассмотренных в гл. 2. Однако применяются и другие показатели, например, текучесть по Рашигу или показатель текучести расплава. При этом первый из них служит для оценки свойств терморективных пресс-материалов, а второй — термопластичных полимеров.

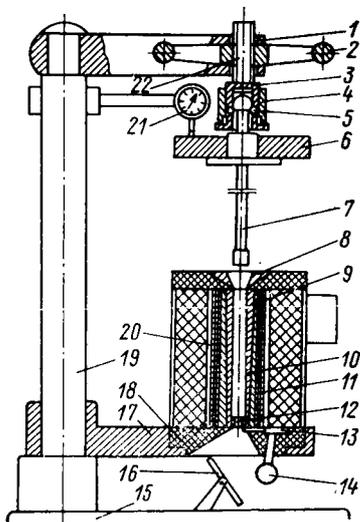
3.1.1. Текучесть термопластичных полимеров

О текучести термопластичных полимерных материалов судят по показателю текучести расплава (индексу расплава), измеряемому методом капиллярной вискозиметрии при строго определенных условиях. За показатель текучести расплава принимается масса полимера, выдавленная в течение 10 мин через стандартное сопло под давлением соответствующего груза и при заданной температуре.

В соответствии с ГОСТ 11645—73 для измерения показателя текучести расплава применяется грузовой капиллярный вискозиметр, конструкция которого показана на рис. 3.1. Основным узлом прибора является измерительная камера, которая состоит из обоймы 9 и сменного цилиндра 10, в отверстие которого снизу вставляется капилляр 12, закрепляемый стопорной планкой. Планка при движении рукоятки 14 перемещается эксцентриком 13. На поверхности обоймы 9 под нагревателем 20 для замера температуры установлен термометр сопротивления 11. Измерительная камера закреплена на кронштейне 17 и теплоизолирована от него втулкой 18.

Рис. 3.1. Прибор для измерения показателя текучести расплава:

1 — кронштейн; 2 — штурвал; 3 — зажимная втулка; 4 — подвижная гильза; 5 — шарик; 6 — груз; 7 — шток; 8 — воронка; 9 — обойма; 10 — цилиндр; 11 — термометр сопротивления; 12 — капилляр; 13 — эксцентрик; 14 — рукоятка; 15 — плата; 16 — зеркало; 17 — кронштейн; 18 — теплоизоляционная втулка; 19 — стойка; 20 — электроннагреватель; 21 — часовой индикатор; 22 — винт.



Нагружающее устройство состоит из штока 7 с набором грузов 6. Шток перед испытанием фиксируется на подъемном винте 22 стопорными шариками 5, зажимной втулкой 3 и подвижной гильзой 4. При подъеме гильзы 4 шарики проходят в пазы и освобождают от зажима сферический хвостовик штока 7. Подъем штока и опускание его может осуществляться механически. При вращении штурвала 2, закрепленного в кронштейне 1, перемещается винт 22 и шток 7. Все узлы прибора смонтированы на стойке 19, закрепленной на плите 15.

Наблюдают за вытекающим расплавом с помощью зеркала 16, а расплав срезается торцовым ножом. Для определения объема выдавливаемого полимера имеется часовой индикатор 21.

Показатель текучести расплава определяют следующим образом. На регуляторе устанавливают заданную температуру и нагревают прибор. Рукояткой 14 выдвигают стопорную планку и сверху в отверстие цилиндра 10 опускают капилляр необходимого размера, выбираемый в зависимости от исследуемого полимера. Для контроля за температурой внутри цилиндра 10 вставляют ртутный термометр. После нагревания прибора ртутный термометр вынимают, а в цилиндр небольшими порциями (1—1,5 см³) загружают полимер, уплотняя каждую порцию до образования однородной массы расплава. Камеру цилиндра заполняют примерно на $\frac{3}{4}$ ее глубины, после чего шток 7 освобождают из зажима и опускают в отверстие цилиндра 10.

Расплав выдерживают в течение 10—15 мин для установления равномерной температуры, а затем на шток 7 устанавливают стандартный груз и выдавливают расплав. Через определенные промежутки времени выдавливаемый расплав срезается с капилляра (сопла) ножом и взвешивается. Показатель текучести расплава i (в г/10 мин) рассчитывают по формуле:

$$i = 10Q/t \quad (3.1)$$

где Q — масса полимера, г; t — время выдавливания, мин.

Показатель текучести расплава является сравнительной характеристикой, однако он широко используется на практике. По значению показателя текучести расплава проводится предварительный выбор метода переработки полимеров. Так, экструзией можно перерабатывать полимеры с показателем текучести расплава 0,3—1,2 г/10 мин, литьем под давлением — 1,2—3 г/10 мин, а для нанесения покрытий пригодны полимеры с $i \geq 7$ г/10 мин. Конечно, эти значения несколько условны, так как подбором температуры расплава вязкость можно изменять в достаточно широком интервале, что позволяет высоковязкие полимеры перерабатывать литьем под давлением, а низковязкие — экструзией.

Известно, что показатель текучести расплава зависит от строения полимера, в частности от молекулярной массы:

$$\bar{i} = \exp(C - \bar{M}_n/B)$$

где \bar{M}_n — среднечисловая молекулярная масса; C , B — постоянные.

Для использования в расчетах технологических параметров показатель текучести расплава целесообразно представить в виде реологических характеристик. Поскольку показатель текучести расплава количественно выражает расход расплава, то, используя уравнение (2.41), можно определить скорость сдвига:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{3n+1}{n} \frac{\bar{i}}{600\rho r R^3} \quad (3.2)$$

где ρ — плотность расплава при температуре измерения показателя текучести; R — радиус капилляра (сопла).

Для определения напряжения сдвига τ_i (в МПа) применяем уравнение (2.68) или (2.69):

$$\tau_i = \frac{9,8GR \cdot 10^{-6}}{2\pi R_{\text{ш}}^2 (l + mR)} = \left(\frac{9,8G}{\pi R_{\text{ш}}^2} - p_{\text{вх}} \right) \frac{R \cdot 10^{-6}}{2l} \quad (3.3)$$

где G — масса стандартного груза; $R_{\text{ш}}$ — радиус штока прибора; l — длина сопла; m — входовой поправочный коэффициент.

Найденные характеристики представляют собой координаты одной точки на реологической кривой течения. Поэтому практическое применение находят значения, полученные для полимеров с различными показателями текучести расплава и представленные в виде номограммы (см. рис. 5.48). Таким образом, значение показателя текучести расплава позволяет получить первую информацию о реологических свойствах расплава и оценить способность полимеров к вязкому течению.

3.1.2. Текучесть термореактивных пресс-материалов

Текучесть термореактивных пресс-материалов по методу Рашига определяется на съемной пресс-форме, размеры которой и условия прессования должны соответствовать стандартным.

Пресс-форма состоит из обоймы 1 (рис. 3.2), в которую вставляют два вкладыша 2, соединяемых штифтами 5 и образующих загрузочную камеру и измерительный канал. Давление в камере создается пуансоном 3. Корпус (обойма) пресс-формы обогревается электронагревателями 4. Измерительный канал имеет овальное сечение (сечение А-А), размеры которого уменьшаются по ходу движения нагретого пресс-материала.

Для определения текучести навеску материала в виде порошка или таблетки помещают в загрузочную камеру пресс-формы, которую предварительно нагревают до температуры испытания. Затем опускают пуансон и в течение 20 с создается удельное давление в камере $30 \pm 2,5$ МПа. Время выдержки пресс-материала под давлением составляет 180 с. В течение этого времени пресс-материал, находящийся в вязкотекучем состоянии, течет по измерительному каналу, заполняя его на соответствующую длину. После окончания выдержки снимают давление и разбирают пресс-форму, отделяя вкладыши 2 друг от друга. За текучесть по Рашигу принимают величину, равную длине (в мм) отпрессованного стержня от основания загрузочной камеры до его плотной части.

Текучесть, найденная по методу Рашига, является относительной величиной, поскольку ее нельзя пересчитать в известные реологические характеристики. При этом значение текучести (длина отпрессованного стержня) зависит от скорости отверждения пресс-материала. Так, если материал обладает хорошей текучестью (малой вязкостью), но способен быстро отверждаться и переходить в твердое состояние, то длина отпрессованного стержня будет небольшой. Это объясняется тем, что

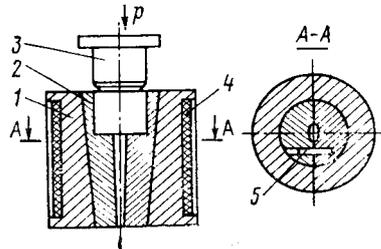


Рис. 3.2. Пресс-форма для измерения текучести по Рашигу:

1 — обойма; 2 — вкладыш; 3 — пуансон; 4 — нагреватель; 5 — штифты.

материал течет очень малое время, т. е. отверждается раньше, чем заканчивается время испытания. И наоборот: если пресс-материал обладает большой вязкостью, но малой скоростью отверждения, то текучесть по Рашигу у него может оказаться высокой, так как он течет на протяжении всего времени выдержки (180 с).

Несмотря на отмеченные недостатки метода, текучесть по Рашигу можно использовать для прогнозирования возможности переработки отдельных марок материалов литьевым или компрессионным прессованием. Например, литьевым прессованием обычно перерабатывают пресс-материалы с текучестью по Рашигу 90—180 мм, а компрессионным прессованием — 30—150 мм.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОТЕКУЧИХ СВОЙСТВ И ВРЕМЕНИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО МЕТОДУ КАНАВЦА

По типу пластометра Канавца в настоящее время серийно выпускается прибор типа ППР-1, испытания на котором проводятся в соответствии с ГОСТ 15882—79. С помощью этого прибора можно определить: напряжение сдвига материала в вязкотекучем состоянии, продолжительность пребывания его в вязкотекучем состоянии, время отверждения, а также зависимость данных характеристик от температуры и скорости сдвига.

Пластометр (рис. 3.3) состоит из корпуса 1, который закреплен на подшипниках в станине прибора. Внутри корпуса 1 вставляются два вкладыша 2, образующие разъемную цилиндрическую матрицу пресс-формы, т. е. наружный цилиндр вискозиметра. Внутренним цилиндром является рифленый штырь 3, который соединен через систему тяг с силоизмерительным рычагом 8. Необходимая нагрузка создается грузом 9, а крутящий момент, возникающий в измерительном канале, записывается на барабане и регистрируется по шкале измерительного прибора 7. Давление в измерительной камере создается пуансоном 5, который соединяется с нагружающим устройством. Корпус 1 имеет привод 6 и может вращаться вокруг оси с заданной угловой скоростью ω .

Измерение проводят следующим образом. В собранную из двух вкладышей камеру матрицы помещают пресс-материал 4 и опускают пуансон 5, создается необходимое удельное давление (30 ± 5 МПа); затем включают привод вращения корпуса 1, который предварительно нагревают до заданной температуры. Пресс-материал, находясь в вязкотекучем состоянии между вращающимся

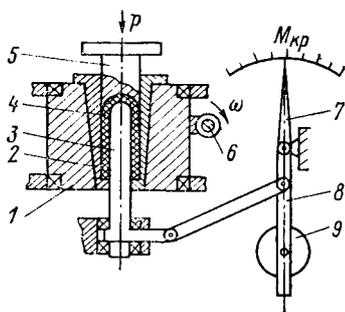


Рис. 3.3. Схема пластометра:

1 — корпус матрицы; 2 — вкладыш; 3 — штырь; 4 — исследуемый материал; 5 — пуансон; 6 — привод; 7 — измерительный прибор; 8 — рычаг; 9 — грузы.

и неподвижным цилиндрами, подвергается сдвиговому течению. Возникающие на стенках неподвижного цилиндра напряжения сдвига стремятся повернуть штырь β , в результате создается крутящий момент $M_{кр}$, регистрируемый измерительным устройством 7. При этом напряжение сдвига пропорционально крутящему моменту и может быть найдено по уравнению (2.53). Напряжение сдвига зависит от свойств материала, температуры и скорости сдвига, которая создается за счет угловой скорости корпуса (матрицы) и описывается уравнением (2.51) или (2.52) в зависимости от радиуса матрицы.

На шкале прибора регистрируется изменение напряжения сдвига во времени (рис. 3.4), обусловленное процессом отверждения, т. е. фактически записывается кривая кинетики отверждения во времени. На диаграмме можно выделить два участка. Участок кривой ob соответствует текучему состоянию материала, когда напряжение сдвига почти не меняется. Отрезок времени, соответствующий участку кривой ob , обычно называют продолжительностью вязкотекучего состояния. В течение времени, соответствующему участку кривой bc , происходит химическая реакция отверждения. При этом угол наклона кривой характеризует скорость перехода материала в неплавкое и нерастворимое состояние.

Время отверждения пресс-материала в пластометре $t_{o.н}$ соответствует участку кривой oc , т. е. равно времени от начала нагревания до достижения определенного значения напряжения сдвига $\tau_{отв}$. Это напряжение для фенопластов должно составлять 5,88 МПа, а для аминопластов — 3,92 МПа. По значению времени отверждения рассчитывается время выдержки при прессовании изделий (см. гл. 10). Если спроектировать точку b на ось ординат, то можно определить напряжение сдвига $\tau_{в.т}$, соответствующее вязкотекучему состоянию материала при данной температуре и частоте вращения ротора. Полученное значение напряжения сдвига можно использовать для расчета пресс-формы или определения эффективной вязкости. С повышением температуры напряжение сдвига в области вязкотекучего состояния уменьшается: раньше начинается процесс отверждения и происходит он с более высокой скоростью (см. рис. 3.4). Таким образом, изменяя температуру испытаний, можно проследить изменение скорости отверждения и продолжительности вязкотекучего состояния $t_{в.т}$ во времени и предугадать поведение пресс-материала при прессовании.

Зависимость $t_{в.т}$ от температуры используется для нахождения максимальной температуры предварительного нагрева пресс-материала перед прессованием. При нагревании материалов до высоких температур необходимо быстро загрузить материал в пресс-форму и сомкнуть ее, чтобы не произошло преждевременное отверждение. Суммарное время загрузки и смыкания (время формования $t_{ф}$) должно быть не больше продолжительности вязкотекучего состояния $t_{в.т}$. Исходя из этого, если отложим на оси ординат (рис. 3.5) время формования $t_{ф}$, то на оси абсцисс можем

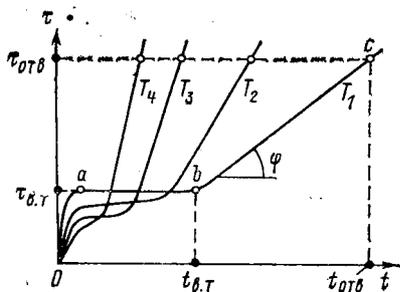


Рис. 3.4. Зависимость напряжения сдвига от времени пребывания пресс-материала в пластометре при различных температурах ($T_1 < T_4$).

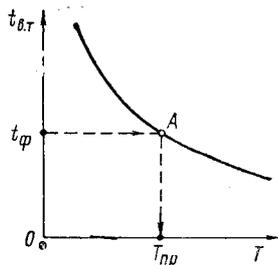


Рис. 3.5. Зависимость продолжительности вязкотекучего состояния от температуры.

определить максимально допустимую температуру предварительного нагревания $T_{пр}$.

На пластометре можно также получить данные для расчета реологической кривой течения $\tau = \varphi(\dot{\gamma})$. Для этого находят напряжение сдвига для материала в вязкотекучем состоянии при различных скоростях сдвига (угловая скорость матрицы ω).

Недостатком данного метода является то, что отверждение пресс-материалов происходит при деформировании. Поэтому под действием напряжений сдвига могут частично разрушаться возникающие пространственные межмолекулярные связи. Такое воздействие может изменить кинетику химической реакции и повлиять на время отверждения. При отверждении в пресс-форме сдвиг слоев отсутствует. Таким образом, при исследовании термореактивных материалов на пластометре не обеспечивается полное моделирование процесса прессования. Для устранения этого недостатка измерения на пластометре можно проводить при периодическом включении вращения ротора на непродолжительное время. В целом исследование пресс-материалов на пластометре является комплексным методом, так как позволяет достаточно быстро определить несколько технологических показателей.

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПРИ ПРЕССОВАНИИ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Время отверждения пресс-материалов зависит от температуры пресс-формы, толщины прессуемого изделия, свойств материала и других факторов. В значительной степени на скорость отверждения влияет также конфигурация изделий. Поэтому смоделировать все перечисленные параметры на пластометре очень трудно. Можно определять время отверждения пресс-материалов при прессовании стандартных изделий с последующим определением их прочности, диэлектрических свойств или других показателей.

Наиболее часто время отверждения устанавливают при прессовании стандартного стаканчика (рис. 3.6) в стандартных условиях. В данном методе испытаний за время отверждения принимают минимальное время от момента смыкания пресс-формы до извлечения изделий. Отпрессованный стаканчик должен соответствовать утвержденному эталону и при визуальном осмотре на его поверхности не должно быть заметно вздутий, трещин и других дефектов.

Этот метод является субъективным и позволяет получить лишь сравнительные данные, которые невозможно использовать для расчета времени отверждения других изделий. С помощью этого метода можно лишь сравнивать качество различных партий пресс-материала.

Более объективные и надежные данные получают при прессовании стандартных образцов в виде брусков или дисков с последующим определением их свойств (разрушающего напряжения при изгибе, удельного объемного или поверхностного электрического сопротивления, электрической прочности и др.). Изготавливают образцы при различном времени отверждения, затем испытывают их и строят графическую зависимость изменения перечисленных показателей во времени. Минимальное время отверждения t_0 соответствует точке перегиба кривой и перехода ее в горизонтальный участок (рис. 3.7).

Время отверждения можно определить также методом экстракции растворимой части связующего, содержащейся в отпрессованных изделиях. Для этого изделия (центральную их часть по толщине) размалывают и полученную навеску помещают в аппарат Сокслета для экстракции. Считают, что пресс-материал отвержден, если содержание растворимой части связующего составляет 5—7%. Однако этот метод длителен и трудоемок.

В отдельных случаях, например при изготовлении ответственных деталей машин, время отверждения определяют при прессовании непосредственно самих изделий с последующим их испытанием.

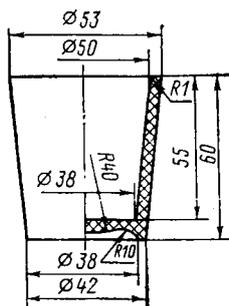


Рис. 3.6. Стандартный стаканчик для определения времени отверждения при прессовании.

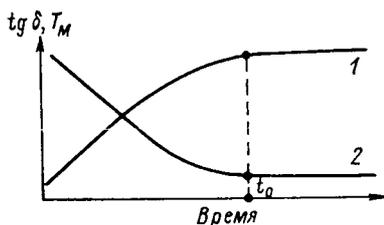


Рис. 3.7. Зависимость изменения теплостойкости по Мартенсу T_M (1) и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ (2) от времени отверждения для реактопластов.

3.4. УСАДКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Поскольку определенную конфигурацию и размеры изделие принимает, когда полимер находится в расплаве, то последующее охлаждение вызывает изменение линейных размеров изделия, т. е. появление усадки. Усадка Y (в %) характеризует уменьшение линейных размеров изделий по отношению к размерам формующего инструмента:

$$Y = \frac{l_{\Phi} - l_{и}}{l_{\Phi}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

где l_{Φ} — размер формующей полости при 20 °С; $l_{и}$ — размер изделия при 20 °С.

Вследствие того что большинство изделий формируется за счет сдвигового течения, появляется анизотропия усадки, т. е. размеры по различным направлениям изменяются неодинаково. Анизотропия усадки a_y определяется по формуле:

$$a_y = Y_{\parallel} / Y_{\perp} \quad (3.5)$$

где Y_{\perp} — усадка в направлении, перпендикулярном течению; Y_{\parallel} — усадка вдоль направления течения.

Как уже было рассмотрено ранее, неоднородность напряжений сдвига по толщине потока расплава, а также наличие температурного градиента при охлаждении расплава обуславливают возникновение структур, отличающихся по размерам и форме. Кроме того, в изделиях могут появиться остаточные напряжения. Для придания структуре однородности и более полной релаксации остаточных напряжений применяют нагревание изделий и выдержку их в течение определенного времени — термообработку.

Релаксационные процессы и структурные изменения приводят к изменению линейных размеров изделия, которые оцениваются величиной дополнительной усадки Y_d (в %):

$$Y_d = \frac{l - l_T}{l} \cdot 100 \quad (3.6)$$

где l и l_T — размеры изделия до и после термообработки.

Уменьшение линейных размеров изделий и анизотропия усадки зависят от строения полимера и условий формования. Усадка термопластичных и терморезистивных полимерных материалов имеет различную физико-химическую основу.

3.4.1. Усадка изделий из реактопластов

Изделия из реактопластов изготавливаются преимущественно прессованием, литьем под давлением, методом заливки в формы или контактным формованием на модели, копирующей конфигурацию изделия. Усадка изменяется в зависимости от метода формования и вида материала.

Рассмотрим закономерности изменения усадки при компрессионном и литьевом прессовании, а также при литье под давлением.

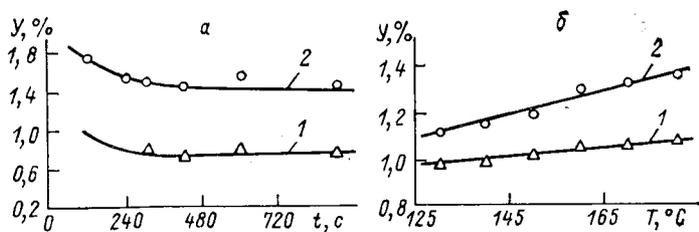


Рис. 3.8. Зависимость изменения усадки $У$ от времени отверждения t (а) и температуры T (б) при литьевом прессовании:

1 — усадка в направлении, перпендикулярном течению; 2 — усадка вдоль направления течения.

При изготовлении изделий этими методами происходит переход полимерного связующего в вязкотекучее состояние и протекает реакция полимеризации или поликонденсации. Последняя, например при прессовании изделий из пресс-порошков на основе фенолоформальдегидного связующего, сопровождается выделением побочного продукта — воды, которая под действием высокой температуры испаряется. Процесс отверждения протекает во времени, поэтому чем больше время выдержки, тем полнее завершается химическая реакция и усадка после извлечения изделия из формы становится меньше (рис. 3.8). При сокращении времени отверждения частота пространственной сетки в отвержденном полимере уменьшается, снижается его жесткость и поэтому интенсивнее развиваются релаксационные процессы вне формы. Поэтому размеры изделий уменьшаются, усадка увеличивается. Изменение времени выдержки также влияет на количество выделяемой воды и на объем, занимаемый изделием, что приводит к изменению усадки.

Влияние температуры на усадку несколько сложнее. В данном случае возрастает разность температурных изменений размеров изделия и стальной пресс-формы, одновременно изменяется и кинетика отверждения полимера. При высокой температуре поверхностные слои отверждаются быстрее, что затрудняет удаление паров воды и других летучих веществ. После извлечения из пресс-формы они постепенно удаляются, соответственно уменьшается объем изделия и усадка возрастает.

Как видно из рис. 3.8, при литьевом прессовании усадка вдоль направления течения материала в пресс-форме примерно в 2 раза больше, чем в направлении, перпендикулярном течению. Подобная картина характерна также для компрессионного прессования, особенно при изготовлении тонкостенных изделий. Усадка по высоте для них всегда больше, чем по другим направлениям.

Наиболее ярко проявляется анизотропия усадки при прессовании изделий из пресс-материалов, содержащих в качестве наполнителя древесную муку. Для пресс-материалов, наполненных порошкообразным минеральным наполнителем, анизотропия не наблюдается или выражена незначительно. Анизотропия

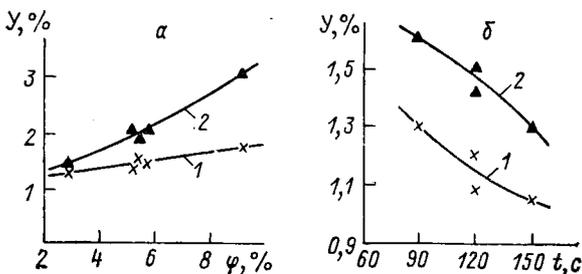


Рис. 3.9. Зависимость изменения усадки Y от влажности пресс-материала φ (а) и времени предварительного (высокочастотного) нагревания (б):

1 — усадка вдоль направления течения; 2 — усадка в направлении, перпендикулярном течению.

усадки для наполненных пресс-материалов можно объяснить различной ориентацией частиц наполнителя и связующего в момент заполнения формы под действием напряжений сдвига.

На величину усадки влияет также влажность пресс-материала (рис. 3.9, а). Так, при увеличении содержания влаги усадка возрастает и при влажности пресс-материала около 9 % составляет примерно 3 %. Длительное хранение пресс-материалов во влажных условиях может привести к появлению брака изделий по размеру после прессования. Для снижения усадки можно использовать предварительное нагревание пресс-материалов. При нагревании до температуры выше $100^\circ C$ часть влаги перед прессованием испаряется и усадка уменьшается; при этом чем больше время предварительного нагревания, тем выше температура и соответственно тем меньше усадка (рис. 3.9, б).

3.4.2. Усадка изделий из термопластов

При изготовлении изделий из термопластичных полимеров также происходит усадка, однако ее закономерности и физическая природа иные. Известно, что с повышением температуры плотность полимеров уменьшается (рис. 3.10). Поэтому, при изготовлении изделий прессованием или литьем под давлением после заполнения формы расплав необходимо сжать, чтобы снизить усадку изделий. Так, при литье изделий из полистирола при давлении 100 МПа усадка составляет 0,1—0,2 %. Особенно сильно изменяется усадка в случае кристаллизующихся полимеров, для которых характерна нелинейная зависимость удельного объема от темпе-

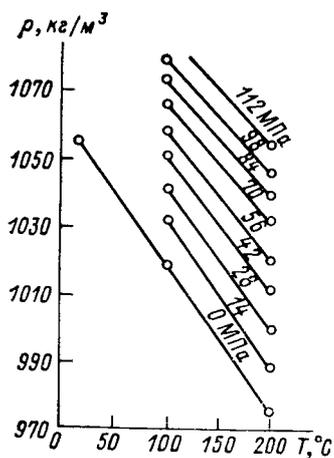


Рис. 3.10. Зависимость плотности полистирола от температуры при различном давлении.

ратуры (см. рис. 1.21). Однако существенно понизить усадку кристаллизующихся полимеров за счет повышения давления в форме практически не удается, так как при высоких давлениях затрудняется извлечение изделий из формы.

Поскольку плотность полимеров зависит от степени кристалличности, усадка изделий соответственно зависит от скорости их охлаждения, температуры формы и расплава. Зависимость удельного объема от температуры и давления с некоторым приближением можно описать модифицированным уравнением состояния:

$$(V_{\text{уд}} - b)(p + \Pi) = RT/M \quad (3.7)$$

где $V_{\text{уд}}$ — удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$; b , Π — коэффициенты; p — давление, Па; M — молекулярная масса полимерного звена; T — температура, К; R — газовая постоянная.

Ниже приведены значения постоянных в уравнении (3.7) для различных полимеров:

	M , кг/моль	Π , МПа	b , $\text{м}^3/\text{кг}$
Полистирол	0,104	180	0,000822
Полиметилметакрилат	0,100	210	0,000734
Этилцеллюлоза	0,0603	230	0,00072
Ацетобутират целлюлозы	0,0544	280	0,000688
Полиэтилен низкой плотности	0,0281	320	0,000875
Полиэтилен высокой плотности	0,0281	295	0,000875
Полиамид (П-6, П-10)	0,0027	1078,6	0,000738

Используя уравнение состояния, можно получить выражение, описывающее зависимость усадки от различных параметров. Для этого в уравнении (3.4) заменим линейные размеры на объемы формирующей полости и расплава:

$$U = 1 - (V_{\text{изд}}/V_{\text{ф}})^{1/3} \quad (3.8)$$

где $V_{\text{изд}}$ — объем изделия при 20 °С; $V_{\text{ф}}$ — объем расплава в форме при температуре литья.

Выразим объемы через удельный объем и массу полимера:

$$\bar{V}_{\text{изд}} = mV_{\text{уд}}^0 \quad V_{\text{ф}} = mV_{\text{уд}}^p \quad (3.9)$$

где m — масса полимера; $V_{\text{уд}}^0$ — удельный объем полимера при 20 °С; $V_{\text{уд}}^p$ — удельный объем расплава полимера при температуре и давлении литья.

Удельный объем расплава из уравнения состояния (3.7) равен:

$$V_{\text{уд}}^p = b + RT/M(p + \Pi) \quad (3.10)$$

Подставив значения $V_{\text{изд}}$ и $V_{\text{ф}}$ в уравнение (3.8) и заменив удельный объем полимера на его плотность, получаем:

$$U = 1 - \sqrt[3]{M(p + \Pi)/\rho [RT + Mb(p + \Pi)]} \quad (3.11)$$

Данное уравнение не учитывает анизотропию усадки, которая возникает вследствие ориентации макромолекул полимера при течении расплава в формирующей полости, экструзионных головках или в валковом зазоре каландра. При охлаждении изделий, имеющих неоднородную ориентацию макромолекул, размеры их вдоль направления течения изменяются сильнее, чем в направлении

нии, перпендикулярном течению. Поскольку степень ориентации зависит от температуры и скорости течения, то анизотропия усадки возрастает при понижении температуры и повышении скорости течения расплава.

Усадка проявляется при всех методах переработки термопластов. Наибольшая усадка имеет место при переработке пластмасс литьем под давлением, поскольку при этом методе формования расплав затекает (впрыскивается) в замкнутую форму и охлаждение происходит с наружной поверхности. В случае создания недостаточного давления при охлаждении расплава происходит значительное уменьшение объема полимера, поэтому внутри изделия появляются пустоты или изделие дает большую усадку. Значение усадки необходимо учитывать при расчете технологической оснастки, поэтому изучение закономерностей усадки имеет важное практическое значение.

3.4.3. Методы определения усадки

Усадку полимерных материалов определяют по ГОСТ 18616—80. Сущность метода заключается в нахождении разности размеров формы и изготовленных образцов и в расчете усадки по формуле (3.8).

Для испытания используются стандартные образцы в виде брусков и дисков, которые изготавливаются в соответствии с ГОСТ 12015—66 и 12019—66.

Образцы из реактопластов получают прессованием в пресс-форме поршневого типа, а образцы из термопластов — литьем под давлением. Для испытания отбирают образцы, изготовленные только в условиях безостановочной работы литьевой машины и воспроизводимости каждого цикла. Образцы замеряют не ранее чем через 16 ч с момента их изготовления. Перед измерением образцы кондиционируют.

Для определения дополнительной усадки образцы из реактопластов подвергают термообработке в течение 168 ч (фенопласты при 110 ± 2 °С, аминопласты при 80 ± 2 °С).

3.5. СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ И ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

При транспортировании в открытой таре и при длительном хранении в сырых помещениях в пресс-материалах и полимерах может увеличиваться содержание влаги в основном за счет гигроскопичности материала (адсорбционная влага) или конденсации ее на поверхности полимера (внешняя влага). На содержание влаги влияет гидрофильность полимера и наполнителя, степень измельчения (дисперсность), а также условия и продолжительность хранения. Чем выше дисперсность материала, тем более развитой поверхностью он обладает и, следовательно, выше его адсорбционная способность.

Содержание летучих веществ в полимерных материалах зависит от содержания в них остаточного мономера и низкокипящих пластификаторов, которые при температуре переработки могут переходить в газообразное состояние.

Содержание влаги или летучих веществ (в %) определяется перед переработкой полимерных материалов.

Рис. 3.11. Прибор Дина и Старка для определения содержания влаги:
1 — колба; 2 — ловушка-приемник; 3 — холодильник.

Наиболее простой метод определения содержания влаги и летучих веществ — сушка полимера в сушильном шкафу. Навеску полимера в количестве $5 \pm 0,0002$ г помещают в бюкс в сушильный шкаф и высушивают при $100\text{—}110^\circ\text{C}$ до постоянной массы, т. е. до тех пор, пока разница результатов взвешивания через 30 мин не будет превышать $0,0002$ г. Для некоторых полимеров температура сушки указана в ГОСТах. По окончании сушки бюксы закрывают крышкой и помещают для охлаждения в эксикатор с прокаленным хлоридом кальция, после чего повторно взвешивают с указанной точностью.

Содержание влаги и летучих веществ X (в %) вычисляют по формуле:

$$X = (m - m_1) / m_2 \cdot 100 \quad (3.12)$$

где m и m_1 — масса бюкса с навеской материала до и после сушки соответственно, г; m_2 — навеска исследуемого полимера, г.

Недостатком метода является большая длительность определения вследствие медленного удаления влаги и необходимости многократного взвешивания.

Содержание влаги в гигроскопичных полимерах целесообразнее определять с помощью вакуумных сушильных шкафов, что значительно ускоряет процесс сушки.

Для определения влаги в пресс-порошках применяют также метод Дина и Старка. Навеску материала в количестве $50\text{—}100$ г помещают в колбу 1 (рис. 3.11), в которую наливают $100\text{—}150$ мл обезвоженного ксилола или толуола. В колбу 1 вставляют приемник-ловушку 2, соединенную с холодильником 3. Собранный прибор устанавливают вертикально и колбу нагревают на песчаной бане. При кипении растворителя вода испаряется и, конденсируясь, собирается в приемнике-ловушке 2. Вода, плотность которой выше, чем у растворителя, накапливается внизу, объем ее измеряют по шкале ловушки. Испытания проводят до тех пор, пока объем воды не перестанет увеличиваться. Содержание воды X (в %) рассчитывают по формуле:

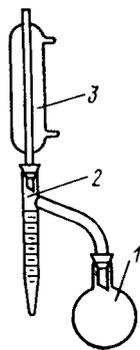
$$X = (V/m) \cdot 100 \quad (3.13)$$

где V — объем воды, мл; m — навеска полимера, г.

Недостатком данного метода является пожароопасность вследствие применения органических растворителей и необходимость их предварительной осушки. Этот метод непригоден для материалов с малым содержанием влаги из-за его невысокой точности.

Влажность пресс-материалов оказывает влияние на процесс переработки и качество получаемых изделий. Так, при прессовании термореактивных материалов с повышенной влажностью удлиняется время выдержки при отверждении, поскольку снижается скорость отверждения и увеличивается число подпрессовок, повышается усадка, на изделиях могут появляться вздутия или трещины, снижается механическая прочность изделий.

При переработке термопластичных полимеров с повышенным содержанием влаги ухудшается адгезионная способность. Поэтому при вальцевании или каландровании появляется проскальзывание полимера на поверхности валков, ухудшается внешний вид изделий; при экструзии и литье под давлением в изделиях могут образовываться поры и пустоты, а на поверхности — серебристые полосы. Повышенное содержание влаги снижает физико-механические свойства изделий, ухудшает их диэлектрические показате-



тели. При переработке влажного поликарбоната, полиэтилен-терефталата и некоторых других полимеров резко уменьшается их термостойкость.

Оптимальное содержание влаги обычно указывается в ГОСТах на материалы. Так, для пресс-материалов оно составляет 2,5—3,5 %, а для термопластичных полимеров — сотые и тысячные доли процента.

3.6. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Гранулометрический состав полимерных материалов оценивается по дисперсности и однородности.

Дисперсность характеризует размер частиц в единицах длины (мм или мкм). Данный показатель учитывается при объемном дозировании полимерного материала. Дисперсность влияет на производительность экструзионных агрегатов, например, при очень больших размерах частиц, когда они превышают глубину нарезки в зоне загрузки, затрудняется заполнение витков шнека гранулами и ухудшается питание агрегата полимером. В некоторой степени в зависимости от размеров частиц изменяется теплопроводность и равномерность окраски при переработке цветных полимерных материалов. С уменьшением размера частиц (повышением дисперсности) несколько увеличиваются прочностные показатели изделий (разрушающее напряжение при изгибе, ударная вязкость) и уменьшается усадка при переработке реактопластов.

Существенное значение для переработки пластмасс имеет однородность материалов (полидисперсность), которая выражается в процентном содержании отдельных фракций. Неоднородность гранулометрического состава приводит к изменению насыпной плотности, непостоянству механической прочности изделий и нарушению стабильности размеров. Чем выше однородность порошка, тем он технологичнее, так как уменьшается разделение по фракциям в бункерах машин и вибрационных дозаторах, обеспечивается точность объемного дозирования. Однородность пресс-порошков способствует равномерности их нагревания в пресс-формах и цилиндрах литьевых машин. При нагревании и отверждении полидисперсных порошков могут появиться вздутия или неровности поверхности изделий.

Для определения размеров частиц и фракционного состава используют различные методы, однако наиболее простым является ситовый анализ. Предварительно высушенный при 110 °С пресс-порошок в количестве 50 г высыпают в чистое сухое сито.

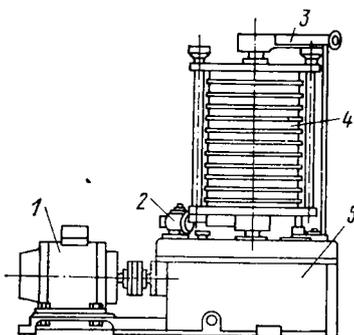


Рис. 3.12. Прибор для определения гранулометрического состава:

1 — электродвигатель; 2 — счетчик оборотов; 3 — встряхивающий механизм; 4 — набор сит; 5 — корпус.

Конструкция прибора для просеивания показана на рис.3.12. Прибор состоит из корпуса 5, на котором смонтирован набор сит 4, совершающих колебательно-вращательное движение вокруг оси. Встряхивание сит осуществляется с помощью механизма 3. Просеивание обычно продолжается 15—20 мин, после чего сита снимают и содержимое их взвешивают с точностью до 0,01 г и рассчитывают содержание фракции.

Для определения размеров гранул применяется метод прямого измерения. Отобранную пробу массой 100 г просеивают через сито № 02—04. Частицы, прошедшие через сито, взвешивают и определяют содержание пылевидной фракции. Из гранул, оставшихся в сите, выбирают непрорезанные и слипшиеся и взвешивают их. Из оставшихся гранул выбирают 10 штук, измеряют их размеры и рассчитывают среднеарифметические значения.

3.7. ОБЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

К объемным характеристикам относятся насыпная плотность, удельный объем, а также коэффициент уплотнения.

Удельный объем — величина, характеризующая отношение объема, занимаемого пресс-порошком, к его массе. Этот показатель используется в основном для пресс-порошков. Удельный объем зависит в основном от дисперсности порошка и его однородности, а также от формы частиц. Насыпная плотность — величина, обратная удельному объему. В зависимости от этих показателей рассчитывают объем загрузочных устройств, бункеров, а также отдельные размеры перерабатывающего оборудования. Так, при прессовании пресс-порошков с большим удельным объемом пресс-формы должны иметь большие загрузочные камеры, что увеличивает их вес и стоимость. Поэтому, перед прессованием порошки, как правило, подвергают таблетированию или выпускают их в гранулированном виде. Особенно велико значение удельного объема при переработке пластмасс на экструзионных или литьевых агрегатах: в зависимости от насыпной плотности изменяется производительность агрегата и давление в цилиндре. Пресс-порошки с большим удельным объемом имеют плохую теплопроводность, поэтому цикл (время) формования удлиняется.

Удельный объем, или насыпную плотность, сыпучих материалов определяют следующим образом. Пробу порошка или гранул через воронку сыпают в измерительный сосуд объемом 100—200 см³. Избыток материала удаляют линейкой. Взвешивают измерительный сосуд с точностью до 0,1 г. Удельный объем $V_{уд}$ (в см³/г) рассчитывают по уравнению:

$$V_{уд} = V / (m_2 - m_1) \quad (3.14)$$

где V — объем сосуда, см³; m_1 — масса пустого сосуда, г; m_2 — масса сосуда с полимером, г.

Для измерения удельного объема волокнистых материалов, не обладающих сыпучестью, их укладывают в измерительный сосуд, разравнивают, а затем прижимают уплотняющим штоком. Удельное давление должно оставлять не более 0,005 МПа. Для испытаний берут навеску массой 60±2 г и по шкале уплотняющего штока находят объем, занимаемый навеской. Удельный объем рассчитывают по формуле (3.14).

Насыпную плотность ρ_n (в г/см³) гранулированных полимеров определяют по той же методике, что и удельный объем сыпучих материалов (порошков), а рассчитывают по следующей формуле:

$$\rho_n = (m_2 - m_1)/V \quad (3.15)$$

Коэффициент уплотнения представляет собой отношение плотности отпрессованного или отформованного изделия к насыпной плотности порошка или гранул:

$$K_y = \rho_0/\rho_n = V_{уд}\rho_0 \quad (3.16)$$

где ρ_0 — плотность полимерного изделия при 20 °С.

Коэффициент уплотнения применяется в основном для расчета объема загрузочных камер пресс-форм.

3.8. ТАБЛЕТИРУЕМОСТЬ

Под таблетирруемостью понимают способность пресс-материалов спрессовываться под действием давления и сохранять заданную форму. Поскольку в исходном состоянии пресс-порошок или волокнистый материал занимают большой объем, их предварительно таблетируют, т. е. придают им определенную конфигурацию. Наиболее часто таблетки имеют цилиндрическую форму определенного диаметра и высоты. При использовании таблетированного материала уменьшается потеря сырья и улучшаются условия работы. Дозирование в данном случае производится по числу таблеток определенной массы, поэтому таблетки при транспортировании или хранении не должны разрушаться.

На таблетирваемость в значительной степени влияет гранулометрический состав. Чем меньше частицы порошка, тем прочнее получаются таблетки. Это явление объясняется тем, что мелкодисперсные порошки имеют более развитую поверхность.

Улучшается таблетирваемость и с повышением влажности. Считают, что полимерные материалы обладают хорошей таблетирваемостью, если изготовленные таблетки не разрушаются под действием определенного усилия (8 МПа) при вдавливании стального шарика диаметром 5 мм. Для испытания на таблетирваемость изготавливают таблетку диаметром 20 мм и высотой 12—15 мм. Пресс-материалы таблетируют при двустороннем сжатии с удельным давлением 80—100 МПа. Разрушающее усилие проверяется на испытательной машине на сжатие. В верхнюю опору при этом вставляют оправку, имеющую сферический наконечник радиусом 5 мм, испытания проводят минимум на 5 таблетках, отобранных из одной партии, и находят среднее разрушающее усилие.

Таблетирваемость имеет большое практическое значение, поскольку позволяет увеличить плотность пресс-порошка. Таблетированные материалы занимают меньший объем, обладают повышенной теплопроводностью и дают меньшие потери при загрузке и транспортировке порошков.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

Глава 4

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

В настоящее время изделия из пластических масс производят весьма разнообразными методами. При этом выбор метода изготовления изделий обусловлен видом полимера, его исходным состоянием, а также конфигурацией и габаритами изделия. Изделия из расплавов или растворов термопластичных полимеров изготавливают экструзией (непрерывное выдавливание расплава), литьем под давлением (заполнение расплавом полости формы), каландрованием (течение между вальками), выдуванием (для пустотелых изделий), спеканием, напылением. В некоторых случаях, например при получении вспененных изделий, в полимер вводят пенообразователи. Изделия из термореактивных материалов могут быть получены при использовании отдельных компонентов (связующих, наполнителей, отвердителей, красителей) или готовых композиций (пресс-материалов) прессованием, литьем под давлением, контактным формованием, намоткой и другими методами.

Крупногабаритные изделия из стеклопластиков изготавливают контактным формованием, малогабаритные — прессованием. Пневмовакуумформованием получают изделия из листовых заготовок, а также изделия, имеющие небольшую толщину стенок. Объемные изделия (емкости, бутылки) в настоящее время производят методом выдувания из трубчатых заготовок расплава полимера, но для изготовления изделий очень больших габаритов (сосуды вместимостью 1000—3000) применяется преимущественно ротационное формование.

Такое разнообразие методов (их существует более тридцати) требует определенной классификации. Предпринимались попытки группировать методы переработки пластмасс по типам изделий (трубы, пленки, сосуды и т. д.), однако такой принцип не учитывает различия и сходства протекающих при переработке физико-химических процессов. Наиболее правильный способ объединения различных методов в типовые группы предложен Мак-Келви. В первую группу им были включены методы переработки пластмасс, основанные на протекании только физических процессов; во вторую группу — методы, цикл формообразования в которых заканчивается химическими превращениями, а методы, при которых протекают как физические, так и химические пре-

вращения, объединены в третью группу. На таком же примерно принципе основана и классификация Ван-Кревелена, но им дополнительно учтено исходное состояние полимера (раствор, расплав или твердое вещество). Однако предложенная Ван-Кревеленом классификация не учитывает ряд существующих методов. В частности, получение изделий из пенопластов, армированных материалов и композиционных полимерных материалов. Не учитывает она и особенностей переработки реактопластов.

Используя принцип объединения технологических процессов в группу Мак-Келви и расширяя схему Ван-Кревелена, можно более детально классифицировать все существующие методы с учетом исходного состояния полимерных материалов, их состава, а также разновидностей физико-химических процессов, протекающих при формообразовании изделий (рис. 4.1). В первую группу объединены такие методы, как экструзия, каландрование, литье под давлением, получение пустотелых изделий, поскольку в процессе формообразования изделия протекают одинаковые физические превращения. Формообразование изделий в данном случае осуществляется за счет деформации полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии, с последующим охлаждением расплава. Все эти процессы описываются закономерностями течения неньютоновских вязкоупругих жидкостей, а также кристаллизацией или стеклованием полимеров. В качестве исходного сырья используются гранулированные композиции на основе термопластичных полимеров, однако для экструзии и каландрования допускается применение порошкообразных композиций после сухого смешения или расплавов после вальцевания.

Вторая группа методов переработки (ротационное формование, напыление, окунание, спекание) имеет общие диффузионно-адгезионные процессы. В данном случае изделия изготавливаются преимущественно из порошкообразной массы или пасты с последующим спеканием. В самостоятельные группы объединены такие технологические процессы, как получение изделий из раствора (полив пленок, формование волокна, шпрединоование), изготовление изделий вспениванием полимерных композиций, а также полимеризацией мономера или жидкого форполимера в формах.

Для всех процессов последней пятой группы характерны общие закономерности протекания реакций полимеризации или поликонденсации. Мономер смешивают с инициатором или катализатором, заливают в жидком виде в форму, где вследствие химической реакции происходит образование полимера. Методом полимеризации мономеров в формах получают листовые материалы, а также изделия различной конфигурации, например, из полиметилметакрилата и капролона. Такими методами, как ориентация, пневмовакуумформование и штампование перерабатывают преимущественно листовые и пленочные материалы в высокоэластическом состоянии, которые получают каландрованием или экструзией. Для этих методов характерна деформация полимера при

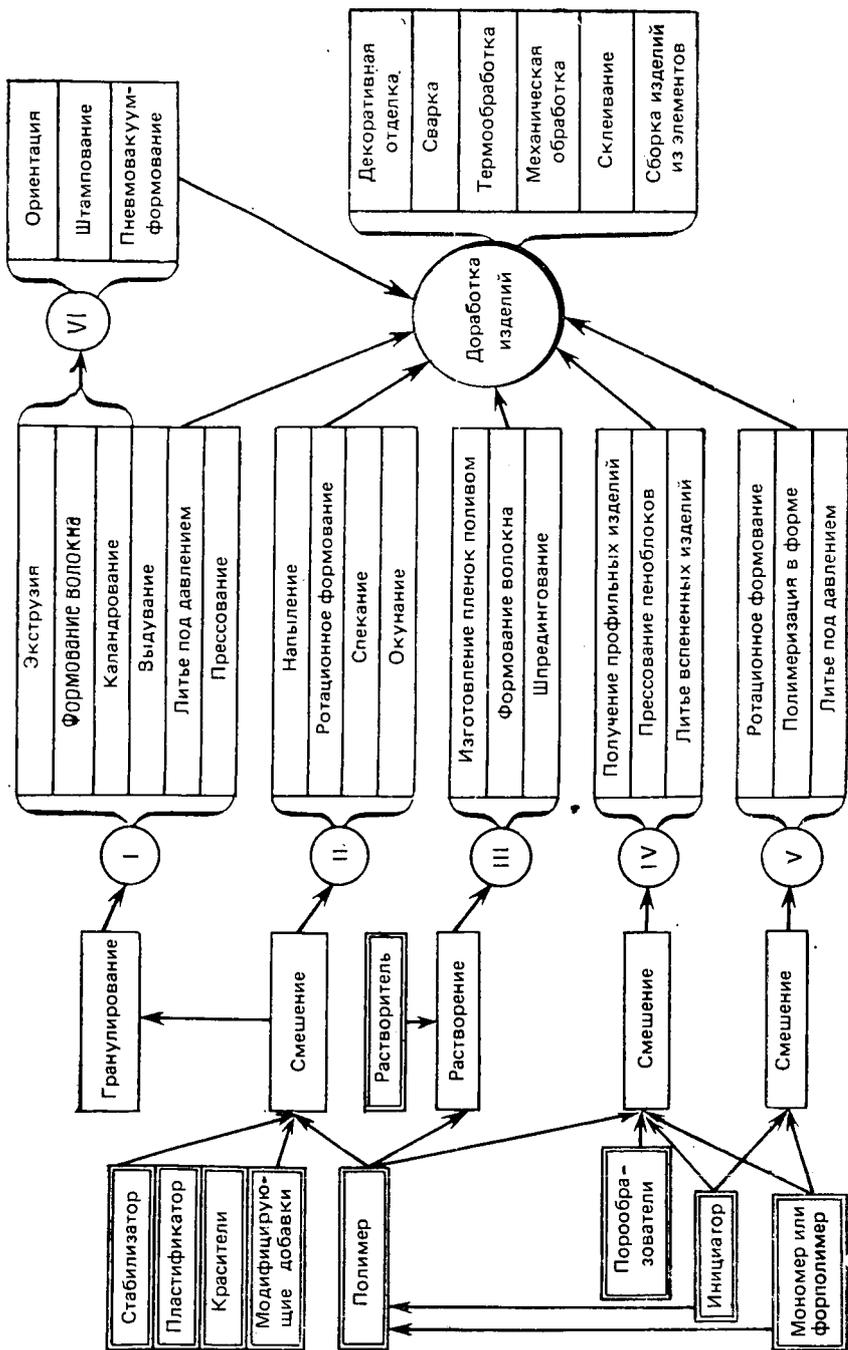


Рис. 4.1. Классификация методов изготовления изделий из термoplastичных полимерных материалов;

растяжении, процессы рекристаллизации и ориентации, поэтому они объединены в шестую группу.

Изделия, полученные различными методами, подвергают доработке: механической и термической обработке, декоративной отделке, сварке, склеиванию и т. д. Все эти виды обработки основаны на различных физических или химических процессах и могут быть объединены в одну группу лишь условно как отделочные операции.

Аналогично составлена классификация методов переработки терморезактивных материалов (рис. 4.2). В данном случае изготовление изделий может осуществляться из композиционных пресс-материалов или из отдельных компонентов (жидких полимеров, наполнителей, армирующих материалов).

Во всех методах VII группы формообразование изделия (придание композиции необходимой конфигурации) осуществляется за счет сдвигового течения пресс-материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, с последующим отверждением связующего и переходом его в неплавкое и нерастворимое состояние. Данные процессы объединены в одну группу, поскольку имеют общие физико-химические закономерности: вязкое течение неньютоновской жидкости и химическая реакция отверждения связующего.

В самостоятельную группу объединены такие методы, как контактное формование, прессование стеклотекстолита и гетинакса, формование намоткой и т. д. В этих методах формообразование изделий осуществляется в результате придания определенной конфигурации армирующим материалам, пропитанным жидкими связующими, и последующего отверждения. Можно применять и пропитку армирующих материалов полимером после укладки их в форму. Во всех этих методах происходит течение вязкой жидкости через пористый слой (стеклоткань, бумагу, стекловолоконистую массу) и химическая реакция отверждения связующего.

В десятую группу включены методы, предназначенные для изготовления изделий из вспенивающихся терморезактивных композиций. Характерной особенностью этих методов является то, что процесс порообразования и химическая реакция отверждения протекают одновременно.

Изделия, изготовленные из терморезактивных материалов, также подвергают дополнительной обработке, однако она несколько отличается от обработки деталей из термопластов, что должно быть учтено при описании технологического процесса.

Представленная классификация, вероятно, не лишена недостатков, однако использование ее в значительной степени облегчает методическое распределение материала для различных технологических процессов по главам в определенной последовательности. Из этой классификации следует, что теоретические основы процессов целесообразнее рассматривать для групп методов с учетом их физико-химических закономерностей, а затем описывать технологию.

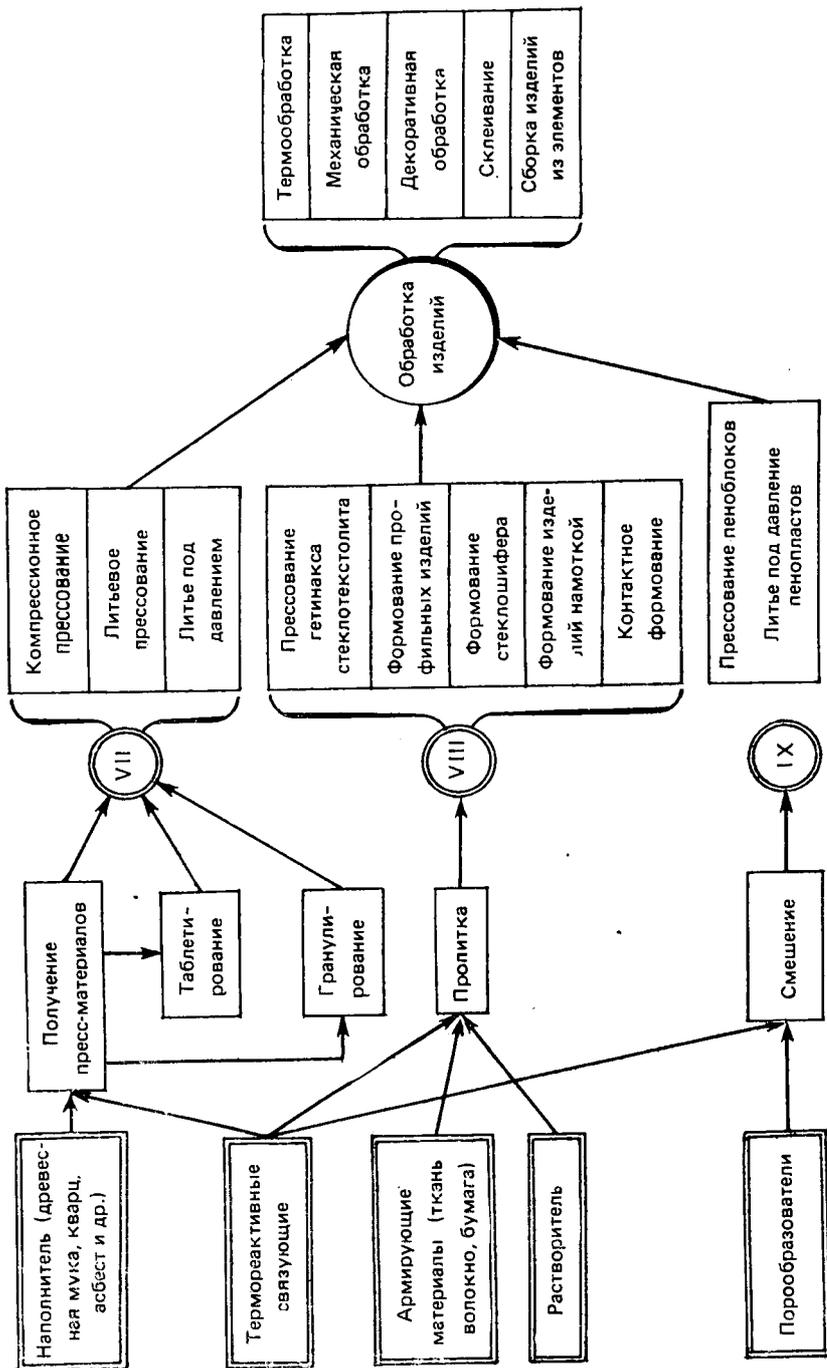


Рис. 4,2. Классификация методов изготовления изделий из термореактивных полимерных материалов.

4.2. СМЕШЕНИЕ

Смешение — это технологический процесс, применяемый для введения в полимер добавок, целенаправленно изменяющих его свойства, и гомогенизации композиции. Перед изготовлением изделий в полимеры, как правило, вводят стабилизаторы, красители, пластификаторы, наполнители, вспенивающие компоненты и другие добавки, которые необходимо равномерно распределить в массе полимера, т. е. произвести смешение. Смешение осуществляется преимущественно в несколько стадий. Сначала происходит распределение компонентов на макроуровне — при смешении сыпучих материалов или перемешивании твердых частиц с жидкостью. На последующих стадиях смешение протекает в расплаве, что обеспечивает получение более однородной массы на микроуровне. Смешение применяется не только для достижения равномерного распределения компонентов и получения изотропной массы, но и с целью изменения физического состояния смешиваемых компонентов (растворение, плавление) и обеспечения протекания химической реакции (перемешивание инициатора с мономером или отвердителя с полимером и т. д.).

В зависимости от исходного состояния компонентов различают следующие виды смешения:

- 1) смешение сыпучих веществ, происходящее вследствие перемещения частиц под действием на систему механических сил или сжатого воздуха (создание псевдооживленного слоя);
- 2) смешение сыпучих и жидких веществ, осуществляемое при механическом воздействии;
- 3) смешение жидкостей, протекающее в результате совместного действия молекулярной диффузии и механических сил;
- 4) смешение полимеров в вязкотекучем состоянии, осуществляемое при механическом воздействии.

Кроме того, процессы смешения подразделяются на периодические и непрерывные, однако во всех случаях смешение является результатом воздействия механических сил на компоненты, находящиеся в рабочем объеме смесителя.

С теоретическими основами процесса смешения студенты знакомятся в курсе «Процессы и аппараты химических производств», поэтому здесь мы рассмотрим только особенности смешения полимерных композиций.

Смешение сыпучих веществ. Данный вид смешения применяется при окрашивании полимера, когда к бесцветному гранулированному или порошкообразному полимеру добавляется окрашенный полимер. В некоторых случаях в полимер вводят пигмент, опудривая гранулы полимера порошком пигмента, но при этом не достигается равномерное распределение пигмента и требуется последующее смешение на вальцах или в экструдерах. Сухое смешение обычно является первой стадией введения в полимер наполнителей или других твердых компонентов, а также вторичного сырья (измельченных отходов производства изделий).

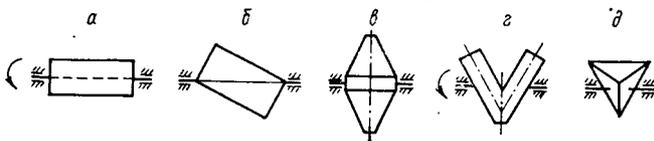


Рис. 4.3. Схемы барабанных смесителей:

а — горизонтальный цилиндрический; **б** — цилиндрический, наклоненный к оси вращения; **в** — биконический вертикальный; **г** — бидецилиндрический или V-образный; **д** — тетраэдрический.

Процесс смешения обычно производится в барабанных смесителях (рис. 4.3). При вращении барабана компоненты перемешиваются за счет циркуляции сыпучего материала. Под действием центробежных сил частицы прижимаются к поверхности барабана и поднимаются на некоторую высоту, а затем падают вниз, вследствие чего достигается взаимное перемещение компонентов. Данный способ, несмотря на простоту, обеспечивает достаточно хорошее смешение, однако процесс длителен и сравнительно энергозатратен. Для интенсификации процесса применяются смесители с мешалками. Под действием лопастей мешалок достигается вращение частиц материала и взаимное перемещение их в объеме смесителя, что позволяет быстро получить однородную смесь. Хорошее смешение обеспечивается в пневматических смесителях (рис. 4.4). После загрузки смешиваемых компонентов в корпус 1 через патрубки под решетку 2 подается сжатый воздух, частицы переходят в псевдооживленное состояние, и происходит интенсивное перемешивание компонентов.

Процесс является непрерывным, так как через боковые патрубки можно непрерывно подавать компоненты и отводить готовую смесь. Для интенсификации смешения предусматривается дополнительный ввод сжатого воздуха в трубу эрлифта. Недостатком данного процесса является необходимость очистки выходящего воздуха от частиц смешиваемых компонентов, для чего устанавливаются циклоны и фильтры.

Для количественного описания процесса смешения используется метод статистического анализа. При достаточно хорошем смешении разброс значений концентраций подчиняется биномиальному закону распределения. Это означает, что вероятность $P(x)$ присутствия в отобранной пробе x частиц диспергируемой фазы равна плотности биномиального распределения:

$$P(x) = \frac{N!}{b!(N-b)!} g^b (1-g)^{N-b} \quad (4.1)$$

где N — число частиц компонентов, содержащихся в пробе; b — число частиц вводимого компонента; g — доля вводимого компонента в общем объеме смеси.

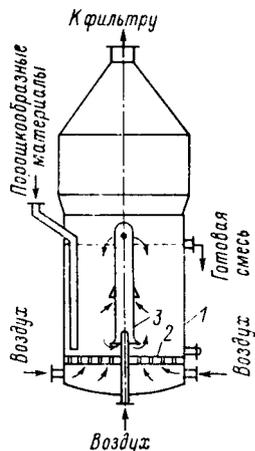


Рис. 4.4. Пневматический смеситель:

1 — корпус; 2 — решетка; 3 — труба эрлифта.

Для оценки смешения в качестве критерия используется также коэффициент неоднородности V_C (в %):

$$V_C = \frac{100}{C} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - C)^2} \quad (4.2)$$

где n — число проб; C_i — концентрация вводимого компонента в i -й пробе; C — концентрация этого же компонента при идеальном смешении.

При высоком качестве смешения $V_C \rightarrow 0$.

Смешение сыпучих и жидких компонентов. В качестве жидких компонентов к полимерам добавляют пластификаторы, стабилизаторы, растворители, красители или перечисленные добавки, приготовленные в виде пасты. В том случае, если компонентов жидкой фазы очень мало, полимер добавляют небольшими порциями, проводят последовательное смешение до получения однородной массы. При приготовлении растворов обычно растворитель или пластификатор добавляют к полимеру по частям: вначале вливают $1/3$ — $2/3$ жидкости и перемешивают, а затем добавляют остальную часть и перемешивают окончательно.

При введении в порошкообразный или гранулированный полимер жидких компонентов вначале возможно слипание массы и прилипание ее к поверхности смесителя. Чтобы исключить это, смешение проводят в лопастных смесителях. За счет движения лопастей масса перемещается в пространстве и соскабливается со стенок смесителя. При этом обеспечивается равномерное взаимное распределение жидкой и твердой фаз. Как правило, такое смешение осуществляется в несколько стадий: например, сначала холодное смешение, а затем с подогревом массы; можно последовательно использовать различные смесители.

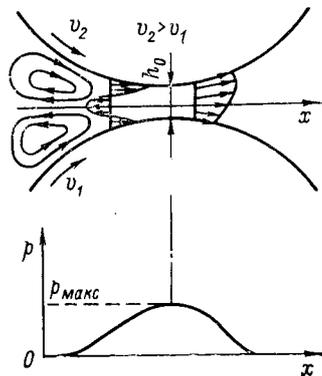
Смешение полимеров в вязкотекучем состоянии. Наиболее равномерное распределение компонентов достигается при смешении полимеров в вязкотекучем состоянии, т. е. при температурах выше температуры текучести. При этом процесс может проводиться как периодическим, так и непрерывным методом.

Наиболее распространенным периодическим методом смешения является вальцевание, когда гомогенизация достигается за счет многократного пропуска массы через зазор между вращающимися валками. Валки располагаются параллельно друг другу и вращаются в противоположные стороны с различной скоростью. Отношение окружных скоростей валков называют фрикцией.

Вследствие прилипания расплава к поверхности валков происходит втягивание его в межвалковый зазор. По ходу движения расплава зазор между валками уменьшается. Поэтому движение расплава происходит как бы с подпором. Через широкий зазор между валками массы втягивается больше, чем пропускается в узкой части. Поэтому возникает избыточное давление и масса в центре потока начинает течь в обратную сторону (рис. 4.5). Вследствие избыточного давления, т. е. при наличии градиента давления dp/dx , возникает сдвиговое течение, которое накладывается на поступательное движение расплава, обусловленное движением валков. Как

Рис. 4.5. Схема течения расплава и распределения давления в зазоре между валками.

видно из рис. 4.5, вначале давление возрастает, а затем, достигнув максимального значения, начинает уменьшаться. Следовательно, градиент давления при переходе через точку $p_{\text{макс}}$ меняет знак. На входе в межвалковый зазор давление меньше, чем в самом зазоре, поэтому масса внутри слоя течет в обратную сторону, вследствие чего между валками возникают два циркуляционных вихря, обеспечивающих перемешивание массы. Эпюра распределения скорости по сечению и траектория движения расплава на входе в валки показаны на рис. 4.5. На выходе из валков градиент давления меняет знак, поэтому скорость поступательного и сдвигового течения складываются. Эпюра скорости приобретает форму трапеции с выпуклостью в средней части. Сдвиговое течение возникает также за счет разности частот вращения валков, т. е. зависит от фрикции. Чем больше фрикция и чем меньше зазор между валками, тем больше скорость сдвига.



Таким образом, скорость сдвига в любом фиксированном сечении зазора равна:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{R(\omega_2 - \omega_1)}{h(x)} \pm \left(\frac{dp}{dx} \right)^{1/n} \left(\frac{y}{k} \right)^{1/n} \quad (4.3)$$

где ω_1 и ω_2 — угловые скорости валков; $h(x)$ — зазор между валками по координате x ; y — координата по глубине зазора; k и n — коэффициенты реологического уравнения.

Циркуляционные вихри, возникающие на входе, и сдвиговое течение в зазоре между валками обуславливают перемещение расплава и смешение компонентов только в плоскости xy . Для получения однородной массы во всем объеме периодически вручную или с помощью автоматических устройств осуществляют подержку расплава на валке и смешение его по ширине валков. Для интенсификации смешения в межвалковом зазоре устанавливают дополнительные валки или вводят в зону противотока клин. Это позволяет сместить циркуляционную зону расплава в область малых зазоров между валками и повысить скорость сдвига.

Недостатком метода смешения на вальцах является значительная трудоемкость процесса, а также сильное термоокисление полимера вследствие длительного контакта расплава с кислородом воздуха.

Смешение компонентов в вязкотекучем состоянии можно также проводить в закрытых смесителях роторного типа или с помощью экструдеров. Для получения композиционных полимерных материалов обычно используют одно- или двухшнековые агрегаты, а также дисковые экструдеры.

4.3. ГРАНУЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Композиции, полученные смешением, перед изготовлением изделий обычно подвергают гранулированию. Гранулирование — это превращение полимера в сыпучий зернистый продукт, состоящий из однородных по размеру частиц. Гранулы могут иметь форму цилиндра, шара, чечевицы, куба или прямоугольной пластинки. Но в одной партии форма гранул и их размеры должны быть одинаковыми. Размеры гранул влияют на насыпную плотность полимера и задаются при гранулировании в зависимости от метода переработки полимера. Так, для литья под давлением на машинах с малой глубиной нарезки шнека диаметр гранул должен быть 1,5—3 мм, а на машинах со шнеками с большой глубиной канала — 2—5 мм.

Метод гранулирования выбирается в зависимости от требуемой формы гранул с учетом вязкости расплава. Обычно гранулы цилиндрической или чечевицеобразной формы из высоковязких полимеров изготавливают методом выдавливания расплава через цилиндрические отверстия с последующей отрезкой экструдата на решетке вращающимся ножом (рис. 4.6). Расплав под действием давления, создаваемого в шнековом или дисковом экструдере, продавливается через отверстия решетки 4 в виде жгутов, которые разрезаются вращающимся ножом 3. При горячей резке, когда срезаются жгуты в виде расплава, нож должен перемещаться по торцу решетки без значительного зазора. Срезанные части экструдата подхватываются струей сжатого воздуха и транспортируются с помощью пневмотранспорта в бункер. Охлаждение гранул при этом осуществляется воздухом за время движения их от гранулятора до бункера. В некоторых случаях срезанные гранулы охлаждаются на специальном вибротранспортере, а затем загружаются в бункер. Иногда для исключения прилипания гранул к решетке и ножу в места среза расплава подают струю водяного пара, а гранулы для быстрого охлаждения сразу же погружают в холодную воду. Однако при жидкостном охлаждении необходима последующая сушка гранул. Диаметр гранул d_r , получаемых при горячей резке экструдата, зависит от размеров отверстий решетки гранулятора и от коэффициента эластического восстановления струи расплава:

$$d_r = d_p K_э \quad (4.4)$$

где d_p — диаметр отверстия решетки; $K_э$ — коэффициент эластического восстановления струи (см. раздел 2.8).

При получении коротких гранул деформация торцевой стенки расплава несколько меньше, чем при обычном

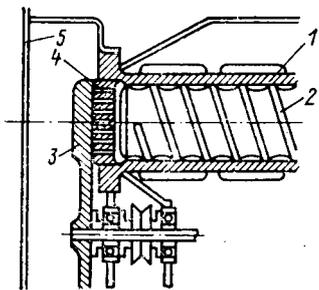


Рис. 4.6. Устройство для гранулирования полимеров с горячей резкой:

1 — цилиндр экструдера; 2 — шнек; 3 — нож; 4 — решетка гранулятора; 5 — кожух гранулятора.

течении расплава. Длина гранул обычно изменяется в зависимости от скорости вращения ножей и производительности экструдера. Для предварительного расчета длины гранул H_r можно использовать уравнение:

$$H_r \approx 2V/nmR^2\omega K_3^2 \quad (4.5)$$

где V — объемная производительность агрегата; n — число ножей; m — число отверстий в решетке; R — радиус отверстия решетки; ω — угловая скорость ножей.

При гранулировании маловязких полимеров (полиамид) экструдат вначале охлаждают, а затем с помощью тянущего устройства направляют в режущее устройство. Этот способ более энергоемок, так как резка жгутов в охлажденном состоянии требует дополнительной затраты энергии.

При использовании для смешения экструдеров операции смешения и гранулирования обычно совмещаются.

Термореактивные полимерные материалы гранулируют при комнатной температуре или при нагревании путем механического уплотнения. Для этого применяются зубчатые роторные грануляторы или рифленые вальцы. Пресс-порошок заполняет пазы и при сдавливании выступов второго вала уплотняется.

4.4. ТАБЛЕТИРОВАНИЕ

Таблетирование применяется для предварительного уплотнения термореактивных пресс-материалов и получения таблеток определенных размеров, конфигурации и массы. Применение таблетирования позволяет уменьшить потери пресс-материалов при транспортировке и во время загрузки в пресс-форму за счет уноса в цеховую вентиляцию. Таблетированные материалы быстрее нагреваются, снижаются потери теплоты в окружающую среду и облегчается дозирование навески при прессовании, так как исключается взвешивание на рабочих местах. Удельный объем таблеток меньше, чем у пресс-порошка, поэтому объем загрузочных камер пресс-форм уменьшается, снижается их вес и стоимость. Удаление воздуха из пресс-материала при таблетировании снижает выброс порошка при смыкании пресс-формы. Таблетированный пресс-материал нагревается равномерно, что облегчает формирование изделий и повышает их качество. Трудоемкость таблетирования низкая, поэтому общая себестоимость понижается в результате уменьшения расхода сырья и сокращения цикла прессования.

Уплотнение термореактивных пресс-порошков и придание им необходимой конфигурации производится на ротационных или гидравлических таблетавтоматах. Таблетуемый материал из гидракера засыпается в полость матрицы, где с помощью одного или двух штоков подвергается сжатию и выдержке под давлением в течение заданного времени. Под действием давления пресс-порошок превращается в уплотненное тело определенных размеров

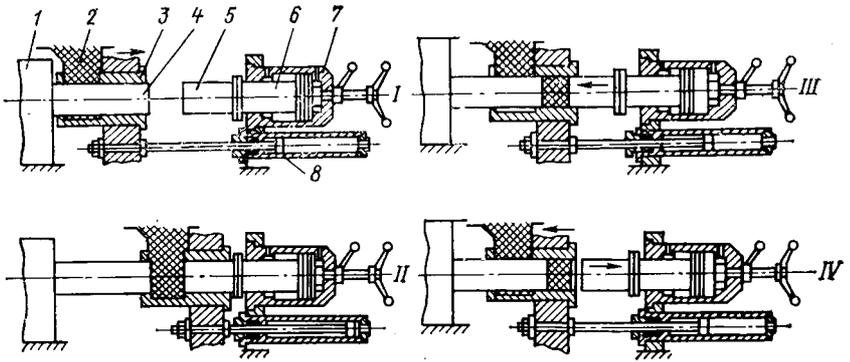


Рис. 4.7. Схема таблетирования на гидравлических таблетмашинах:

1 — подвижная плита; 2 — пресс-материал; 3 — матрица; 4 и 5 — штоки; 6 — поршень штока; 7 — цилиндр; 8 — поршень гидроцилиндра.

и конфигурации. Основным фактором, обеспечивающим образование прочной таблетки, являются силы электростатического притяжения. Кроме того, при очень высоких давлениях или при повышенной температуре возможно оплавление полимера, что способствует более прочному соединению частиц и почти полному удалению воздушных включений. Схема таблетирования на гидравлической машине приведена на рис. 4.7. Пресс-материал 2 из бункера заполняет полость, образованную матрицей 3, а также штоками 4 и 5 (позиция II). Затем матрица перемещается вдоль штока 5 поршнем 8 и под действием давления, создаваемого в цилиндре 7, происходит уплотнение материала (позиция III). После сжатия шток 5 отводится вправо, а штоком 4 таблетка выталкивается из матрицы (позиция IV).

Таблетки из пресс-материалов обычно изготавливаются цилиндрической формы или близкими к форме изделия. Уплотнение материала производится, как правило, при комнатной температуре и удельном давлении 70—120 МПа. Поскольку прочность таблеток, изготовленных при этом давлении, достаточно высока, использование больших давлений нецелесообразно, так как при этом возрастает износ машин и увеличиваются энергетические затраты. Если таблетирование осуществляют при повышенных температурах (80—100 °С), то удельное давление снижается.

Таблетирование волокнистых пресс-материалов обычно производят на гидравлических таблетавтоматах с подогревом матрицы или на шнековых агрегатах (рис. 4.8). Пресс-материал

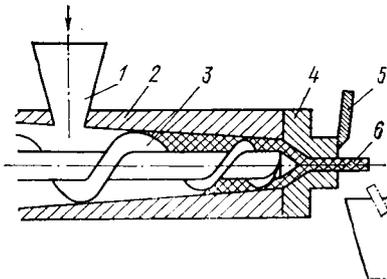
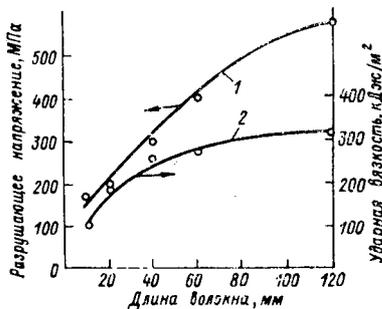


Рис. 4.8. Агрегат для жгутирования волокнистых пресс-материалов:

1 — бункер; 2 — цилиндр экструдера; 3 — шнек; 4 — насадка; 5 — нож; 6 — жгут пресс-материала; 7 — приемный бункер.

Рис. 4.9. Зависимость разрушающего напряжения при изгибе (1) и ударной вязкости (2) стеклопластика от длины волокна (лент).



подается из бункера 1 или специального загрузочного устройства в цилиндр машины 2 и вследствие вращения шнека 3 перемещается к формующей насадке 4. Так как цилиндр нагрет до 80—90 °С, происходит плавление связующего. Под действием давления, создаваемого шнеком, материал уплотняется и выдавливается через отверстие насадки в виде жгута 6, который при опускании ножа 5 разрезается на стержни определенной длины, ссыпающиеся в бункер 7. Недостатком данного метода является то, что после выхода жгута из формующей насадки он становится менее плотным вследствие частичного распрямления волокна. К тому же форма таблеток несколько нарушается при разрезании их ножом.

При шприцевании волокнистых пресс-материалов происходит разрушение армирующего волокна и прочность отпрессованных изделий значительно снижается. При этом, чем интенсивнее сдвиговые деформации, возникающие при шприцевании, тем меньше прочность. Установлено, что прочность изделий зависит от длины волокна. Так, при длине волокна 20 мм прочность стеклопластика почти в 3 раза (рис. 4.9) ниже, чем при длине волокна 120 мм. Поэтому при изготовлении крупногабаритных изделий повышенной прочности волокнистые материалы, как правило, не измельчают и не шприцуют. В последнее время уплотнение материала и подогрев совмещают с прессованием. Нагретый и уплотненный в в шнековом пластикаторе материал загружается непосредственно в пресс-форму. Это исключает ряд подготовительных операций и повышает качество изделий.

4.5. МЕТОДЫ НАГРЕВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вакуум- и пневмоформование, ориентация листов и пленок, сварка, а также прессование термореактивных материалов осуществляются при высоких температурах. Поэтому процесс нагревания в технологии переработки пластмасс играет важную роль. В зависимости от скорости нагревания изменяется производительность агрегатов, а равномерность нагревания влияет на качество изделий. Например, при формовании неравномерно нагретых листов создается неоднородная степень ориентации макромолекул и в изделии возникают остаточные напряжения, которые со временем могут вызвать образование микротрещин и разрушение изделия.

При прессовании реактопластов, когда в пресс-форму загружается холодный материал, затрудняется процесс отверждения.

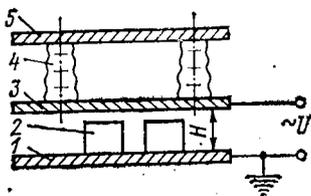


Рис. 4.10. Нагревательная камера высокочастотной установки:

1 — нижняя пластина; 2 — таблетка материала; 3 — верхняя пластина; 4 — изолятор; 5 — корпус.

Вследствие плохой теплопроводности нагревание материала в пресс-форме происходит преимущественно с поверхности, поэтому после смыкания пресс-формы необходима выдержка для выравнивания температуры по толщине слоя материала. Кроме того, предварительное нагревание улучшает внешний вид и качество изделий, так как из материалов более полно удаляется влага и легколетучие соединения, а отверждение подогретого материала происходит равномерно по всему объему. При этом сокращается число подпрессовок и уменьшается время выдержки при отверждении. При обеспечении равномерного нагревания улучшается текучесть пресс-материалов, поэтому прессование осуществляется при более низком удельном давлении.

Предварительное нагревание полимеров можно производить в сушильных шкафах, в высокочастотных установках и с помощью инфракрасных нагревателей. Нагревание в сушильных шкафах происходит за счет конвективной теплопередачи от нагретого воздуха, поэтому процесс длителен и не обеспечивает равномерности температуры. Применяется нагревание в сушильных шкафах для полимерных материалов с высокими диэлектрическими характеристиками, когда невозможно использовать высокочастотный нагрев. В сушильных шкафах целесообразно также нагревать прозрачные листы, для которых инфракрасный нагрев неэффективен.

При высокочастотном нагреве материал помещают в электрическое поле, которое создается между двумя обкладками (пластинами) конденсатора (рис. 4.10). Пластина 3 закрепляется на корпусе 5 с помощью высоковольтных изоляторов 4 и к ней подводится ток напряжением 8—10 кВ и частотой 40 и 80 МГц. Нагреваемый материал преимущественно в виде таблеток 2 помещается на заземленную пластину 1, расположенную на расстоянии H от пластины 3. При подключении пластин к генератору высокой частоты между ними создается электрическое поле с напряженностью:

$$|\vec{E}| = U/H \quad (4.6)$$

где U — подводимое напряжение, В; H — расстояние между пластинами, м.

Способность материалов к высокочастотному нагреванию зависит от их строения. Полимеры, имеющие неполярное строение (полиэтилен, фторопласт, полистирол), практически в высокочастотном электрическом поле не нагреваются. Поэтому они используются как высокочастотные изоляторы. Полимеры, имеющие полярное строение (поливинилхлорид, фенолоформальдегидные полимеры и др.), очень быстро могут нагреваться с помощью электрического поля высокой частоты. Способность полимеров к высокочастотному нагреванию можно определить по значению фактора

диэлектрических потерь, который равен произведению $\epsilon \operatorname{tg} \delta$. Чем больше это произведение, тем больше электрической энергии переходит в тепловую.

Минеральные наполнители (стекловолокно, асбест) нагреваются в электрическом поле в результате ионной поляризации.

Объемная плотность теплового потока q_V (в Вт/м³) при нагревании материалов зависит от частоты тока, напряженности электрического поля и свойств материала:

$$q_V = 2\pi f \epsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2 \quad (4.7)$$

где f — частота тока, Гц; ϵ_r — относительная диэлектрическая постоянная материала; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; E — напряженность электрического поля, В/м; ϵ — диэлектрическая проницаемость вакуумного пространства $\epsilon = 8,85$ пФ/м.

Как видно из уравнения, наиболее сильно на нагревание влияет напряженность электрического поля. Однако увеличение напряженности может привести к пробое материала. Поэтому напряженность не должна превышать электрической прочности материала. В современных генераторах обычно напряжение в колебательном контуре составляет 8—10 кВ, а напряженность можно изменять, меняя расстояние между электродами (пластинами).

Объемная плотность теплового потока q_V (в Вт/м³) с учетом потерь теплоты в окружающую среду может быть выражена следующим образом:

$$q_V = c\rho (T_H - T_0)/t_H \eta_T \quad (4.8)$$

где c и ρ — удельная теплоемкость и плотность материала; T_H — температура материала после нагревания; T_0 — начальная температура материала; t_H — время нагревания материала; η_T — коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Из уравнений (4.6)—(4.8) с учетом коэффициента K_E находим время нагревания t_H (в с):

$$t_H = \frac{18\rho c_p (T_H - T_0) H_{II}^2 \cdot 10^9}{K_E^2 f \epsilon_r \operatorname{tg} \delta \eta_T U^2} \quad (4.9)$$

где H_{II} — толщина слоя полимера (пластины, таблетки); K_E — коэффициент, учитывающий влияние на напряженность электрического поля воздушного зазора между полимером и электродом.

Для расчета K_E можно использовать уравнение:

$$K_E = 1 - a \frac{\delta_B}{H_{II}} \sqrt{\epsilon_r} \exp\left(-\xi \frac{\delta_B}{H_{II}}\right) \quad (4.10)$$

где δ_B — воздушный зазор между электродом и таблеткой; a и ξ — постоянные; для фенольных пресс-материалов $a \approx 1,25$, $\xi \approx 2,23$.

При расчете времени необходимо учитывать, что ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ зависят от температуры и частоты переменного электрического поля.

При использовании высокочастотных установок достаточной мощности время нагревания термореактивных полимерных материалов обычно составляет 20—30 с, а температура материала после нагревания 120—130 °С. Несмотря на значительные тепловые потери ($\eta_T \approx 0,4$ —0,5), применение высокочастотного нагре-

вания экономически выгодно, так как время отверждения реактопластов уменьшается примерно на 20—30 %. Одновременно с этим сокращается число подпрессовок, а следовательно, уменьшается износ пресс-форм и гидравлического пресса.

Для предварительного нагревания пресс-материалов на основе фенолоформальдегидных полимеров, наполненных древесной мукой, применяют установки с частотой колебательного контура 40 МГц, а при введении кварца и слюды — 80 МГц. Листовые материалы из термопластов подвергают высокочастотному нагреванию при сварке или перед формованием

Для нагревания полимеров с высокими диэлектрическими характеристиками, таких, как полиэтилен, полистирол, фторопласт, используют инфракрасные лучи (лучистый теплообмен). Инфракрасные излучатели в виде ламп, трубчатых элементов или нихромовых спиралей при нагревании их до высоких температур излучают электромагнитные волны. Встречая на своем пути непрозрачные предметы, эти волны поглощаются и лучистая энергия переходит в тепловую. Интенсивность излучения зависит главным образом от температуры излучателя, а количество поглощенной энергии — от степени черноты нагреваемого тела, а также от расстояния до излучателя.

Инфракрасный нагрев неэффективен при нагревании прозрачных тел (органическое стекло, полиэтилентерефталат), так как большая часть лучистой энергии рассеивается в окружающей среде. Поэтому для их нагревания применяют конвективный теплообмен (обдув горячим воздухом или нагревание в сушильных шкафах).

При инфракрасном нагревании, если поглощательная способность и степень черноты излучателя и полимера примерно равны, количество теплоты, передаваемой через единицу площади, g равно:

$$g = \sigma F_s (T_H^4 - T_{II}^4) \quad (4.11)$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана; T_H , T_{II} — температура нагревателя и полимера; F_s — коэффициент лучеиспускания.

$$F_s = \epsilon_H \epsilon_{II} / (\epsilon_H + \epsilon_{II} - \epsilon_H \epsilon_{II}) \quad (4.12)$$

где ϵ_H и ϵ_{II} — коэффициенты поглощения лучистой энергии полимера и нагревателя.

При нагревании непрозрачных полимеров, когда вся лучистая энергия на его поверхности переходит в тепловую, можем найти распределение температуры по толщине слоя. Если полимер имеет форму пластины, тогда условия теплопередачи можно описать уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.13)$$

где t — время нагревания; y — координата по толщине пластины (толщина пластины равна δ); a — коэффициент температуропроводности, $a = \lambda/\rho c$; λ — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность материала; c — теплоемкость материала.

Считаем, что тепловые потери от конвекции малы, а теплофизические характеристики не зависят от температуры. Решение выполняем при граничных условиях: начальная температура полимера равна T_0 , а градиенты температур на нагреваемой и противоположной поверхности при одностороннем нагревании равны:

$$\frac{dT}{dy} = 0 \text{ при } y = 0 \text{ и } \frac{dT}{dy} = \frac{g}{\lambda} \text{ при } y = \delta$$

где g — плотность теплового потока.

Решая уравнение (4.13) при рассмотренных условиях, находим:

$$T - T_0 = \frac{g\delta}{\lambda} \left[\frac{at}{\delta^2} + \left(\frac{3y^2 - \delta^2}{6\delta^2} \right) - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-n^2\pi^2 \frac{at}{\delta^2}\right) \cos \frac{n\pi y}{\delta} \right] \quad (4.14)$$

где n — число членов уравнения, принимаемое при решении.

Используя данное уравнение, можно определить температуру при любом значении y . В случае двухстороннего нагревания в качестве исходной величины берется половина толщины пластины.

Широкое применение в технологии переработки пластмасс находит нагревание за счет теплопроводности. Теплопроводность в нестационарном режиме происходит при нагревании полимера в цилиндре экструдера или литьевой машины, а также при охлаждении труб, пленок или отформованных изделий.

Рассмотрим теплопроводность в нестационарном режиме для бесконечной пластины, когда ее ширина и длина значительно больше толщины.

Для одномерного теплового потока без внутреннего источника теплоты (теплота кристаллизации или химической реакции отверждения) уравнение теплопроводности сводится к виду (4.13). При одностороннем нагревании пластины толщиной δ в качестве граничных условий принимаем условие первого рода: температура полимера на поверхности контакта равна температуре нагревающего тела T_c и сохраняется во времени постоянной (при $y = \delta$, $T = T_c$). Решение дифференциального уравнения (4.13) получаем в виде произведения двух функций, из которых одна является функцией только t , а другая — только y :

$$T = T(t, y) = \varphi(t) \psi(y) \quad (4.15)$$

После подстановки последнего выражения в уравнение (4.13) получим:

$$\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} \psi(y) = a \frac{\partial^2 \psi(y)}{\partial y^2} \varphi(t) \text{ или } \varphi'(t) \psi(y) = a \psi''(y) \varphi(t)$$

Переменные данного уравнения легко разделяются и его можно записать следующим образом:

$$\varphi'(t)/a\varphi(t) = \psi''(y)/\psi(y) = -\varepsilon^2 \quad (4.16)$$

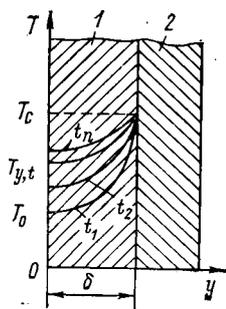


Рис. 4.11. Изменение температуры по толщине пластины при нагревании в условиях нестационарной теплопередачи: 1 — полимер; 2 — нагретое тело.

Так как полученное равенство должно иметь решение при любых значениях y и t , то обе его части должны быть равны одной и той же постоянной величине, например ε^2 . Для тепловых процессов, стремящихся к тепловому равновесию, постоянная величина должна иметь отрицательное значение, тогда из (4.16) получаем:

$$\varphi'(t) + a\varepsilon^2\varphi(t) = 0 \quad (4.17)$$

$$\psi''(y) + \varepsilon^2\psi(y) = 0 \quad (4.18)$$

Решая полученные уравнения при граничных условиях $y = \delta$, $T = T_c$; $y = 0$, $dT/dy = 0$, после преобразований находим:

$$\frac{T_c - T_{y,t}}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu} (-1)^{n+1} \cos \mu \frac{y}{\delta} \exp(-\mu^2 Fo) \quad (4.19)$$

где $\mu = (2n - 1)\pi/2$; Fo — критерий Фурье, $Fo = at/\delta^2$.

Из анализа уравнения (4.19) следует, что температура по толщине пластины изменяется так, как показано на рис. 4.11. В начальный момент времени температура полимера равна T_0 , а при контакте с нагревающей поверхностью температура на границе раздела становится равной T_c . С увеличением времени нагревания от t_1 до t_n температура $T_{y,t}$ внутри слоя полимера повышается, а на границе раздела остается постоянной. Однако это в идеальном случае, а в реальных условиях температура на границе раздела несколько отличается от T_c и зависит от теплофизических характеристик полимера и нагретого тела.

Средняя температура по толщине пластины для рассматриваемого случая равна:

$$\bar{T}_t = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T(y, t) dy$$

Используя уравнение (4.19), получаем:

$$\bar{T}_t = T_c - (T_c - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu^2} \exp(-\mu^2 Fo) \quad (4.20)$$

Аналогичным образом решаются уравнения в неизотермическом режиме теплопередачи при протекании в полимере тепловых процессов, например при кристаллизации или отверждении термоактивных материалов. Однако в этом случае исходное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Q}{\rho c_p} \quad (4.21)$$

где Q — теплота кристаллизации или отверждения, отнесенная к единице объема полимера.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

Процесс экструзии заключается в непрерывном выдавливании расплава полимера через формующую головку, придании ему необходимой конфигурации и последующем охлаждении изделия. Течение расплава через формующие головки происходит под действием давления, которое создается шнековым или дисковым экструдером. Экструдер (экструзионная машина) должен обеспечивать передвижение полимера вдоль цилиндра, его плавление и гомогенизацию, а также создание в цилиндре машины гидростатического давления. Методом экструзии изготавливаются трубы, пленки, профили, сетки в основном из термопластичных полимеров — полиэтилена, полистирола, поликарбоната, поливинилхлорида и др. Поскольку процесс экструзии осуществляется непрерывно, он является наиболее прогрессивным, так как позволяет производить изделия с небольшими трудовыми и энергетическими затратами при незначительных потерях материалов.

При изготовлении изделий методом экструзии в полимерах протекают в основном физические процессы, например, переход из одного физического или фазового состояния в другое. К химическим процессам, протекающим при экструзии, можно отнести термическую и механическую деструкцию полимеров, обусловленную соответственно высокими температурами и большими сдвиговыми напряжениями, возникающими при течении расплава полимера в рабочих узлах экструдера и формующей головке. При обеспечении определенных технологических параметров эти химические процессы могут быть сведены к минимуму или полностью исключены.

В зависимости от характера процессов, протекающих в экструдере, а также от физического состояния полимера внутри цилиндра в шнековых (червячных) экструзионных машинах обычно выделяют три рабочие зоны: загрузки, плавления и дозирования. Такое разделение носит несколько условный характер, поскольку отсутствуют четкие границы раздела; например, плавление полимера начинается в зоне загрузки, а заканчивается в зоне дозирования. Тем не менее в существующих конструкциях машин имеется геометрическое разделение на зоны, обусловленное размерами шнека. Истинную границу зон в зависимости от состояния полимера можно установить экспериментально или математическими расчетами с учетом конкретных условий работы агрегата.

За зону загрузки обычно принимают длину шнека от загрузочного отверстия до места появления слоя расплава на поверхности цилиндра или шнека. Зона плавления — это участок шнека от начала плавления до полного расплавления слоя гранул или неполного плавления, но разрушения оставшегося твердого слоя гранул на части, распределения их в расплаве и перехода на движение

в результате вязкого течения. В зоне дозирования происходит окончательное плавление оставшихся частиц, выравнивание температуры расплава полимера по сечению и его гомогенизация, т. е. тщательное перемешивание расплава и придание ему однородных свойств за счет сдвиговых деформаций вязкого течения в каналах шнека.

При использовании дисковых экструдеров полимер в виде гранул или порошка поступает в зазор между вращающимся и неподвижным дисками и плавится, благодаря выделению теплоты трения. Поскольку расплав полимера является вязкоупругой жидкостью, то при вращении диска в расплаве возникают нормальные напряжения и создается давление, под действием которого происходит выдавливание полимера через формирующую головку.

5.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЛИМЕРА В ШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ

5.1.1. Движение полимера в зоне загрузки

В зону питания полимер поступает из бункера машины в виде порошка, гранул или ленты, захватывается нарезкой шнека и перемещается вдоль цилиндра. Движение полимера, находящегося в твердом состоянии, обусловлено разностью крутящих моментов, возникающих от сил трения между поверхностью шнека и полимером и поверхностью цилиндра и полимером. При этом для перемещения полимера необходимо, чтобы крутящий момент от действия силы трения на поверхности цилиндра был больше, чем на поверхности шнека. Это условие обеспечивается, например, изменением температуры цилиндра или шнека в результате чего меняются коэффициенты трения. Как видно из рис. 5.1, вначале с ростом температуры коэффициент трения повышается, а выше температуры плавления полимера понижается, что можно объяснить появлением пристенного вязкого течения расплава и уменьшением сил трения. Поэтому для достижения максимальной разности крутящих моментов сил трения температура поверхности цилиндра должна быть близкой к температуре плавления полимера, а температура шнека $T_{ш}$ на 30—40 °С ниже температуры поверхности цилиндра $T_{ц}$. Для этого цилиндр нагревается, а внутрь шнека подается охлаждающая вода.

При правильно выбранном технологическом режиме стенки цилиндра задерживают вращение гранул полимера, которые шнеком перемещаются вдоль оси. По мере продвижения под действием возникающего давления гранулы уплотняются и перемещаются в виде твердого слоя (винтовой пробки) без пересыпания в канале шнека. Поскольку твердый слой частично проскальзывает относительно поверхности цилиндра и шнека, то движение его происходит по винтовой линии относительно оси вращения.

Казалось бы, что чем сильнее охлажден шнек, тем ниже коэффициент трения полимера на его поверхности, тем выше разность

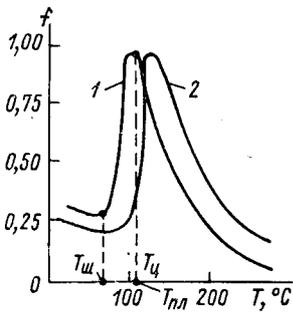


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента трения f полиэтилена низкой (1) и высокой (2) плотности от температуры поверхности.

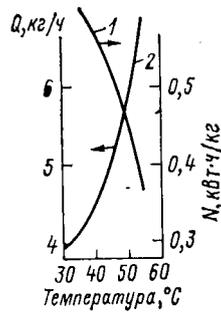


Рис. 5.2. Зависимость удельной мощности N (1) и производительности Q (2) экструдера от температуры воды, выходящей из шнека.

крутящих моментов и тем лучше происходит движение полимера. Однако при очень сильном охлаждении шнека замедляется процесс плавления и гомогенизации полимера в последующих зонах, а это вызывает снижение производительности и повышение удельной мощности (рис. 5.2).

Для нахождения оптимальной температуры шнека и цилиндра при расчетах необходимо учитывать как изменение коэффициентов трения, так и скорость плавления гранул. На значения коэффициентов трения влияет также чистота обработки поверхности шнека и цилиндра. Для того чтобы уменьшить силы трения между полимером и шнеком, поверхность последнего полируют до достижения десятого или двенадцатого класса чистоты обработки, а поверхность внутри цилиндра должна иметь восьмой класс чистоты. В некоторых случаях для увеличения сил трения между полимером и цилиндром на внутренней поверхности цилиндра делают продольные или винтовые канавки. Это способствует увеличению производительности машины и улучшает стабильность ее работы.

Рассмотрим закономерность движения полимера в зоне загрузки экструдера с радиусами цилиндра R_3 и шнека R_1 . Шнек имеет однозаходную нарезку с шагом винтовой линии t и углом подъема φ (рис. 5.3). При вращении шнека и трении полимера о его поверх-

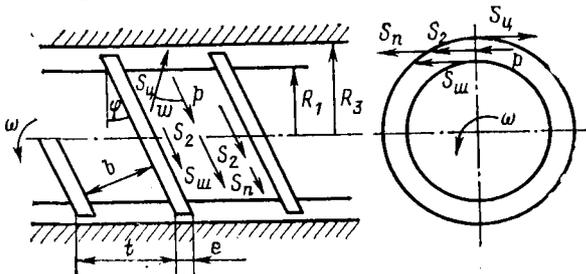


Рис. 5.3. Схема расположения векторов сил трения в винтовом канале шнека.

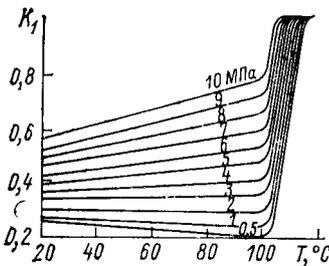


Рис. 5.4. Зависимость коэффициента передачи давления на боковую поверхность канала для гранулированного полиэтилена низкой плотности от температуры и давления.

ность на внутренней цилиндрической поверхности шнека длиной $R_1 d\theta$ возникает сила трения $S_{ш}$:

$$S_{ш} = K_1 \rho_l f_{ш} b R_1 d\theta$$

где ρ_l — гидростатическое давление; K_1 — коэффициент передачи давления на цилиндрическую поверхность шнека; $f_{ш}$ — коэффициент трения полимера о поверхность шнека; b — ширина канала шнека, $b = (t - e) \cos \varphi$; e — ширина выступа нарезки шнека; θ — угол поворота вокруг оси шнека.

Сила трения на поверхности шнека создает изменение крутящего момента на величину $dM_{ш}$:

$$dM_{ш} = S_1 R_1 = K_1 \rho_l f_{ш} b R_1^2 d\theta \quad (5.1)$$

От трения на поверхности цилиндра возникает сила $S_{ц}$, которая вызывает изменение крутящего момента на величину $dM_{ц}$:

$$dM_{ц} = K_1 \rho_l f_{ц} b R_3^2 \cos \omega d\theta \quad (5.2)$$

где $f_{ц}$ — коэффициент трения полимера о поверхность цилиндра; ω — угол между вектором скорости движения гранул и осью винтового канала шнека.

На боковых гранях нарезки шнека на полимер действует крутящий момент, образующийся от сил трения S_2 и S_n , возникающих соответственно от действия давления ρ_l и нормальной составляющей силы $S_{ц}$:

$$S_n = f_{ш} S_{ц} \sin \omega \quad (5.3)$$

Крутящий момент от действия этих сил равен:

$$dM_h = 2K_2 \rho_l f_{ш} R_{ср}^2 h_3 d\theta + K_1 f_{ц} \rho_l f_{ш} b R_{ср} R_3 \sin \omega d\theta \quad (5.4)$$

где $R_{ср}$ — средний радиус выступов нарезки шнека; K_2 — коэффициент передачи давления на выступ нарезки шнека, $K_1 \approx 2K_2$; h_3 — глубина канала шнека в зоне загрузки.

Коэффициент передачи давления на боковую поверхность шнека в значительной степени зависит от температуры и давления (рис. 5.4). Давление в канале шнека p образуется за счет разности крутящих моментов всех сил трения и может быть найдено из уравнения равновесия:

$$d p b h_3 R_{ср} \cos \varphi = dM_{ц} - dM_{ш} - dM_h \quad (5.5)$$

Установлено, что благодаря внутреннему трению гранул друг о друга и упругой деформации полимера прирост давления по длине канала замедляется. При этом падение давления ρ_l является функцией длины канала:

$$\rho_l = p \exp \left(-f_l \frac{\psi (b + h_3) l}{b h_3 \sin \varphi} \right) \quad (5.6)$$

где f_l — среднее значение коэффициента трения $f = f_{ц} f_{ш} / (f_{ц} + f_{ш})$; ψ — коэффициент, учитывающий внутреннее трение гранул; l — длина шнека вдоль оси цилиндра.

Для удобства расчетов значения Θ целесообразно заменить длиной шнека:

$$d\Theta = dl/R_3 \operatorname{tg} \varphi \quad (5.7)$$

Подставив в уравнение (5.5) значения крутящих моментов из уравнений (5.1)—(5.3) с учетом (5.6) и (5.7), находим

$$\frac{dp}{p} = \left[\frac{K_1 f_{II} (R_3 \cos \omega - f_{III} R_{CP} \sin \omega)}{h_3 R_{CP}} - \frac{f_{III} K_1 R_1^2}{h_3 R_{CP} R_3} - \frac{2K_2 f_{III} R_{CP}}{b R_3} \right] \times \\ \times \frac{dl}{\sin \varphi \exp(Ul)} \quad (5.8)$$

где

$$U = \psi f_i (b + h)/bh_3 \sin \varphi \quad (5.9)$$

Проинтегрировав уравнение (5.8), получаем:

$$\ln p = A \int e^{-Ul} dl = -\frac{A}{U} e^{-Ul} + C_1 \quad (5.10)$$

где

$$A = \left[\frac{K_1 f_{II} (R_3 \cos \omega - f_{III} R_{CP} \sin \omega)}{h_3 R_{CP}} - \frac{f_{III} K_1 R_1^2}{h_3 R_{CP} R_3} - \frac{2K_2 f_{III} R_{CP}}{b R_3} \right] \frac{1}{\sin \varphi}$$

Для определения постоянной интегрирования используем граничные условия: при $l = 0$, $p = p_0$ (p_0 — давление на входе в зону загрузки).

При свободной загрузке полимера давление на входе равно атмосферному. Подставив вместо $C_1 = \ln p_0 + A/U$, находим расчетное давление, создаваемое шнеком длиной l :

$$p = p_0 \left\{ e^{\frac{A}{U} [1 - \exp(-Ul)]} - 1 \right\} \quad (5.11)$$

При движении полимера вследствие диссипации теплоты трения происходит местное тепловыделение и разогрев полимера по поверхностям скольжения. Поскольку коэффициент трения очень сильно зависит от температуры, расчет давления проводят с учетом поверхностного нагревания полимера, а значение коэффициента трения определяют с учетом максимальной температуры, возникающей на поверхности скольжения. Для нахождения максимальной температуры полимера на поверхности при сухом трении T_{\max} можно воспользоваться уравнением Мамхегова и Гинзбурга:

$$T_{\max} = \frac{2q_{II} \sqrt{L}}{\sqrt{\pi v \lambda_{II} \rho_{II} c_{II}}} + T_0 \quad (5.12)$$

где T_0 — температура шнека или цилиндра; q_{II} — плотность теплового потока, передаваемого в слой полимера; L — путь движения слоя гранул; λ_{II} , ρ_{II} и c_{II} — коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость гранул полимера; v — скорость движения гранул относительно поверхности шнека или цилиндра.

Плотность теплового потока, передаваемого в слой полимера, зависит от общего теплового потока трения, теплофизических свойств полимера и материала поверхности трения (цилиндра и шнека):

$$q_{II} = (1 - \alpha) q_{TP}$$

где $q_{тр}$ — плотность теплового потока трения; $(1 - \alpha)$ — коэффициент, учитывающий распределение теплового потока на границе раздела

$$1 - \alpha = \sqrt{\lambda_{ц\rho_{ц}c_{ц}}}/(\sqrt{\lambda_{2\rho_{2}c_{2}} + \sqrt{\lambda_{ц\rho_{ц}c_{ц}}}) \quad (5.13)$$

где λ_2 , ρ_2 , c_2 — коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала цилиндра или шнека.

Плотность теплового потока, возникающего при трении, равна:

$$q_{тр} = p'v \quad (5.14)$$

При этом для расчета плотности теплового потока трения, выделяющегося на поверхности шнека, используется скорость перемещения полимера относительно шнека $v_{ш}$, а на поверхности цилиндра — скорость v_m [см. уравнения (5.19) и (5.20)].

Таким образом, давление, создаваемое внутри канала шнека, зависит главным образом от таких технологических параметров, как температура и скорость вращения шнека, а также от чистоты обработки поверхности шнека и цилиндра.

Поскольку по длине шнека температура и коэффициент трения постоянно изменяются, расчет давления необходимо осуществлять последовательным лимитированием его по участкам шнека. Поэтому уравнение (5.11) видоизменяется

$$p_{i+1} = p_i e^{\frac{A}{U} [1 - \exp(-U l_i)]} \quad (5.15)$$

где p_i — давление, найденное для предыдущего участка; l_i — длина расчетного участка шнека, обычно принимают $l_i = t/2$.

Рассмотренные закономерности движения полимера в экструдере справедливы для цилиндров с гладкой внутренней поверхностью. При наличии продольных или винтовых канавок (рифлений) расчет проводится с использованием видоизмененной теории винтового дожкрата. В данном случае максимальное давление, развиваемое в зоне загрузки, будет определяться внутренним трением между слоями гранул. При достижении критического значения давления происходит проскальзывание слоев гранул относительно друг друга или по поверхности цилиндра и соответственно снижение производительности зоны загрузки до значения, лимитированного работой зоны дозирования.

Производительность экструдера для зоны загрузки может быть найдена с учетом скорости движения полимера относительно цилиндра и площади сечения винтового канала.

Как уже было указано ранее, по мере движения гранул или порошка под действием давления происходит уплотнение материала, и уже во втором витке шнека он движется в виде твердого слоя. Таким образом обеспечивается движение гранул по винтовой линии относительно оси цилиндра со скоростью v_m , направленной к оси канала под углом ω (рис. 5.5). При вращении с угловой ско-

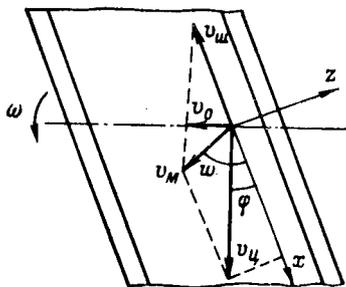
Рис. 5.5. Векторная диаграмма скоростей в зоне загрузки.

ростью ω шнек перемещается относительно цилиндра с окружной скоростью равной:

$$v_{\text{ц}} = \omega R_{\text{ср}} \quad (5.16)$$

При этом гранулы проскальзывают по винтовой нарезке шнека со скоростью $v_{\text{ш}}$, поэтому движение гранул по окружности можно описать через геометрическую сумму двух векторов:

$$\bar{v}_{\text{м}} = \bar{v}_{\text{ц}} + \bar{v}_{\text{ш}} \quad (5.17)$$



Как видно из рис. 5.5, если $v_{\text{ш}} = 0$, то полимер вращается вместе со шнеком и поступательное движение его вдоль оси отсутствует. При отсутствии вращательного движения полимера относительно цилиндра, например при наличии продольных канавок на цилиндре, вектор скорости движения гранул направлен вдоль оси, т. е. $\omega = 90 + \varphi$; при этом достигается максимальная производительность.

Поскольку векторы скоростей $v_{\text{м}}$ и $v_{\text{ц}}$ вписываются в один параллелограмм, приравняв проекции их на ось z , получаем:

$$v_{\text{м}} = v_{\text{ц}} \sin \varphi / \sin \omega \quad (5.18)$$

В этом случае, используя выражение (5.16), имеем

$$v_{\text{м}} = \omega R_{\text{ср}} \sin \varphi / \sin \omega \quad (5.19)$$

Скорость движения полимера относительно поверхности шнека равна:

$$v_{\text{ш}} = \omega R_1 \cos \varphi - v_{\text{м}} \cos \omega \quad (5.20)$$

Для расчета производительности используем скорость v_0 , направленную по оси цилиндра:

$$v_0 = \omega R_{\text{ср}} (1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \omega) \sin \varphi \cos \varphi \quad (5.21)$$

Производительность экструдера в зоне загрузки равна произведению площади сечения канала шнека, скорости v_0 и насыпной плотности гранулированного полимера $\rho_{\text{н}}$:

$$Q_3 = \rho_{\text{н}} v_0 \int_{R_1}^{R_3} (2\pi r - e/\operatorname{tg} \varphi) dr \quad (5.22)$$

где e — ширина выступа нарезки шнека.

Подставляя значение v_0 из (5.21) и интегрируя, получаем:

$$Q_3 = \rho_{\text{н}} [\pi (R_3^2 - R_1^2) - eh_3/\operatorname{tg} \varphi] \omega R_{\text{ср}} (1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \omega) \sin \varphi \cos \varphi \quad (5.23)$$

В уравнения (5.10) и (5.23) входит угол ω , который зависит как от условий экструзии, так и от насыпной плотности полимера. С учетом одинаковой массовой производительности экструдера

в зонах дозирования Q_d и загрузки Q_3 , используя уравнение (5.23), находим:

$$\omega = \operatorname{arccctg} \left\{ \left[1 - \frac{V_{д\text{ор}}}{\rho_n \omega R_{ср} \left[\pi (R_3^2 - R_1^2) - \frac{ch_3}{\operatorname{tg} \varphi} \right] \sin \varphi \cos \varphi} \right] \operatorname{ctg} \varphi \right\} \quad (5.24)$$

где V_d — объемный расход в зоне дозирования; ρ_p — плотность расплава полимера.

Как видно из полученных уравнений, производительность экструдера и создаваемое давление в значительной степени зависят от насыпной плотности гранулированного или порошкообразного полимера, которая в свою очередь является функцией давления и температуры (рис. 5.6). С увеличением температуры прочность и модуль упругости полимера снижаются, что позволяет уплотнить гранулы и достигнуть высокой плотности. Например, когда давление достигает в конце зоны загрузки 8—10 МПа, гранулы полиэтилена уплотняются почти полностью, что значительно изменяет пористость и теплопроводность движущегося твердого слоя.

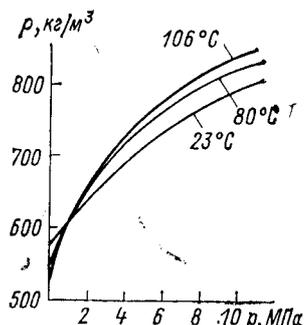
Зависимость насыпной плотности от температуры и давления можно описать уравнением в виде полинома:

$$\rho_n = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i T + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} T p + \sum_{i=1}^m c_i p^2 \quad (5.25)$$

Поскольку полимер при движении нагревается от стенок цилиндра и шнека, в качестве расчетной температуры можно использовать среднее интегральное ее значение по глубине канала, определяемое нестационарной теплопроводностью:

$$T(t) = T_{\max} - \left[(T_{\max} - T_0) \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{\pi^2 a t}{h_2^2} \right) \right] \quad (5.26)$$

где a — температуропроводность слоя гранул; T_0 — начальная температура слоя гранул; T_{\max} — максимальная температура на поверхности трения [см. уравнение (5.12)]; t — время движения полимера от зоны загрузки до расчетной точки.



$$t = l_i / \omega R_{ср} (1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \omega) \sin \varphi \cos \varphi \quad (5.27)$$

При расчете температуры необходимо учитывать также изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от степени пористости слоя полимера. При наличии между гранулами воздушных включений для расчета коэффициента

Рис. 5.6. Зависимость насыпной плотности гранулированного полиэтилена высокой плотности от давления при различных температурах.

теплопроводности слоя гранул λ_{Γ} можно воспользоваться уравнением Гамильтона и Гроссера:

$$\lambda_{\Gamma} = \lambda_{\Pi} \frac{\lambda_{\text{В}} + (K_{\Gamma} - 1) \lambda_{\Pi} - (K_{\Gamma} - 1) \varepsilon_{\Gamma} (\lambda_{\Pi} - \lambda_{\text{В}})}{\lambda_{\text{В}} + (K_{\Gamma} - 1) \lambda_{\Pi} + \varepsilon_{\Gamma} (\lambda_{\Pi} - \lambda_{\text{В}})} \quad (5.28)$$

где λ_{Π} и $\lambda_{\text{В}}$ — коэффициент теплопроводности полимера и воздуха соответственно; K_{Γ} — коэффициент, учитывающий форму гранул, $K_{\Gamma} = 3F_{\Gamma}/F_{\text{С}}$ (F_{Γ} — площадь поверхности гранулы; $F_{\text{С}}$ — площадь поверхности сферы, объем которой равен объему гранулы); ε_{Γ} — пористость слоя гранул, $\varepsilon_{\Gamma} = 1 - \rho_{\text{н}}/\rho_{\Pi}$.

Пористость изменяется в зависимости от давления и температуры:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_0 \exp(-Cp) \quad (5.29)$$

где ε_0 — пористость при атмосферном давлении; C — коэффициент, зависящий от температуры.

Если пренебречь теплопроводностью воздуха, то коэффициент теплопроводности слоя гранул полимера может быть найден по приближенной формуле:

$$\lambda_{\Gamma} = 2\lambda_{\Pi}\rho_{\text{н}}/(3\rho_{\Pi} - \rho_{\text{н}}) \quad (5.30)$$

Из анализа полученных уравнений видно, что создаваемое давление и производительность экструдера в зоне загрузки в значительной степени зависят от ряда факторов, в первую очередь от температуры цилиндра и шнека, коэффициента трения и скорости вращения шнека, а также от теплофизических характеристик полимера. При колебании этих величин изменяется производительность экструдера, что приводит к изменению размеров изделий (толщины труб или пленок). Для повышения стабильности работы экструдера необходимо обеспечить постоянство коэффициентов трения полимера о поверхность цилиндра и шнека, а также ликвидировать зависимость их от технологических параметров процесса. Наиболее надежный способ создания указанных условий — применение цилиндров, на внутренней поверхности которых имеются винтовые или продольные канавки. Винтовые канавки наносят с углом подъема винтовой линии, совпадающим с вектором скорости $v_{\text{м}}$, т. е. конструктивно обеспечивают строгую винтовую траекторию движения полимера. Угол нарезки канавок должен быть равен:

$$\alpha = \omega - \varphi \quad (5.31)$$

Для достижения лучшего сцепления гранул с поверхностью цилиндра и обеспечения заданного угла движения гранул канавки нарезают многозаходными. Профиль канавки делают прямоугольным, трапециевидальным или в виде полуцилиндра с таким расчетом, чтобы в него входила половина гранулы полимера. Глубина канавки по ходу движения гранул обычно уменьшается, и на расстоянии $l = 4 \div 5D$ от бункера поверхность цилиндра становится гладкой.

Как правило, экструзионные машины с винтовыми канавками на поверхности цилиндра характеризуются высокой производительностью и малым колебанием ее в зависимости от различных

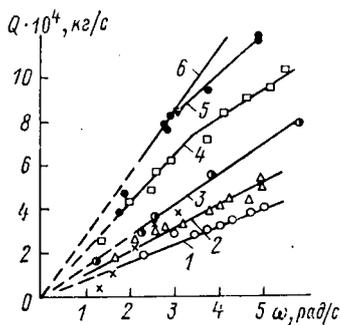


Рис. 5.7. Зависимость производительности экструдера от угловой скорости шнека:

1, 2 — гладкий цилиндр, шнек $l = 5D$, полиэтилен низкой плотности, соответственно при 120 и 140 °С; 3 — гладкий цилиндр, шнек $l = 20D$, полиэтилен высокой плотности; 4, 5 — цилиндр с канавками, $l = 20D$, полиэтилен высокой плотности, соответственно с показателем текучести расплава 0,3 и 0,7 г/10 мин; 6 — то же для поливинилхлоридного пластиката.

факторов. Например, производительность таких экструдеров при переработке полиэтилена, поливинилхлорида и полипропилена в 1,5—2 раза выше, чем экструдеров с гладким цилиндром (рис. 5.7).

Расчет давления и производительности экструзионных машин с винтовой нарезкой в цилиндре значительно упрощается, так как угол направления вектора скорости движения гранул можно принять постоянным и равным углу нарезки винтовых канавок.

Находят широкое применение также экструдеры с продольными канавками в зоне загрузки, однако в данном случае производительность повышается почти в 2 раза и в зоне дозирования нарушается процесс гомогенизации. Поэтому в таких экструдерах необходимо применять специальные шнеки, имеющие смесительные устройства в зоне дозирования.

5.1.2. Движение полимера в зоне плавления

Процесс перехода полимера в вязкотекучее состояние начинается на входе в зону плавления, когда вследствие теплоты трения и контакта материала с горячей поверхностью появляется слой расплава. Первоначальное появление расплава на поверхности шнека или цилиндра зависит от температуры и скорости скольжения материала, а также от возникающего давления.

В данном случае нагревание зависит от тепловых потоков, обусловленных теплопроводностью и диссипацией энергии трения. Обычно температура цилиндра выше, чем температура шнека, поэтому пленка расплава вначале появляется на поверхности цилиндра. На входе в зону плавления пленка имеет незначительную толщину и не срезается нарезкой шнека. Движение материала происходит за счет течения вязкой жидкости по поверхности цилиндра и скольжения слоя гранул по поверхности шнека. Нерасплавившиеся гранулы, уплотненные под действием давления, движутся так же, как в зоне загрузки со скоростью v_m (см. рис. 5.5). В зависимости от этой скорости развивается профиль скорости вязкого течения в пленке расплава. Поскольку объем, занимаемый гранулами, при плавлении уменьшается, шнек в зоне плавления обычно имеет уменьшающуюся глубину, что обеспечивает постепенное сжатие и уплотнение пористого слоя гранул. Под действием давления расплав частично заполняет воздушные полости между гранулами, что увеличивает коэффициент тепло-

проводности и повышает скорость плавления полимера. Изменение давления по длине канала шнека зависит от соотношения крутящих моментов, возникающих на поверхностях шнека и цилиндра.

Рассмотрим закономерности движения полимера в зоне плавления, когда пленка расплава образована только на поверхности цилиндра. Для данного случая силы трения на цилиндрической поверхности шнека зависят от коэффициента трения гранул полимера и давления, поэтому крутящий момент можно рассчитать по уравнению (5.1).

Крутящий момент, возникающий от силы вязкого течения на поверхности цилиндра, $dM_{ц}$ зависит от напряжения сдвига $\tau_{ц}$ и равен

$$dM_{ц} = \tau_{ц} b R_3^2 \cos \omega d\theta \quad (5.32)$$

где $\tau_{ц}$ — напряжение сдвига при тении расплава между слоем гранул и цилиндром; остальные обозначения те же, что и в разделе 5.1.1.

От движения слоя гранул в пленке расплава возникает скорость сдвига. Поскольку цилиндр неподвижен, а гранулы перемещаются со скоростью v_M , то для слоя небольшой толщины можно использовать уравнение:

$$\frac{dv_z}{dy} = \frac{v_M}{\delta} \quad (5.33)$$

Тогда, применяя уравнения (2.27) и (5.19), можем записать:

$$\tau_{ц} = K_0 (\omega R_{ср} \sin \varphi / \delta \sin \omega)^n e^{-b(T_{ср} - T_K)} \quad (5.34)$$

где $T_{ср}$ — средняя температура расплава по толщине пленки, T_K — температура расплава, при которой измеряется коэффициент K_0 .

Распределение температуры по толщине пленки зависит от теплового потока, передаваемого через стенку цилиндра, и диссипации энергии вязкого течения расплава. При переработке кристаллизующихся полимеров часть теплоты расходуется на плавление, поэтому температура на границе раздела фаз равна температуре плавления $T_{пл}$. Распределение температуры по толщине пленки для ламинарного режима течения расплава можно описать уравнением:

$$T_y = T_{пл} + \frac{(q_{\tau} - q_p) y}{\lambda_p} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right) + \frac{(T_{ц} - T_{пл}) y}{\delta} \quad (5.35)$$

где λ_p — коэффициент теплопроводности расплава полимера; T_y — текущее значение температуры по координате y ; $T_{ц}$ — температура поверхности цилиндра; δ — средняя толщина пленки расплава по ширине канала шнека; q_{τ} — тепловой поток от диссипации энергии вязкого течения; q_p — тепловой поток, затрачиваемый на повышение температуры расплава.

Для нахождения средней температуры проинтегрируем данное уравнение по толщине пленки:

$$T_{ср} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_y dy = \frac{T_{ц} + T_{пл}}{2} + \frac{\delta}{12\lambda_p} (q_{\tau} - q_p) \quad (5.36)$$

При расчете зоны плавления за первоначальное значение средней температуры можно принять:

$$T_{\text{ср}} = (T_{\text{ц}} + T_{\text{пл}})/2 \quad (5.37)$$

При наличии пленки расплава уравнение (5.4) изменяется и принимает вид:

$$dM_h = 2K_2 \rho_l f_{\text{ш}} R_{\text{ср}}^2 h_{\text{пл}} d\theta + \tau_{\text{ц}} b f_{\text{ш}} R_{\text{ср}} R_3 \sin \omega d\vartheta \quad (5.38)$$

где $h_{\text{пл}}$ — глубина канала шнека в зоне плавления.

Составив уравнение равновесия крутящих моментов с учетом (5.7), находим изменение давления по длине канала шнека:

$$dp/(A - pB) = dl/N \quad (5.39)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A &= \tau_{\text{ц}} b R_3 (R \cos \omega - f_{\text{ш}} R_{\text{ср}} \sin \omega); \\ B &= f_{\text{ш}} (K_1 R_1^2 b + 2K_2 R_{\text{ср}}^2 h); \quad N = R_3 h b R_{\text{ср}} \sin \varphi \end{aligned} \quad (5.40)$$

Интегрируя уравнение (5.39), получаем:

$$-\frac{1}{B} \ln(A - Bp) = \frac{l}{N} + C_1 \quad (5.41)$$

Постоянную интегрирования находим из условия: $l = l_3$; $p = p_3$, (где p_3 — давление в конце зоны загрузки).

Подставив вместо C_1 его значение, после преобразований находим:

$$p = \frac{A}{B} \left\{ 1 - \frac{A - Bp_3}{A \exp \left[\frac{B}{N} (l - l_3) \right]} \right\} \quad (5.42)$$

Так как твердый слой гранул соприкасается с расплавом, то влияние внутреннего трения гранул можно пренебречь, т. е. коэффициент ψ в уравнении (5.6) становится равным нулю.

Для определения скорости прироста пленки расплава рассмотрим тепловые потоки на поверхности цилиндра, а также между слоем гранул и расплавом. Продифференцировав уравнение (5.35), имеем:

$$\lambda_p \frac{dT}{dy} = \frac{\lambda_p}{\delta} (T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}}) + (q_{\tau} - q_p) \left(1 - \frac{y}{2\delta} \right) \quad (5.43)$$

Плотность теплового потока на внутренней поверхности цилиндра можно найти, если приравнять правые части уравнения (5.43) и уравнения теплопроводности при $y = \delta$:

$$\frac{\lambda_{\text{ц}}}{\delta_{\text{ц}}} \Delta T = \frac{\lambda_p}{\delta} (T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}}) - \frac{1}{2} (q_{\tau} - q_p) \quad (5.44)$$

Тепловые потоки q_{τ} и q_p рассчитываем по уравнениям:

$$q_{\tau} = \tau_{\text{ц}} \varphi_{\text{м}} \quad (5.45)$$

$$q_p = c_p \rho_p \delta v_0 (T_{i-1} - T_i)/2l \quad (5.46)$$

где c_p и ρ_p — удельная теплоемкость и плотность расплава полимера; v_0 — осевая скорость перемещения гранул [см. уравнение (5.21)]; T_{i-1} и T_i — температура на входе и на выходе из расчетного участка длиной l ; $\lambda_{ц}$ — теплопроводность материала цилиндра; $\delta_{ц}$ — толщина стенки цилиндра.

Подобное равенство можно записать для поверхности раздела слоя гранул и пленки расплава. В данном случае при $y = 0$ из уравнения (5.43) имеем:

$$\lambda_p \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} = (q_t - q_p) + \frac{\lambda_p (T_{ц} - T_{пл})}{\delta} \quad (5.47)$$

Распределение температуры по толщине слоя гранул можно рассчитать по уравнению нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины. Используя первый член ряда данного уравнения, запишем:

$$T_{iy} = T_{пл} - \frac{4(T_{пл} - T_0)}{\pi} \cos \frac{\pi y_2}{2S} \exp\left(-\pi^2 \frac{Fo}{4}\right) \quad (5.48)$$

Продифференцировав и умножив на λ_r , получаем:

$$\lambda_r \frac{dT}{dy} = \frac{2\lambda_r (T_{пл} - T_0)}{S} \sin \frac{\pi y_2}{2S} \exp\left(-\frac{\pi^2 Fo}{4}\right) \quad (5.49)$$

где λ_r — теплопроводность слоя гранул; S — половина толщины слоя гранул; Fo — критерий Фурье; T_0 — начальная температура слоя гранул.

$$Fo = al/v_0 S^2 \quad (5.50)$$

где a — температуропроводность слоя гранул, $a = \lambda_r/\rho_p c_r$ [теплофизические характеристики для слоя гранул находят с учетом его пористости, см. уравнение (5.29)].

Поскольку часть теплового потока, передаваемого от слоя расплава к гранулам, расходуется на плавление полимера, то с учетом (5.47) и (5.49) при $y_2 = S$ можем записать:

$$(q_t - q_p) + \frac{\lambda_p (T_{ц} - T_{пл})}{\delta} = \frac{2\lambda_r (T_{пл} - T_0)}{S} \exp\left(-\frac{\pi^2 Fo}{4}\right) + \frac{\Delta\delta Q v_0 \rho}{l} \quad (5.51)$$

где $\Delta\delta$ — изменение толщины пленки расплава по длине цилиндра; Q — теплота плавления полимера.

Из полученного равенства можно определить толщину пленки:

$$\Delta\delta = \frac{l}{v_0 Q \rho} \left[q_t - q_p + \frac{\lambda_p}{\delta} (T_{ц} - T_{пл}) - \frac{2\lambda_r}{S} (T_{пл} - T_0) \exp\left(-\frac{\pi^2 Fo}{4}\right) \right] \quad (5.52)$$

Как видно из полученного уравнения, скорость роста пленки расплава зависит от температуры цилиндра, напряжения сдвига (вязкости полимера), скорости движения и теплофизических характеристик полимера.

На участке, где толщина слоя расплава превысит радиальный зазор между нарезкой шнека и цилиндром $\delta_{ш}$, происходит срезание расплава и накопление его у напорной грани шнека. Расплав у напорной грани движется вокруг оси шнека и, кроме того, в нем возникают циркуляционные потоки, как показано

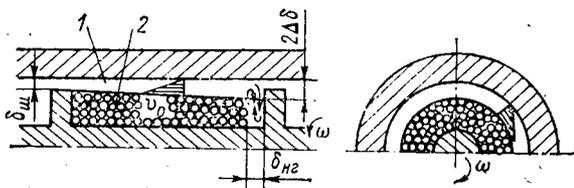


Рис. 5.8. Схема движения гранул и пленки расплава полимера в зоне плавления: 1 — расплав полимера; 2 — гранулы полимера.

стрелками на рис. 5.8. Циркуляция расплава возникает за счет градиента давления, появляющегося при срезании расплава с поверхности цилиндра. Поскольку глубина канала нарезки значительно меньше ширины, то циркуляционные вихри распространяются не по всей ширине канала, а примерно на расстояние $l \approx 2h$. При этом пленка расплава, находящаяся между цилиндром и слоем гранул, движется, как было рассмотрено ранее. Однако в результате действия градиента давления, возникающего при срезании расплава, и силы $S_{ц}$ происходит дополнительный сдвиг и скорость потока возрастает, а эпюра скорости становится выпуклой.

Рассмотрим течение пленки расплава в изотермических условиях. В данном случае можно использовать решение, выполненное для плоского канала, когда нижняя пластина движется со скоростью v_m , а верхняя неподвижна. По длине зазора действует постоянный градиент давления $dp/dz = \text{const}$. Для удобства решения координатную ось z направим перпендикулярно винтовому каналу шнека. Проведя анализ уравнений движения, имеем:

$$\frac{d\tau_{yz}}{dy} = \frac{dp}{dz} = A \quad (5.53)$$

Интегрируя это выражение, получаем:

$$\tau_{yz} = Ay + C_1 \quad (5.54)$$

Подставив вместо напряжения сдвига его значение из реологического уравнения состояния (2.4), с учетом (2.16) имеем:

$$\frac{dv_z}{dy} = \left(\frac{1}{K}\right)^{1/n} (Ay + C_1)^{1/n} \quad (5.55)$$

После интегрирования получаем:

$$v_z = \frac{n}{K^{1/n} (1+n) A} (Ay + C_1)^{(1+n)/n} + C_2 \quad (5.56)$$

Для определения постоянных интегрирования используем граничные условия: $y = \delta$, $v_z = 0$; $y = 0$, $v_z = v_m \sin \omega$. Подставив вместо y и v_z их значения в выражение (5.55), находим:

$$C_2 = - \frac{n}{A (1+n) K^{1/n}} (A\delta + C_1)^{(1+n)/n} \quad (5.57)$$

Постоянная C_1 определяется из равенства:

$$\frac{n [(A\delta + C_1)^{(1+n)/n} - C_1^{(1+n)/n}]}{A(1+n)K^{1/n}} = v_M \sin \omega \quad (5.58)$$

Градиент давления по ширине канала шнека dp/dz зависит от вязкости и количества расплава, срезаемого набегающей напорной гранью шнека. Его можно определить из равенства:

$$\int_0^{\delta} v_z dy = \omega R_{cp} \int_0^{\delta} dy \quad (5.59)$$

Под действием давления, возникающего у напорной грани, появляется поток утечек через радиальный зазор между выступом нарезки шнека и цилиндром. На данном участке процесс плавления принципиально не изменяется; однако при расчете в уравнение (5.45) следует подставлять новое значение напряжения сдвига с учетом выражения (5.54):

$$\tau_{ц} = \frac{dp}{dz} \delta + C_1 \quad (5.60)$$

Напряжение сдвига у напорной грани, когда толщина расплава невелика ($\delta_{нр} < h$), зависит от скорости движения слоя гранул относительно шнека:

$$\tau_h = K_0 \left(\frac{\omega R_3 \cos \varphi - v_M \cos \omega}{\delta_{нр}} \right)^n e^{-b_i(T_{нр} - T_K)} \quad (5.61)$$

где $\delta_{нр}$ — толщина расплава у напорной грани; $T_{нр}$ — температура расплава у напорной грани нарезки шнека.

Одним из основных параметров, влияющих на скорость плавления, является температура, поэтому ее значение выбирается с таким расчетом, чтобы выполнялось условие: $\Delta\delta \simeq \Delta h$, (где Δh — изменение глубины канала нарезки шнека на длине l). Это означает, что уменьшение толщины слоя гранул должно несколько опережать уменьшение глубины канала. В противном случае может произойти заклинивание слоя гранул и производительность экструдера понизится. Поскольку глубина канала изменяется пропорционально длине шнека, то можно записать:

$$h = h_3 - \xi l \quad (5.62)$$

Следовательно:

$$\Delta\delta > \xi l \quad (5.63)$$

Толщина пленки расплава на данном участке зависит от радиального зазора и равна:

$$\delta = \delta_R + \widehat{\Delta\delta}/2 \quad (5.64)$$

Таким образом, в зоне плавления твердый слой гранул сохраняет движение, аналогичное движению в зоне загрузки и, кроме того, появляются два потока течения расплава: в зазоре между цилиндром и гранулами, а также около напорной грани шнека. Под действием напряжения сдвига, возникающего на поверхности

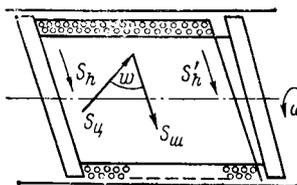


Рис. 5.9. Схема направления действия векторов сил в канале шнека зоны плавления.

слоя, крайние гранулы захватываются расплавом и плавятся, вследствие чего ширина твердой частицы полимера уменьшается, а толщина слоя расплава у напорной грани возрастает. При движении на слой гранул действуют силы, показанные на рис. 5.9.

Внешние силы, действующие на материал, $S_{ц}$ и S'_h обусловлены вязким течением расплава, а $S_{ш}$ и S_h — трением гранул по поверхности шнека. Крутящий момент действия силы $S_{ц}$ равен:

$$dM_{ц} = \tau_{ц} (b - \psi l) R_3^2 \cos \omega d\theta \quad (5.65)$$

где $\psi l = \delta_{нр}$ — ширина напорной грани; ψ — коэффициент, учитывающий прирост слоя расплава у напорной грани.

За счет наличия расплава у напорной грани изменяется крутящий момент на поверхности шнека $dM_{ш}$. С учетом изменения ширины цилиндрической поверхности, соприкасающейся с гранулами, он равен:

$$dM_{ш} = p f_{ш} (b - \psi l) R_1^2 d\theta \quad (5.66)$$

Крутящий момент, возникающий от действия сил трения на боковых гранях dM_h находят с учетом слоя расплава у напорной грани:

$$dM_h = p f_{ш} R_{ср}^2 h_{пл} d\theta + \tau_h h_{пл} R_{ср}^2 d\theta \quad (5.67)$$

Изменение давления по длине цилиндра можно найти из равновесия крутящих моментов

$$dp b h_{пл} R_{ср} \cos \varphi = dM_{ц} - dM_{ш} - dM_h \quad (5.68)$$

Подставив вместо крутящих моментов их значения, имеем:

$$dp l (E - Mp) = \frac{dl}{F} \quad (5.69)$$

Здесь

$$E = \tau_{ц} (b - \psi l) R_3^2 \cos \omega - \tau_h h_{пл} R_{ср}^2 \quad (5.70)$$

$$M = f_{ш} [(b - \psi l) R_1^2 - R_{ср}^2 h_{пл}] \quad (5.71)$$

$$F = b R_3 h_{пл} R_{ср} \sin \varphi \quad (5.72)$$

Интегрируя аналогично (5.39), получаем:

$$p_i = \frac{E}{M} \left\{ 1 - \frac{E - Mp_{i-1}}{E \exp \left[\frac{M}{F} (l - l_{i-1}) \right]} \right\} \quad (5.73)$$

где p_{i-1} — давление, создаваемое на предыдущем расчетном участке длиной l_{i-1} .

Данное уравнение справедливо для участка зоны плавления, когда толщина расплава у напорной грани сравнительно невелика.

Из рассмотренного следует, что по мере продвижения полимера ширина и толщина слоя гранул постепенно уменьшается, а коли-

чество расплава у напорной грани возрастает. На процесс плавления полимера влияет также теплота, выделяемая на поверхности шнека от трения. Когда температура на поверхности шнека достигнет температуры плавления, на этой поверхности также появляется слой расплава, что значительно ускоряет плавление и разрушение твердого слоя гранул.

От скорости плавления гранул в значительной степени зависит гомогенизация расплава в зоне дозирования и соответственно качество изделий. Чем раньше заканчивается плавление, тем лучше происходит смешение расплава и выше его однородность.

5.1.3. Закономерности течения расплава в зоне дозирования

В конце зоны плавления, когда основная часть канала шнека заполнена расплавом, слой гранул разрушается на отдельные части и движение полимера осуществляется за счет вязкого течения. Поскольку частицы твердого полимера сравнительно невелики, то они не оказывают существенного влияния на характер течения расплава. Большинство полимеров в вязкотекучем состоянии обладает адгезией к металлам, поэтому при течении они не проскальзывают относительно поверхностей каналов. Вследствие этого расплав полимера, находящийся между неподвижным цилиндром и вращающимся шнеком, течет как неньютоновская жидкость в кольцевом цилиндрическом канале (см. раздел 2.4). В данном случае слой расплава, прилегающий к цилиндру, остается неподвижным, а расплав, находящийся около шнека, вращается вместе с ним со скоростью $v_{\theta} = \omega R_1$. Часть расплава, которая остается неподвижной, срывается с поверхности цилиндра винтовым выступом нарезки шнека, вследствие чего по ширине канала возникает перепад давления.

Поскольку у набегающей грани выступа шнека давление наиболее высокое, то по ширине и глубине канала создаются градиенты давлений dp/dz и dp/dr . Под действием осевого градиента давления dp/dz расплав течет от набегающего выступа вдоль оси z по кольцевому каналу. При этом скорость v_z на поверхностях цилиндра и шнека равна нулю, а в средней части канала максимальна. Радиальный градиент давления dp/dr обуславливает появление циркуляции расплава у напорной грани. Однако ввиду большой ширины канала по отношению к его глубине ($b/h \approx \approx 15 \div 20$), циркуляционные вихри образуются на сравнительно небольшом участке канала шнека, примерно на ширине $b_{\text{в}} = 2h$. В остальной части канала расплав течет вдоль оси z под действием градиента давления. Схема течения расплава показана на рис. 5.10. Как видно из рисунка 5.10, расплав в канале шнека совершает вращательное движение вокруг оси цилиндра и одновременно течет вдоль оси по кольцевому зазору между цилиндром и поверхностью шнека. При этом у набегающей грани выступа нарезки образуется циркуляционный поток. Кроме этого, под действием

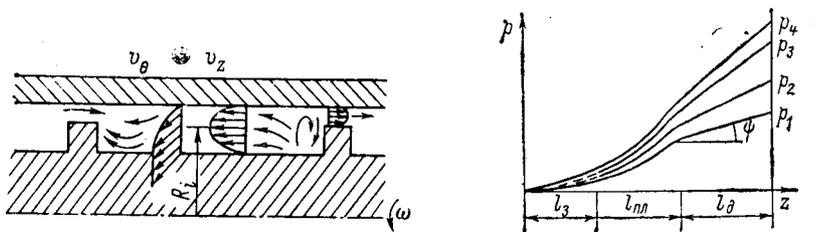


Рис. 5.10. Схема течения расплава полимера в канале шнека зоны дозирования (разрез вдоль оси цилиндра).

Рис. 5.11. Распределение давления вдоль оси цилиндра при насосном режиме работы зоны дозирования и различном давлении на входе в головку (угол ϕ характеризует градиент давления).

давления, возникающего у напорной грани, часть расплава перетекает через радиальный зазор между выступом нарезки шнека и цилиндром, т. е. возникает поток утечек.

Рассмотренная схема течения характерна для случая, когда отсутствует перепад давления вдоль винтового канала. Обычно в зависимости от давления, развиваемого в конце зоны плавления, и сопротивления формующей головки экструдер может работать в двух режимах. В том случае, когда в зоне загрузки и плавления создается низкое давление, зона дозирования работает как нагнетающий насос и давление к выходу из экструдера повышается, т. е. в зоне дозирования имеется отрицательный градиент давления (рис. 5.11). В результате часть расплава течет по винтовым каналам шнека в направлении к зоне плавления со скоростью $v_{\Delta p}$, которая совпадает по направлению со скоростью v_θ , возникающей от вращения шнека (рис. 5.12, б). При увеличении давления в головке перепад давления вдоль винтового канала возрастает, поэтому скорость $v_{\Delta p}$ также повышается (рис. 5.12, а). При геометрическом сложении векторов скорости $v_{\Delta p}$ и v_θ изменяется эпюра скорости течения расплава в тангенциальном направлении (рис. 5.13). Таким образом, чем больше перепад давления, тем

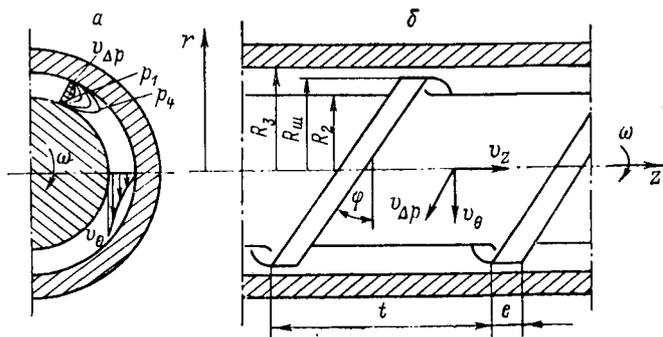


Рис. 5.12. Схема распределения скоростей течения расплава при насосном режиме работы зоны дозирования и различном давлении в формующей головке.

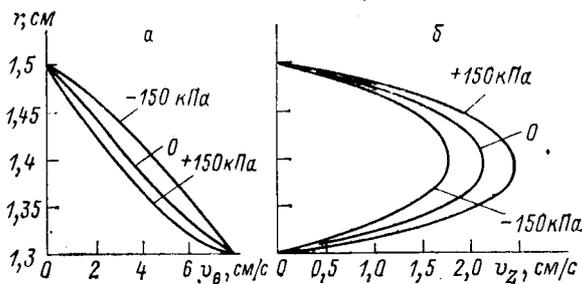


Рис. 5.13. Изменение скоростей v_θ (а) и v_z (б) по глубине канала шнека при положительном и отрицательном градиенте давления $dp/d\theta$.

большая часть расплава вращается вместе со шнеком и доля расплава, срезаемого с поверхности цилиндра нарезкой шнека, уменьшается. Это в свою очередь приводит к понижению осевого потока v_z и производительность экструдера уменьшается. Снижение производительности от перепада давления в зоне дозирования является отрицательным явлением. Однако с ростом давления в формующей головке увеличивается время деформирования расплава и растет скорость сдвига, что способствует лучшей гомогенизации расплава и, следовательно, повышению качества изделий, получаемых методом экструзии.

Сопrotивление головки можно изменить, меняя число фильтрующих сеток, которые устанавливаются на выходе расплава из цилиндра экструдера, или применяя специальные дросселирующие устройства. Этого же можно достигнуть за счет увеличения длины формующей части матрицы и дорна.

В том случае, когда давление на входе в зону дозирования больше, чем на выходе, экструдер работает в дросселирующем режиме, т. е. в зоне дозирования течение расплава происходит с уменьшением давления по длине канала шнека и градиент давления в тангенциальном направлении становится положительным: $dp/d\theta > 0$. Причем, чем больше давление в формующей головке p_2 , тем меньше градиент давления, и при высоком давлении в головке режим работы может смениться на насосный. Градиент давления зависит от перепада давления в зоне дозирования и характеризуется $\text{tg } \psi$ (рис. 5.14).

Поскольку градиент давления меняет знак, вектор скорости $v_{\Delta p}$ также изменяет направление и становится по направлению противоположным вектору скорости v_θ (рис. 5.15). Однако в данном случае, чем больше давление на входе в формующую головку, тем меньше составляющая скорости $v_{\Delta p}$. При этом поток расплава, вращающийся вокруг шнека, возрастает одновременно с ростом давления в головке и производительность агрегата снижается, т. е. увеличение давления при работе как в насосном, так и в дросселирующем режиме снижает производительность и повышает гомогенизацию расплава.

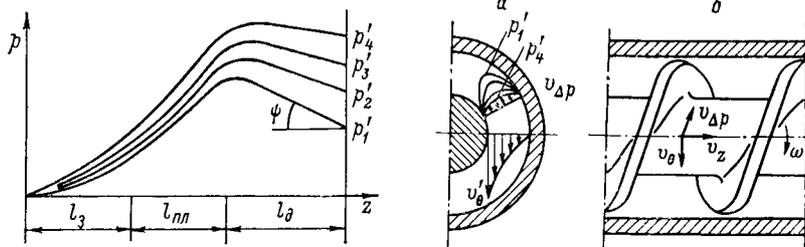


Рис. 5.14. Распределение давления вдоль оси цилиндра при работе экструдера в дросселирующем режиме с различным значением давления на входе в головку.

Рис. 5.15. Схема направления скоростей в канале шнека:

a — эпюры скоростей от вращения шнека и тангенциального градиента давления; *б* — направление векторов скоростей относительно канала шнека.

При работе в дросселирующем режиме вектор скорости v_θ уменьшается меньше, а скорости v_z повышается больше, чем при работе в насосном режиме, поэтому при любом давлении p'_1 или p'_4 производительность агрегата выше, чем при работе в насосном режиме (рис. 5.16). Дросселирующий режим может быть обеспечен в том случае, когда создается высокое давление в зоне загрузки и плавления, особенно в экструдерах с продольным или винтовыми канавками на внутренней поверхности цилиндра. Часть этого давления расходуется на развитие дополнительного потока в винтовых каналах, а остальное — в формирующей головке.

Рассмотренная физическая модель движения расплава в каналах шнека отличается качественно от моделей, описываемых в литературе, где условно принимают, что шнек закреплен неподвижно, а цилиндр вращается в противоположную сторону с угловой скоростью $\omega_{ц}$. Если рассмотреть эпюры скоростей с неподвижным шнеком в сечении, перпендикулярном винтовому каналу, следует, что часть потока движется вместе с цилиндром, а другая часть под действием градиента давления — в противоположную сторону (рис. 5.17, *a*). Из этого можно заключить, что по ширине канала создается циркуляционный поток, который обеспечивает гомогенизацию расплава. Если же перейти к реальным условиям, т. е. начать вращать шнек, как было рассмотрено ранее, то эпюра скорости v'_z принимает другой вид (рис. 5.17, *б*). Из рис. 5.17 видно, что расплав по ширине канала движется поступательно, а циркуляционный поток возникает только у напорной грани нарезки шнека.

Таким образом, в реальных процессах экструзии гомогенизация обеспечивается за счет скорости сдвига потока расплава, вращающегося вокруг оси шнека, и местной циркуляции его

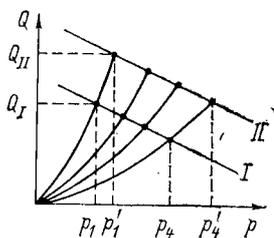


Рис. 5.16. Характеристика экструдера при работе в насосном (*I*) и дросселирующем (*II*) режимах.

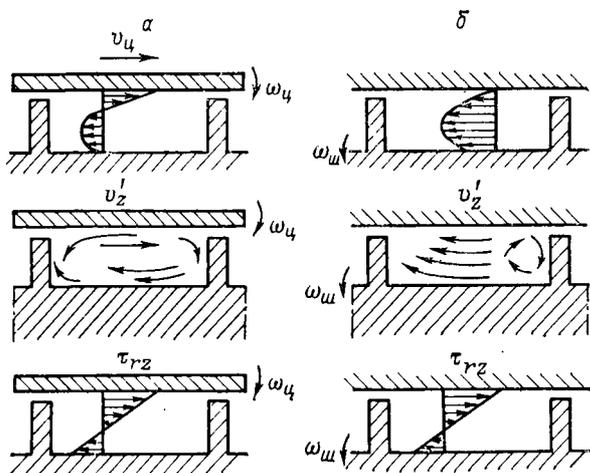


Рис. 5.17. Эпюры скоростей течения расплава полимера и напряжений сдвига в каналах шнека:

a — при вращении цилиндра; *b* — при вращении шнека.

у напорной грани нарезки шнека. Интенсивность таких местных вихрей зависит от глубины нарезки шнека, а также от характера распределения давления по зонам цилиндра.

Однако, если сравнить эпюры напряжений сдвига τ'_{rz} , то при вращении шнека и цилиндра картина получается одинаковой, следовательно, с точки зрения механики процесс не меняется. Однако физические основы процесса течения различны, поэтому когда рассматривается физическая модель процесса, лучше осуществлять анализ с неподвижным цилиндром и вращающимся шнеком и объяснять, исходя из этой картины, гомогенизацию расплава. Нецелесообразно также рассматривать процесс с вращающимся цилиндром в том случае, когда математическое описание процесса выполняется в цилиндрических координатах, так как при этом расчеты количественно отличаются.

На производительность экструдера и степень гомогенизации расплава оказывает влияние также поток утечек. Как уже было рассмотрено ранее, при движении выступов винтовой нарезки шнека по ширине канала создается осевой перепад давления, под действием которого между напорной и противоположной гранями выступа появляется градиент давления dp'_z/dz , вызывающий течение расплава в радиальном зазоре между выступом шнека и цилиндром. Датчик давления, установленный в стенке цилиндра, показывает, что измеряемое давление меняется во времени на величину Δp_K : при подходе напорной грани оно максимально, а у противоположной грани уменьшается (рис. 5.18).

Поскольку поток утечек имеет место в узком зазоре, в нем возникают большие скорости сдвига, обусловленные как градиентом давления dp'_z/dz , так и угловой скоростью шнека, что приводит

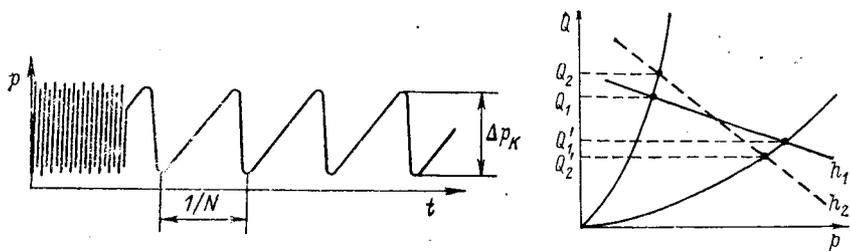


Рис. 5.18. Изменение давления у поверхности цилиндра. Расстояние между периодами соответствует времени одного оборота шнека ($1/N$).

Рис. 5.19. Зависимость производительности от давления в головке для экструдера с различной глубиной канала нарезки шнека ($h_2 > h_1$).

к значительному повышению температуры расплава в радиальном зазоре и температурной неоднородности расплава по глубине канала. При больших частотах вращения шнека за счет диссипации энергии вязкого течения температура расплава чрезмерно повышается, это может привести к термической деструкции полимера и снижению качества изделий. Во избежание этого приходится снижать частоту вращения шнека. Значительное влияние на процесс оказывает поток утечек при переработке полимеров, расплавы которых обладают сильной аномалией вязкости.

Производительность экструдера в значительной степени зависит от глубины канала шнека в зоне дозирования. Так, при работе с более глубокими каналами нарезки шнека производительность возрастает, однако характеристика такого экструдера более крутая, т. е. при увеличении давления производительность сильно уменьшается (рис. 5.19). В связи с этим при больших сопротивлениях головки выгодно применять шнеки с более мелкой нарезкой, так как они при высоком давлении обеспечивают большую производительность $Q_1' > Q_2'$. Кроме того, использование шнеков с более мелкой нарезкой способствует лучшей гомогенизации расплава вследствие увеличения градиента скорости в каналах шнека при его вращении и осевом течении расплава.

Рассмотрим закономерности движения расплава для зоны дозирования. Считаем, что течение осуществляется в изотермических условиях, когда цилиндр неподвижен, а шнек вращается с угловой скоростью ω . Шнек имеет однозаходную нарезку и ось его направлена по координате z (см. рис. 5.12, б). Аналитическое решение проводим при следующих допущениях: 1) течение считаем установившимся; 2) гравитационными силами и силами инерции пренебрегаем; 3) скольжение расплава по поверхности шнека и цилиндра отсутствует; 4) размеры канала шнека по длине постоянные.

Проанализировав уравнения движения (2.31)—(2.33) и оценив значимость всех членов с учетом принятых допущений, имеем:

$$\frac{1}{r} \frac{d(r^2 \tau_{r\theta})}{dr} = \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{1}{r} \frac{d(r \tau_{rz})}{dr} = \frac{dp}{dz}$$

Интегрируя данные уравнения, находим

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} \frac{dp}{d\theta} + \frac{C_1}{r^2} \quad (5.74)$$

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \frac{dp}{dz} + \frac{C_2}{r} \quad (5.75)$$

Из рис. 5.13 видно, что при некотором значении $r = R_i$ скорость v_z имеет максимум, а следовательно, в этой точке градиент скорости равен нулю: $dv_z/dr = 0$ и $\tau_{rz} = 0$. С учетом данных значений имеем:

$$C_2 = \frac{R_i^2}{2} \frac{dp}{dz}$$

Подставляя значение C_2 в (5.75), получаем:

$$\tau_{rz} = \frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \quad (5.76)$$

Из уравнения (2.16) с учетом принятых допущений получаем:

$$\eta = K \left\{ \left[r \frac{d(v_{\theta}/r)}{dr} \right]^2 + \left[\frac{dv_z}{dr} \right]^2 \right\}^{(n-1)/2}$$

После преобразования:

$$\eta = K \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^{n-1} \left\{ 1 + \left[r \frac{d(v_{\theta}/r)}{dr} / \frac{dv_z}{dr} \right]^2 \right\}^{(n-1)/2} \quad (5.77)$$

Для данной задачи реологические уравнения (2.6) и (2.7) имеют вид:

$$\tau_{r\theta} = \eta \left[r \frac{d(v_{\theta}/r)}{dr} \right] \quad (5.78)$$

$$\tau_{rz} = \eta \frac{dv_z}{dr} \quad (5.79)$$

Преобразуя уравнение (5.77) с использованием (5.78) и (5.79), получаем:

$$\eta = K \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^{n-1} \left[1 + \left(\frac{\tau_{r\theta}}{\tau_{rz}} \right)^2 \right]^{(n-1)/2} \quad (5.80)$$

Подставляя полученное выражение в (5.79) с учетом (5.74) и (5.76), находим скорость сдвига:

$$\frac{dv_z}{dr} = \frac{1}{K^{1/n}} \frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \left\{ \left[\frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \right]^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\theta} + \frac{C_1}{r^2} \right)^2 \right\}^{(1-n)/2n} \quad (5.81)$$

Для определения скорости проинтегрируем полученное уравнение при следующих граничных условиях: $v_z = 0$ при $r = R_1$ и $v_z = 0$ при $r = R_2$, (где R_2 — радиус сердечника шнека в зоне дозирования).

Скорость осевого потока равна:

$$v_z = \frac{1}{K^{1/n}} \frac{dp}{dz} \int \frac{r^2 - R_i^2}{2r} \left\{ \left[\frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \right]^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\Theta} + \frac{C_1}{r^2} \right)^2 \right\}^{(1-n)/2n} dr + C_3 \quad (5.82)$$

Для определения расхода площадь элементарного кольца умножим на уравнение скорости, а затем произведем проинтегрируем. Площадь сечения канала шнека в плоскости, перпендикулярной оси z , равна $dS = (2\pi r - e/\operatorname{tg} \varphi) dr$. С учетом уравнения (5.82), получаем

$$Q_1 = \frac{\rho_p}{K^{1/n}} \frac{dp}{dz} \int_{R_2}^{R_3} \left(2\pi r - \frac{e}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \int \frac{r^2 - R_i^2}{2r} \left\{ \left[\frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \right]^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\Theta} + \frac{C_1}{r^2} \right)^2 \right\}^{(1-n)/2n} dr dr - 2\rho_p \pi \int_{R_{III}}^{R_3} v_z^1 dr \quad (5.83)$$

где ρ_p — плотность расплава полимера; v_z^1 — скорость потока утечек.

Для нахождения скорости в тангенциальном направлении преобразуем уравнение (5.77) к следующему виду:

$$\eta = K \left[r \frac{d(v_{\Theta}/r)}{dr} \right]^{n-1} \left\{ 1 + \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^2 / \left[r \frac{d(v_{\Theta}/r)}{dr} \right]^2 \right\}^{(n-1)/2} \quad (5.84)$$

Далее, проведя преобразования подобные описанным ранее, из уравнения (5.78) с учетом (5.74) и (5.76) получаем

$$r \frac{d(v_{\Theta}/r)}{dr} = \frac{1}{K^{1/n}} \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\Theta} + \frac{C_1}{r^2} \right) \left\{ \left[\frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \right]^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\Theta} + \frac{C_1}{r^2} \right)^2 \right\}^{(1-n)/2n} \quad (5.85)$$

Для тангенциальной скорости можем записать:

$$v_{\Theta} = \frac{r}{K^{1/n}} \int \frac{1}{r} \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\Theta} + \frac{C_1}{r^2} \right) \left\{ \left[\frac{dp}{dz} \left(\frac{r^2 - R_i^2}{2r} \right) \right]^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{dp}{d\Theta} + \frac{C_1}{r^2} \right)^2 \right\}^{(1-n)/2n} dr + C_4 \quad (5.86)$$

Решение проводим при граничных условиях: $v_{\Theta} = 0$ при $r = R_3$ и $v_{\Theta} = \omega R_2$ при $r = R_2$.

При отсутствии сдвигового течения весь полимер при вращении шнека перемещался бы вдоль винтовой линии со скоростью $\omega R_3 \operatorname{tg} \varphi$. Однако при течении вязких жидкостей часть расплава вращается вместе со шнеком и вдоль цилиндра не перемещается. Поэтому при определении производительности эту часть расплава

и поток утечек следует вычитать. Таким образом производительность экструдера будет равна:

$$Q_z = \omega \rho_p R_3 \left[\pi (R_3^2 - R_2^2) - \frac{e}{\operatorname{tg} \varphi} (R_3 - R_2) \right] \operatorname{tg} \varphi - \\ - \rho_p K_\delta (t - e) \int_{R_2}^{R_3} v_\Theta dr - 2 \rho_p \pi \int_{R_{III}}^{R_3} v'_z r dr \quad (5.87)$$

где K_δ — коэффициент, учитывающий влияние боковых граней нарезки шнека.

Для однозаходного винтового канала можно принять

$$K_\delta = 1 + 1,5 (R_3 - R_2)/(t - e) \quad (5.88)$$

При этом массовые расходы, рассчитанные по уравнениям (5.83) и (5.87), должны быть равны

$$Q_1 = Q_2$$

В качестве дополнительного уравнения можно также использовать равенство перепадов давлений, создаваемых по зонам шнека и в формирующей головке:

$$\Delta p_3 + \Delta p_{пл} + \Delta p_d = \Sigma \Delta p \quad (5.89)$$

где Δp_3 , $\Delta p_{пл}$, Δp_d — перепады давлений в зоне загрузки, плавления и дозирования соответственно; $\Sigma \Delta p$ — суммарный перепад давления в головке и фильтрующем пакете.

Используя полученное равенство, можно определить градиент давления в зоне дозирования:

$$\frac{dp}{d\Theta} = \frac{\Delta p_3 + \Delta p_{пл} - \Sigma \Delta p}{2\pi m} \quad (5.90)$$

где m — число витков нарезки в зоне дозирования, $m = l/t$.

Полученная система уравнений в общем виде решается только численно с использованием ЭВМ. Как показали исследования, наибольшее влияние на производительность оказывает градиент давления в тангенциальном направлении и показатель степени n (рис. 5.20). Как видно из рис. 5.20, производительность очень сильно зависит от градиента давления при малых значениях n . Для ньютоновских жидкостей изменение расхода практически отсутствует. Для того чтобы понять столь различное влияние градиента давления и показателя степени, рассмотрим эпюры осевой скорости. Из рис. 5.21 видно, что при уменьшении показателя степени n скорость v_z увеличивается. В зависимости от показателя степени n изменяется также кривизна профиля скорости и происходит смещение максимального значения скорости (при $r = R_i$) к поверхности шнека. Однако при работе экструдера в насосном режиме наблюдается обратная картина, и при уменьшении показателя степени n производительность снижается (см. рис. 5.20). Такое неоднозначное влияние показателя степени n объясняется изменением профиля скорости течения расплава в тангенциальном направлении v_Θ . При уменьшении показателя степени кривизна эпюры скорости v_Θ возрастает сильнее, чем при большом значении

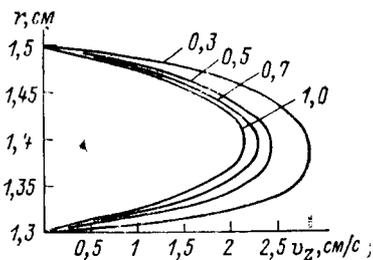
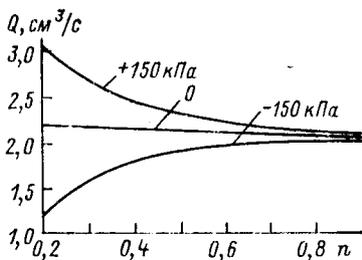


Рис. 5.20. Зависимость производительности экструдера от показателя степени n при различных градиентах давления $dp/d\theta$ (перепадах давления в зоне дозирования).

Рис. 5.21. Зависимость скорости v_z от радиуса канала r при работе экструдера в дросселирующем режиме и различных значениях показателя степени n .

n и отрицательном градиенте давления $dp/d\theta$ (насосный режим) поток, вращающийся со шнеком, увеличивается. При положительном градиенте давления и малых значениях показателя степени n эпюра v_θ становится более вогнутой и доля расплава срезаемого нарезкой шнека возрастает, т. е. производительность экструдера повышается больше, чем для ньютоновских жидкостей.

Из рассмотренного видно, что для достижения высокой производительности при переработке полимеров, обладающих сильной аномалией вязкости (малое значение n), целесообразно создавать дросселирующий режим работы зоны дозирования.

При расчете производительности учитывается поток утечек. Для вывода уравнений рассмотрим изотермическое течение при допущениях, записанных ранее. Анализируя уравнения движения (2.31)—(2.33), имеем:

$$\frac{d}{dr} (r^2 \tau_{r\theta}) = 0 \quad (5.91)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \tau_{rz}) = \frac{dp'}{dz} \quad (5.92)$$

Интегрируя эти уравнения, получаем:

$$\tau_{r\theta} = C_5 / r^2 \quad (5.93)$$

$$\tau_{rz} = \frac{dp'}{dz} \frac{r}{2} + \frac{C_6}{r} \quad (5.94)$$

Постоянную интегрирования C_6 можно найти, приняв, что при $r = R_S$ $dv_z/dr = 0$; следовательно $\tau_{rz} = 0$. Тогда:

$$C_6 = - \frac{\partial p'}{\partial z} \frac{R_S^3}{2} \quad (5.95)$$

где R_S — радиус, при котором скорость потока имеет максимальное значение.

Подставив (5.95) в (5.94), находим:

$$\tau_{rz} = \frac{\partial p'}{\partial z} \frac{1}{2r} (r^2 - R_S^2) \quad (5.96)$$

Реологические уравнения можно записать аналогично (5.78) и (5.79). Используя уравнения (5.77), (5.78) и (5.79), находим скорость сдвига в тангенциальном направлении:

$$r \frac{\partial}{\partial r} (v_{\theta}/r) = \dot{\gamma}_{\theta} = \frac{C_5}{2^{(1-n)/n} K^{1/n} r^{2/n}} \left\{ 4C_5^2 + \left[\frac{\partial p'}{\partial z} (r^2 - R_S^2) r \right]^2 \right\}^{(1-n)/2n} \quad (5.97)$$

Для определения постоянной интегрирования C_5 можно воспользоваться условием равенства скоростей сдвига данного уравнения и уравнения для течения расплава между вращающимися цилиндрами (поток Куэтта) при $r = R_S$. Так как составляющая скорости сдвига, обусловленная перепадом давления, при $r = R_S$ равняется нулю, то с учетом (2.50) можем записать:

$$-2\omega R_3^{2/n} R_{\text{ш}}^{2/n} / n (R_3^{2/n} - R_{\text{ш}}^{2/n}) = C_5^{1/n} / K^{1/n} \quad (5.98)$$

Постоянная интегрирования равна:

$$-C_5 = K R_{\text{ш}}^2 R_3^2 [2\omega/n (R_3^{2/n} - R_{\text{ш}}^{2/n})]^n \quad (5.99)$$

Для определения скорости сдвига по оси z воспользуемся тем же методом, что и при нахождении $\dot{\gamma}_{\theta}$ — см. уравнение (5.97). После известных преобразований находим:

$$\frac{\partial v'_z}{\partial r} = \frac{\frac{\partial p'}{\partial z} (r^2 - R_S^2) r^{(n-2)/n}}{(2K)^{1/n}} \left\{ 4C_5^2 + \left[\frac{\partial p'}{\partial z} (r^2 - R_S^2) r \right]^2 \right\}^{(1-n)/2n} \quad (5.100)$$

Для определения скорости проинтегрируем уравнение (5.100):

$$v'_z = \frac{\frac{\partial p'}{\partial z}}{(2K)^{1/n}} \int (r^2 - R_S^2) \left\{ 4C_5^2 + \left[\frac{\partial p'}{\partial z} (r^2 - R_S^2) r \right]^2 \right\}^{(1-n)/2n} r^{(n-2)/n} dr + C_7 \quad (5.101)$$

Решение выполняется при граничных условиях: $v'_z = 0$ при $r = R_{\text{ш}}$ и $v'_z = 0$ при $r = R_3$.

Градиент давления в радиальном зазоре зависит от перепада давления по ширине канала шнека, а также от разности давлений на входе и на выходе из зоны дозирования. С учетом осевого градиента давления можем записать:

$$\frac{dp'}{dz} = \frac{dp}{dz} \frac{t-e}{e} + \frac{\Delta p_{\text{д}}}{me} \quad (5.102)$$

Подставляя найденную скорость v'_z в (5.83) и (5.87), находим производительность экструдера с учетом потока утечек.

Рассмотренное решение не учитывает тепловых процессов, однако экспериментально установлено, что градиент температуры по глубине канала в некоторых случаях достигает 15—20°С. Кроме того, при сдвиговом течении вязкой жидкости механическая энергия, затрачиваемая на движение, превращается в тепловую, что обуславливает изменение температуры. Поскольку циркуляция расплава в витках шнека осуществляется только у напорной грани, тепловой поток по глубине канала обусловлен теплопровод-

ностью расплава полимера и диссипацией энергии вязкого течения. В этом случае расчет зоны дозирования необходимо проводить с учетом уравнения энергии.

Для установившегося режима течения, а также считая, что теплофизические характеристики не зависят от температуры, и пренебрегая теплопроводностью вдоль оси канала, с учетом принятых ранее допущений, уравнение энергии имеет вид:

$$\rho_p c_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \tau_{r\theta} r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \tau_{rz} \frac{\partial v_z}{\partial r} \quad (5.103)$$

В данном случае в уравнения (5.82), (5.83), (5.87) и (5.100) вместо K и n подставляют их значения из уравнений (2.25) и решают их совместно с уравнением энергии.

Процесс экструзии рассчитывают с учетом конкретного технологического процесса. Например, для обеспечения необходимых условий кристаллизации и получения изделий с заданной степенью кристалличности выбирают скорость охлаждения расплава, затем, используя уравнения нестационарной теплопроводности, находят скорость отвода экструдата и определяют необходимую производительность агрегата Q :

$$Q = \rho_0 M F_3 v_3 \quad (5.104)$$

где ρ_0 — плотность полимера при 20 °С; M — число фильер в формующей головке; F_3 — площадь сечения изготавливаемого изделия; v_3 — скорость отвода профиля (изделия).

При переработке аморфных полимеров скорость экструзии выбирают по заданной степени ориентации макромолекул, верхнее значение скорости экструзии ограничивается наступлением эластической турбулентности, т. е. появлением шероховатости экструдата. Затем с учетом найденной производительности определяют угловую скорость вращения шнека и рассчитывают все остальные параметры процесса экструзии. Следует заметить, что расчет зон загрузки, плавления и дозирования проводят не изолированно, а при условии равенства массовых расходов (производительностей) всех зон:

$$Q_3 = Q_{пл} = Q_d$$

Кроме этого, учитываются условия течения расплава в формующей головке, поскольку степень ориентации макромолекул зависит от скорости сдвига, а также процессы, происходящие после выхода экструдата, — вытяжка расплава, последующая ориентация, эластическое восстановление струи расплава.

5.2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

Процесс изготовления труб основан на непрерывном выдавливании расплава через кольцевую щель формующей головки с последующим охлаждением и отводом трубы в соответствующие приемные устройства.

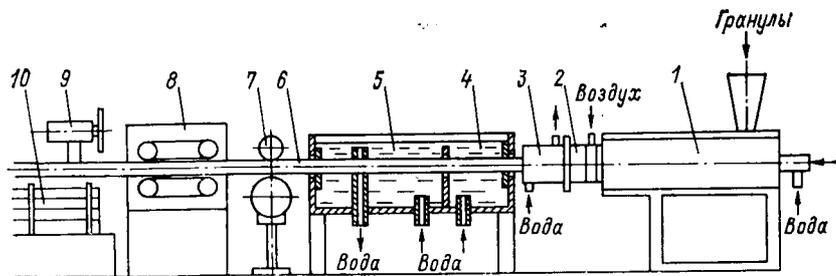


Рис. 5.22. Агрегат для производства труб методом экструзии:

1 — экструдер; 2 — формующая головка; 3 — калибрующая насадка; 4 и 5 — первая и вторая зоны охлаждения; 6 — труба; 7 — измерительно-маркирующее устройство; 8 — тянущее устройство; 9 — отрезающее устройство; 10 — приемный стол (штабелирующее устройство).

Методом экструзии можно изготавливать трубы диаметром от десятых долей миллиметра (капиллярные трубки) до 500 мм и более. Для производства труб могут использоваться термопластичные полимерные материалы, расплав которых имеет необходимое значение вязкости. Как правило, трубы изготавливают из высоковязких сортов полимеров, так как при малой вязкости расплава трудно сохранить заданную форму трубы после выхода ее из формующей головки. Наиболее часто трубы производят из полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида, поликарбоната, полистирола или сополимеров олефинов, винилхлорида, стирола.

Процесс изготовления труб состоит из следующих технологических операций: 1) подготовка сырья; 2) плавление и гомогенизация расплава; 3) формование профиля трубы из расплава; 4) калибрование трубы; 5) охлаждение трубы; 6) намотка или резка; 7) маркировка.

Схема агрегата для производства труб показана на рис. 5.22. Гранулы полимера загружают в бункер экструдера 1, где они расплавляются и выдавливаются через формующую трубную головку 2. Трубчатый профиль 6 поступает внутрь калибровочной насадки (гильзы) 3, где частично охлаждается и приобретает необходимые размеры. Внутри трубы подводится сжатый воздух для прижатия расплава к стенкам насадки или создается вакуум между трубой и насадкой. Затем труба охлаждается в ванне с двумя температурными зонами 4 и 5, проходит маркировку в устройстве 7, протягивается тянущим устройством 8 и разрезается пилой 9. Трубы небольшого диаметра не разрезаются, а сматываются в бухты.

5.2.1. Плавление полимера и гомогенизация расплава

Подготовка расплава к формованию обычно проводится на шнековых экструдерах и реже на дисковых, так как в последних не достигается высокое давление. Физические основы данной технологической операции подробно рассмотрены в разделе 5.1, поэтому здесь коротко рассмотрим лишь некоторые особенности.

При плавлении полимера и гомогенизации расплава требуется обеспечить хорошую однородность расплава по температуре, а также полное расплавление гранул, чтобы исключить попадание в изделие нерасплавленных частиц полимера. В противном случае качество изделий понижается. Кроме того, чтобы происходило качественное формирование расплава и последующее сохранение заданной формы, полимер должен быть нагрет до определенной температуры (расчет температуры см. в разделе 5.2.6). Экструзионный агрегат должен работать при частоте вращения шнека, обеспечивающей заданную скорость выхода расплава и определенное давление на входе в формующую головку. Марка экструдера выбирается в зависимости от размеров (площади сечения F_3) изготавливаемой трубы, скорости отвода трубы v_3 и числа фильер M в головке. Расчетная производительность должна составлять примерно 60 % от максимальной производительности агрегата по паспортным данным, т. е.

$$\rho_0 M F_3 v_3 \leq \frac{2}{3} Q_{\text{макс}} \quad (5.105)$$

Запас по производительности необходим для возможности управления процессом. При работе с максимальной частотой вращения шнека увеличивается пульсация расплава (увеличивается dQ/dt), что вызывает появление разнотолщинности стенок трубы по длине.

Скорость экструзии v_3 обычно выбирается при условии исключения эластической турбулентности (дробления расплава и появления шероховатости) или в зависимости от скорости охлаждения трубы с учетом длины охлаждающей ванны.

5.2.2. Формование профиля трубы

Формование осуществляется при течении расплава полимера через кольцевую щель головки. Для этого обычно используют прямоточные, угловые и Z-образные формующие головки.

Наибольшее применение находят прямоточные головки, одна из конструкций которых показана на рис. 5.23. Корпус головки состоит из двух частей 3 и 6, между которыми закреплена решетка дорнодержателя 11. В часть корпуса 6 вставляется формующее кольцо 9, которое крепится фланцем 8. На входе в головку вставляются решетка 2 и пакет фильтрующих сеток 1. На решетке дорнодержателя 11 закреплены рассекатель 4 и дорн 10. Решетка дорнодержателя имеет штуцер 5 для подвода сжатого воздуха внутрь трубы.

Расплава полимера из цилиндра экструдера проходит через пакет фильтрующих сеток 1, решетку 2, а затем течет в зазоре между патрубком 3 и рассекателем дорна 4 и входит в отверстия решетки дорнодержателя 11, где ребрами разделяется на несколько параллельных потоков. Чтобы не было застойных зон, ребра решетки дорнодержателя делают обтекаемой формы (см. сечение

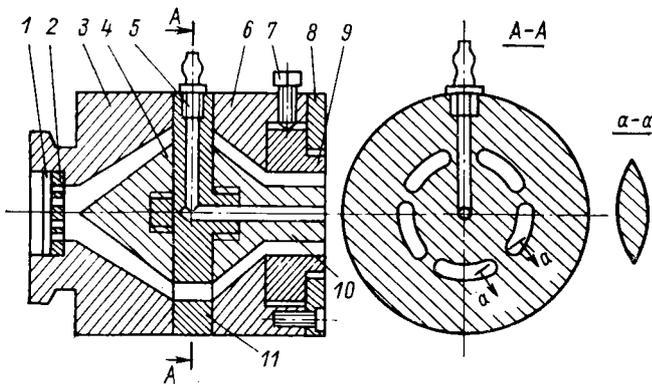


Рис. 5.23. Прямоточная трубная головка:

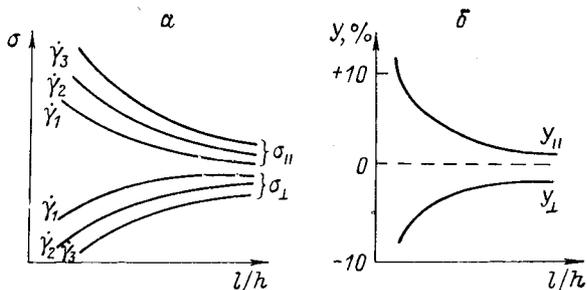
1 — пакет сеток; 2 — решетка; 3 и 6 — корпус головки; 4 — рассекатель; 5 — штуцер; 7 — винт регулировочный; 8 — фланец; 9 — формирующее кольцо (мундштук); 10 — дорн; 11 — решетка дорнодержателя. В сечении $a-a$ показан обтекаемый профиль ребра дорнодержателя.

$a-a$). После решетки дорнодержателя расплав вновь поступает в кольцевой канал, образованный частью корпуса 6 и дорном 10. Окончательные размеры расплав принимает в формирующем канале, при этом для обеспечения равной толщины трубы по периметру формирующее кольцо 9 может перемещаться винтами 7 в радиальных направлениях относительно дорна. Например, вворачивая верхние винты 7, уменьшаем толщину трубы сверху, а снизу она увеличивается.

Длина формирующего канала обычно принимается равной $l/h = 15 \div 30$, но при проектировании головок необходимо учитывать, что в зависимости от длины канала изменяется анизотропия свойств труб в осевом и тангенциальном направлениях. При этом анизотропия возрастает с увеличением скорости сдвига и уменьшается с увеличением длины канала (рис. 5.24). Подобная зависимость объясняется тем, что при течении под действием напряжений сдвига происходит ориентация макромолекул по направлению экструзии, поэтому в готовом изделии (трубе) образуются при кристаллизации несимметричные структуры, большая ось которых соответствует направлению экструзии и которые обуславливают

Рис. 5.24. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении (α) и усадке (β) от длины формирующего канала при различных скоростях сдвига:

σ_{\parallel} , Y_{\parallel} — разрушающее напряжение и усадка вдоль направления экструзии; σ_{\perp} , Y_{\perp} — то же в направлении, перпендикулярном экструзии (в тангенциальном направлении).



анизотропию свойств. При нагревании труб, имеющих анизотропию структуры (свойств), особенно до высокой температуры ($T > T_{пл}$), макромолекулы переходят в равновесную конформацию и размеры трубы вдоль оси уменьшаются, а диаметр увеличивается. Из этого следует, что по длине трубы происходит усадка (U_{\parallel} — положительная), а по диаметру — «разбухание» (U_{\perp} — отрицательная).

Если длина формирующего канала сравнительно велика, то при течении расплава напряжения сдвига частично релаксируют и ориентация молекул уменьшается, что соответственно уменьшает анизотропию свойств трубы. Для того чтобы уменьшить влияние длины канала, нужно стремиться, чтобы на всех участках головки течение происходило по возможности с постоянным градиентом скорости, особенно на участках перед входом в формирующий канал. Для получения труб с незначительной анизотропией свойств формование следует проводить без вытяжки расплава после выхода из головки, а длина формирующей части головки должна быть равна:

$$l_{\phi} \geq 3v_3\lambda \quad (5.106)$$

где v_3 — средняя скорость течения расплава в канале; λ — время релаксации напряжения сдвига.

Скорость течения можно выразить через расход:

$$v_3 = \frac{V}{\pi(R_M^2 - R_D^2)}$$

где R_M и R_D — радиусы матрицы и дорна.

Выразив время релаксации через вязкость и модуль сдвига $G_{\dot{\gamma}}$, с учетом уравнения (2.27) получаем:

$$\lambda = \frac{K_0 \xi}{G_{\dot{\gamma}}} \dot{\gamma}^{n-1} e^{-b(T-T_0)}$$

Значение скорости сдвига из уравнения (2.63) подставим в (5.106), тогда:

$$l_{\phi} \geq \frac{3K_0}{G_{\dot{\gamma}}} \left[\frac{V}{\pi(R_M^2 - R_D^2)} \right]^n \left[\frac{2(2n+1)}{n(R_M - R_D)} \right]^{n-1} e^{-b(T-T_0)} \quad (5.107)$$

где $G_{\dot{\gamma}}$ — модуль сдвига расплава при температуре T и скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

Как видно из рис. 5.23, расплав после выхода из решетки дорнодержателя разделяется на отдельные потоки, поэтому, чтобы на трубе не было линий спаев, кольцевые каналы после решетки делают переменного сечения, изменяя радиальный зазор между дорном и корпусом. При этом неизбежно на этих участках скорости сдвига сильно изменяются, вследствие чего возрастают входовые потери и повышаются напряжения сдвига в формирующем канале. Как уже было показано ранее, большие напряжения вызывают анизотропию свойств, поэтому такой способ ликвидации линий спаев нецелесообразен.

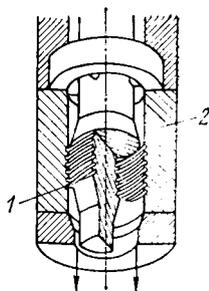


Рис. 5.25. Прямоточная головка с винтовыми канавками для ликвидации линий спаев (разрез в аксонометрии);

1 — канавки на дорне; 2 — канавки на корпусе.

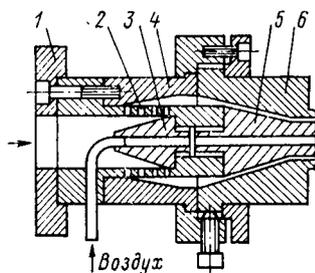


Рис. 5.26. Прямоточная головка с цилиндрической решеткой дорнодержателя;

1 — фланец; 2 — решетка дорнодержателя; 3 — рассекатель дорна; 4 — корпус; 5 — дорн; 6 — формирующее кольцо.

Чтобы ликвидировать линии соединения потоков на внутренней поверхности корпуса головки и на дорне после решетки дорнодержателя предусматривают винтовые канавки с углом нарезки более 45° (рис. 5.25). В этом случае расплав около поверхности дорна и корпуса течет в разных направлениях, отдельные струи пересекаются друг с другом и на входе в формирующий канал образуется сплошной поток без линий спаев. Кроме того, молекулы полимера за счет винтового течения частично приобретают тангенциальную ориентацию, что положительно влияет на упрочнение труб.

Исключить образование линий спаев в трубе можно также, используя прямоточную головку с цилиндрической решеткой дорнодержателя (рис. 5.26). Расплав полимера из патрубка фланца 1 поступает в отверстия решетки дорнодержателя 2, в которых течет перпендикулярно к оси головки, затем отдельные потоки расплава поворачивают вдоль решетки и попадают в кольцевой канал, образованный корпусом 4, формирующим кольцом 6 и дорном 5. Вследствие поворота расплава и изменения профиля скорости течения линии спаев не образуются.

В тех случаях, когда калибрование труб осуществляется на охлаждаемом дорне, используют угловые формирующие головки (рис. 5.27). Расплав поступает в патрубок корпуса, затем обтекает дорн с двух сторон по коллекторному распределителю и, поворачивая вдоль оси дорна, вновь соединяется в кольцевой поток. Труба на выходе имеет один спай на противоположной стороне от входного патрубка, где соединяются два потока. Показанная на рис. 5.27 головка состоит из корпуса 4, в который вставляется дорн 3, теплоизоляционная втулка 2 и труба 1, через которую в выступающую часть дорна подается вода. Таким образом часть дорна, выступающая за формирующее кольцо, охлаждается и на ней происходит калибрование трубы. В корпусе 4 установлено формирующее кольцо 5, которое закреплено фланцем 7 и болтами 6. Разнотол-

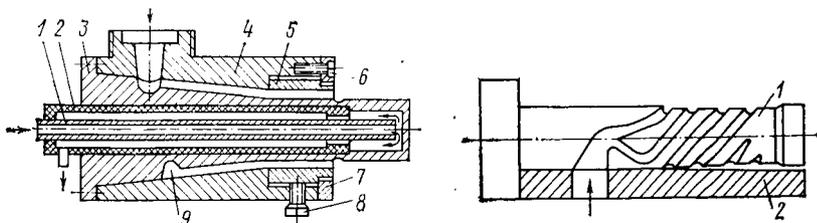


Рис. 5.27. Угловая трубная головка с охлаждаемым дорном:

1 — труба; 2 — теплоизоляционная втулка; 3 — дорн; 4 — корпус; 5 — формирующее кольцо; 6 — болт; 7 — фланец; 8 — регулировочный винт; 9 — коллекторный распределитель.

Рис. 5.28. Выравнивание потоков расплава с помощью симметричных распределительных каналов:

1 — дорн; 2 — корпус.

щинность трубы регулируется за счет перемещения формирующего кольца 5 регулировочными винтами 8.

В угловых головках необходимо предусматривать конструктивные элементы, выравнивающие скорость течения расплава по длине подводящих каналов. Это необходимо в связи с тем, что при выходе из бокового патрубка расплав несимметрично огибает дорн. Чтобы выровнять потоки, дорн обычно крепят эксцентрично относительно корпуса головки. Поскольку такая конструкция сложна в изготовлении и ее трудно рассчитать, чаще применяют дорны с распределением расплава, показанным на рис. 5.28.

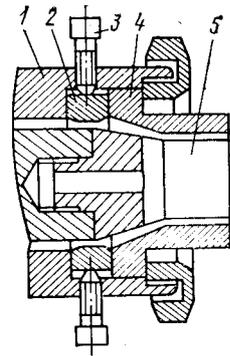
Расплав из патрубка поступает вначале в два канала, охватывающих дорн с двух сторон, которые затем поворачивают вдоль оси дорна и разделяются каждый еще на два V-образно направленных канала, соединенных с винтовыми каналами. Все четыре распределительных канала изготавливают равного сечения и длины, а располагают их относительно друг друга по периметру дорна под углом 90° . Для того чтобы не возникали линии спаев, винтовые каналы делают с постепенно уменьшающейся глубиной, вследствие чего кольцевой зазор между корпусом 2 и дорном 1 к выходу увеличивается, а глубина винтовых каналов уменьшается до нуля. Подобные конструкции обеспечивают равномерное распределение расплава вокруг дорна и способствуют ликвидации линий спаев.

Чтобы исключить регулирование разнотолщинности после смены дорна или матрицы, их делают жесткоцентрированными, т. е. устанавливают в корпусе на скользящей посадке без смещений. Необходимое выравнивание потоков расплава в данном случае осуществляют регулировочным кольцом 2 (рис. 5.29). За счет смещения кольца 2 относительно дорна изменяется радиальный зазор по периметру и скорость потока в канале выравнивается. Этот метод применяется в тех случаях, когда требуется частая смена дорна и матрицы при изготовлении труб различных размеров.

При изготовлении труб из полимеров, склонных к сильной термической деструкции, при смещении регулировочного кольца 2

Рис. 5.29. Выравнивание потоков с помощью регулировочного кольца:

1 — корпус; 2 — регулировочное кольцо; 3 — винт; 4 — формирующее кольцо; 5 — дорн.



относительно корпуса 1 в канале образуется выступ, на котором задерживается и разрушает полимер, что вызывает ухудшение качества труб. Для предотвращения этого, выравнивание потоков и регулировку разнотолщинности осуществляют с помощью мундштука 1 со сферическим выступом (рис. 5.30). Мундштук 1 может перемещаться в шаровой опоре корпуса относительно дорна 2 винтами 3, при этом меняется радиальный зазор в формирующем канале без образования выступов, что исключает образование застойных зон в потоке расплава.

При изготовлении двухслойных труб или при покрытии металлических труб пластмассовой оболочкой применяют Z-образные головки, у которых питающий патрубок расположен параллельно оси со смещением (рис. 5.31). Расплав входит в угловой патрубок 5, затем сердечником дорна распределяется в виде кольцевого потока и течет между формирующим кольцом 1 и дорном 2. При изготовлении однослойных труб внутрь дорна подается вода, а при формовании двухслойных труб через отверстие дорна протягивается ранее изготовленная труба меньшего диаметра.

Таким образом, конструкции формирующих головок должны удовлетворять следующим общим требованиям: 1) равномерное течение расплава по периметру головки; 2) отсутствие линий спаев; 3) плавный переход от одного участка канала к другому; 4) равномерное нагревание расплава по периметру.

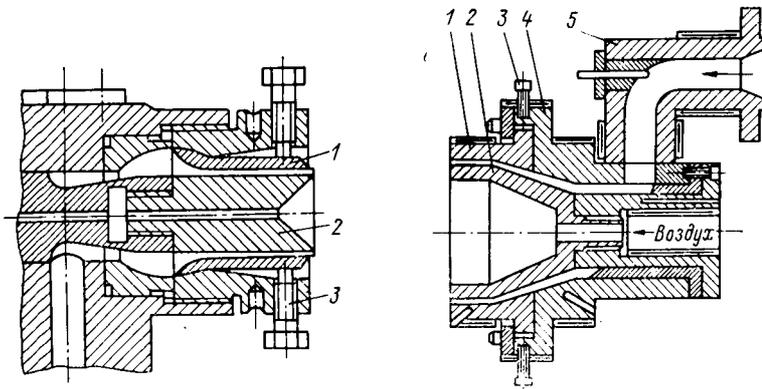


Рис. 5.30. Трубная головка с закреплением формирующего кольца в шаровом шарнире: 1 — мундштук; 2 — дорн; 3 — регулировочный винт.

Рис. 5.31. Трубная Z-образная головка (со смещением патрубка):

1 — формирующее кольцо; 2 — дорн; 3 — регулировочный винт; 4 — корпус; 5 — угловой патрубок.

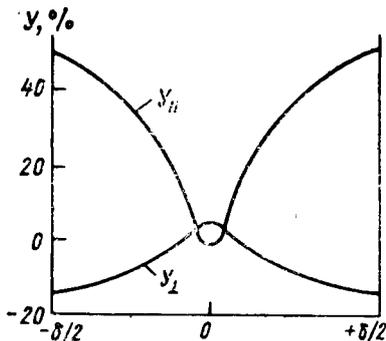


Рис. 5.32. Изменение термической усадки по толщине стенки трубы.

Кроме конструктивных факторов на качество изготавливаемых труб влияют технологические параметры — температура, скорость течения и скорости вытяжки расплава.

Как уже неоднократно упоминалось, при течении происходит ориентация молекул полимера, которая зависит от вязкости расплава и скорости течения. При увеличении температуры расплава ориентация и время релаксации уменьшаются, поэтому прочность и усадка труб в осевом направлении снижаются. Если измерить усадку образцов, вырезанных из стенки трубы на различной глубине, то изменение усадки аналогично профилю напряжения сдвига, возникающего при течении (рис. 5.32). Это указывает на то, что усадка и ориентация зависят в основном от напряжения сдвига.

Анизотропия свойств и прочность изделий в значительной степени зависят от температуры расплава. Чем выше температура расплава, тем меньше должна быть анизотропия, так как ориентация молекул снижается. Как видно из рис. 5.33, при достижении определенной температуры расплава прочность изделий в продольном и поперечном направлениях становится равной. Однако в зависимости от температуры прочность изменяется неоднозначно; для одних полимеров она понижается, а для других проходит через максимум. Для кристаллизующихся полимеров изменение проч-

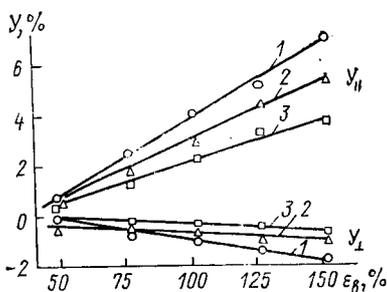
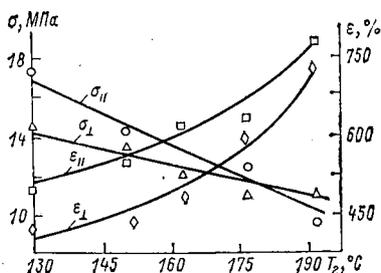


Рис. 5.33. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении σ и относительного удлинения ϵ от температуры головки T_g для полиэтилена низкой плотности: $\sigma_{||}$, $\epsilon_{||}$ — разрушающее напряжение и относительное удлинение вдоль направления экструзии; σ_{\perp} , ϵ_{\perp} — то же в направлении, перпендикулярном экструзии (в тангенциальном направлении).

Рис. 5.34. Зависимость термической усадки вдоль направления экструзии $y_{||}$ и в тангенциальном направлении y_{\perp} от степени вытяжки расплава:

1 — полиэтилен низкой плотности; 2 — полиэтилен высокой плотности; 3 — полипропилен.

ности обусловлено в основном формой и размерами надмолекулярных структур, а для аморфных — ориентацией макромолекул и гомогенизацией расплава в зоне дозирования. Поэтому в зависимости от того, что сильнее влияет на прочность — степень гомогенизации или ориентация — происходит либо увеличение, либо уменьшение прочности труб в различных направлениях. При изготовлении труб из полимеров, подверженных термической деструкции, прочность с повышением температуры вначале возрастает, а затем уменьшается; последнее можно объяснить деструкцией полимера, которая резко усиливается при высоких температурах. В зависимости от температуры изменяется также блеск поверхности трубы: чем выше температура, тем больше блеск, т. е. лучше товарный вид изделия. Это можно объяснить тем, что с ростом температуры уменьшается возможность проявления эффекта эластической турбулентности. Кроме того, в поверхностном слое снижается степень кристалличности и уменьшаются размеры структур, влияющих на шероховатость поверхности.

Скорость течения расплава в головке влияет в основном на анизотропию свойств трубы, поскольку градиент скорости связан с напряжением сдвига. Необходимо учитывать также, что при увеличении скорости может появиться шероховатость поверхности, так как при напряжении сдвига, превышающем силы адгезии расплава, происходит периодический срыв расплава с поверхности формирующего канала (см. раздел 2.7).

При формовании профиля трубы расплав из головки выходит не свободно, а с помощью тянущего устройства. Если расплав отводится со скоростью большей, чем скорость выхода расплава, происходит уменьшение толщины стенки трубы и повышается осевая ориентация макромолекул. В зависимости от степени вытяжки расплава увеличивается усадка в продольном направлении. При этом в тангенциальном направлении при нагревании труб, изготовленных с вытяжкой, наблюдается не уменьшение, а увеличение размеров (рис. 5.34).

Под степенью вытяжки ϵ_v понимается отношение площади сечения трубы к площади формирующего зазора в головке, выраженное в процентах. В зависимости от степени вытяжки изменяются физико-механические свойства труб, так, разрушающее напряжение вдоль трубы возрастает, а в поперечном направлении уменьшается (рис. 5.35). Относительное удлинение имеет противоположную зависимость. Для изделий, полученных с малой степенью вытяжки, относительное удлинение в продольном направлении больше, чем в поперечном. В тех случаях, когда трубы используются для перекачки жидкостей, т. е. должны работать под внутренним давлением, требуется большая прочность в тангенциальном (окружном) направлении. Чтобы достигнуть этого, формование труб следует проводить при наложении на осевой поток расплава тангенциальных напряжений сдвига. С этой целью применяют головки с вращающимся дорном или вращающимся кольцом (мундштуком).

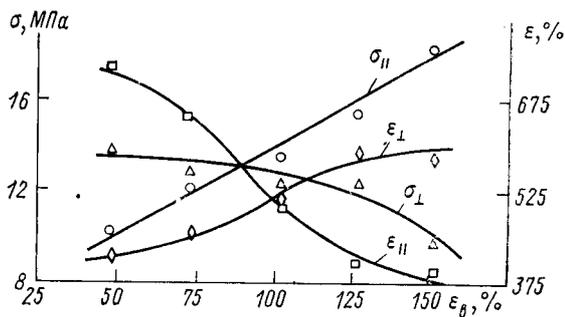


Рис. 5.35. Зависимость разрушающего напряжения σ и относительного удлинения ϵ экструзионных изделий от степени вытяжки.

Прямоточная головка с вращающимся дорном и приводом от шнека показана на рис. 5.36. Головка состоит из корпуса 2, соединенного с фланцем экструдера 1, дорнодержателем 6 и промежуточным корпусом 11. Внутри дорнодержателя на подшипниках 5 и 4 закреплен дорн 12, соединенный со шнеком соединительной муфтой 3. Для исключения попадания расплава в воздухо-распределительное кольцо 9 на дорне 12 установлено уплотнение 10, состоящее из наборных колец и прижимной пружины 7.

Формование профиля трубы происходит в канале, образованном дорном 12 и формующим кольцом 13, закрепленным фланцем 14 и болтами 8. Осевое течение расплава осуществляется под действием перепада давления в головке, при этом возникают напряжения сдвига τ_{rz} , а вследствие вращения дорна соответственно тангенциальные напряжения $\tau_{r\theta}$, поэтому на макромолекулу

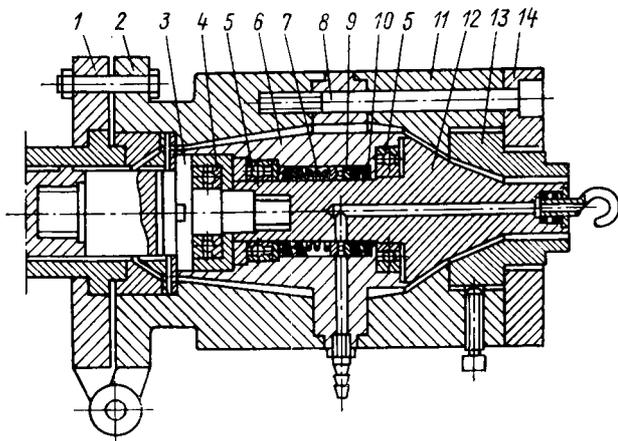


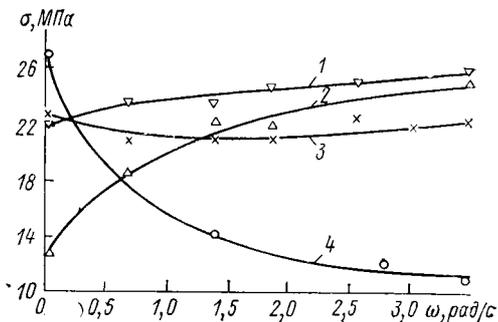
Рис. 5.36. Прямоточная головка с вращающимся дорном:

1 — фланец экструдера; 2 — корпус; 3 — муфта; 4, 5 — подшипники; 6 — дорнодержатель; 7 — прижимная пружина; 8 — болт; 9 — воздухо-распределительное кольцо; 10 — уплотнение; 11 — промежуточный корпус; 12 — дорн; 13 — формующее кольцо; 14 — фланец.

Рис. 5.37. Зависимость прочности трубы от скорости вращения дорна для полиэтилена высокой плотности: 1, 3 — предел текучести в продольном и тангенциальном направлении; 2, 4 — разрушающее напряжение в тангенциальном и продольном направлении.

воздействует суммарное напряжение, равное геометрической сумме:

$$\tau = \sqrt{\tau_{rz}^2 + \tau_{r\theta}^2}$$



Чем больше составляющая $\tau_{r\theta}$ относительно τ_{rz} , тем больше увеличение прочности в тангенциальном направлении и снижение ее в осевом (рис. 5.37). Как видно из рисунка, разрушающее напряжение вдоль направления экструзии с ростом частоты вращения дорна значительно падает (кривая 4), а в тангенциальном направлении возрастает (кривая 2), однако напряжения текучести при этом почти не изменяются. С увеличением частоты вращения дорна значительно уменьшается также относительное удлинение при растяжении вдоль направления экструзии и возрастает в тангенциальном. Таким образом, проявляется одинаковая зависимость разрушающего напряжения и относительного удлинения от частоты вращения дорна. Это, вероятно, объясняется тем, что большая грань ламелей в сферолите, в которой расположена складка макромолекулы (направленная по оси a кристаллической ячейки), ориентируется по направлению суммарного напряжения сдвига, что обуславливает большую прочность в этом направлении, благодаря большему числу проходных участков макромолекул. Развертывание складок макромолекул при растяжении обеспечивает рост относительного удлинения в зависимости от скорости вращения дорна.

Ориентацию макромолекул можно определить, если подвергнуть изделия термообработке при температуре несколько выше температуры плавления, а затем измерить изменение размеров в различных направлениях относительно координатных осей $z-\theta$. Как видно из рис. 5.38, усадка изменяется по кривой в виде косинусоиды, которая смещается в зависимости от частоты вращения дорна. Так, при неподвижном дорне усадка максимальна вдоль направления экструзии ($\alpha = 0^\circ$) и равна примерно 50 %, а в тангенциальном направлении ($\alpha = 90^\circ$) она приближается к нулевому значению или становится отрицательной. По мере увеличения частоты вращения дорна максимум усадки смещается в область $\alpha = 73^\circ$, что примерно совпадает с направлением вектора суммарного напряжения, а минимальная усадка соответствует образцам, вырубленным под углом $\alpha = 165^\circ$. Это указывает на то, что большая ось макромолекулы ориентируется по направлению суммарного напряжения сдвига τ .

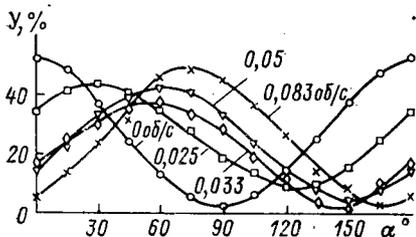


Рис. 5.38. Зависимость термической усадки образцов труб относительно координат $z-\theta$ при различной частоте вращения дорна.

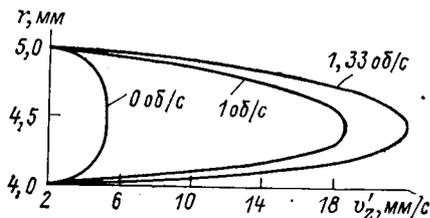


Рис. 5.39. Распределение скорости v_z по глубине формирующего зазора r при различной частоте вращения дорна.

При гидравлических испытаниях труб установлено, что трубы изготовленные с вращением дорна, выдерживают более высокие давления и соответственно разрушаются при повышенных напряжениях $\sigma_{\theta\theta}$. Кроме того, значительно увеличивается долговечность труб: испытания на разрушения они выдерживают примерно в два раза дольше, чем трубы, изготовленные при неподвижном дорне.

При течении расплава в кольцевом зазоре с вращающимся дорном или вращающейся матрицей значительно изменяется эпюра скорости v_z . При увеличении частоты вращения дорна она становится более вытянутой, максимальная скорость течения увеличивается (рис. 5.39). Такое значительное изменение скорости объясняется влиянием на эффективную вязкость скорости сдвига, возникающей в тангенциальном направлении при вращении формирующих элементов головки [см. уравнение (5.77)]. Зависимости осевой и тангенциальной скоростей сдвига от угловой скорости дорна и градиента давления описываются уравнениями (5.97) и (5.100), а скорость течения уравнением (5.101).

В тех случаях, когда необходимо изменять степень ориентации труб, применяют угловые головки с независимым приводом вращения дорна или формирующего кольца (см. рис. 6.4).

В соответствии с изменением профиля скорости снижается перепад давления в головке, а производительность экструзионного агрегата возрастает на 20—40 %. Повышения производительности за счет снижения перепада давления в головке можно достичь также при наложении вибрации на дорн или созданием ультразвуковых колебаний в расплаве, однако этими методами нельзя целенаправленно влиять на прочность изделий.

5.2.3. Калибрование труб

Для придания профилю трубы заданных размеров и исключения ее деформации в охлаждающем устройстве трубы калибруют, т. е. предварительно охлаждают с приданием расплаву определенной конфигурации и размеров. Калибрование можно проводить

по наружной или внутренней поверхности трубы, а также с использованием сжатого воздуха или вакуума. Калибрование по наружному диаметру трубы с использованием сжатого воздуха показано на рис. 5.40.

Трубчатая заготовка расплава выдавливается из головки и поступает внутрь металлической гильзы насадки. При подаче сжатого воздуха внутрь трубы происходит ее некоторое раздувание по диаметру, вследствие чего труба плотно прилегает к охлаждаемым стенкам калибрующей гильзы. Чтобы не произошло разрушения экструдата, насадка крепится вплотную к головке, а в рубашку калибрующей насадки подается охлаждающая жидкость. Чтобы исключить прилипание расплава, гильза насадки охлаждается до температуры, которая всегда должна быть ниже температуры стеклования или плавления. При этом на поверхности трубы образуется слой твердого полимера, который после выхода из насадки должен выдерживать внутреннее давление воздуха, а также силы трения, возникающие в насадке.

Зависимость коэффициента трения от температуры насадки показана на рис. 5.41, из которого следует, что для уменьшения силы трения нужно стремиться к уменьшению температуры, однако при этом необходимо учитывать изменение качества труб. Так, при калибровании труб из кристаллизующихся полимеров в зависимости от скорости охлаждения изменяются размеры структурных образований: чем ниже температура воды, тем они мельче в наружном поверхностном слое. С повышением температуры калибрования прочность труб в продольном направлении понижается, а в тангенциальном практически не меняется. Однако при высокой температуре увеличивается колебание свойств, т. е. нарушается стабильность процесса, и возможно появление поверхностных микротрещин.

При калибровании труб из аморфных полимеров в зависимости от скорости охлаждения могут изменяться остаточные напряжения. Чем ниже температура калибрования, тем они выше. Особенно это характерно для жестких полимеров, таких, как блочный полистирол

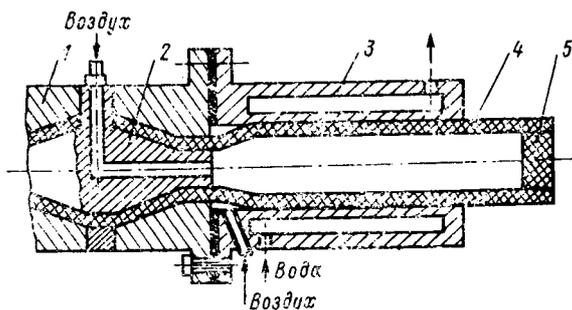


Рис. 5.40. Калибрование трубы по наружному диаметру:

1 — корпус головки; 2 — дорн; 3 — калибрующая насадка; 4 — труба; 5 — пробка.

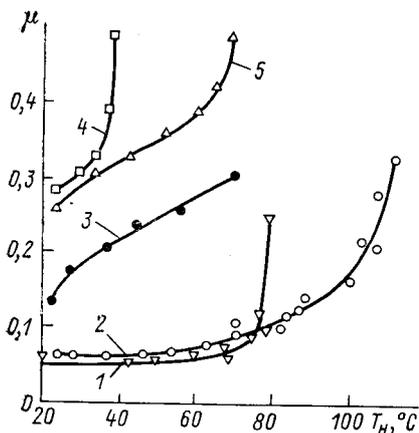


Рис. 5.41. Зависимость коэффициента трения μ от температуры насадки T_H :
 1 — жесткий поливинилхлорид; 2 — полиэтилен высокой плотности; 3 — полистирол;
 4 — поливинилхлоридный пластикат; 5 — полиэтилен низкой плотности.

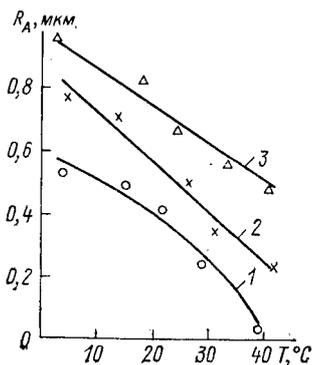


Рис. 5.42. Зависимость шероховатости поверхности R_A от температуры воды в калибрующей насадке:
 1 — полиэтилен низкой плотности; 2 — полиэтилен высокой плотности; 3 — полипропилен.

От температуры охлаждающей воды в насадке зависит также шероховатость поверхности, что проявляется при переработке только кристаллических полимеров (рис. 5.42). С повышением температуры шероховатость труб понижается, так как поверхностный слой имеет меньшую степень кристалличности.

Давление калибрования выбирается в зависимости от диаметра трубы, толщины ее стенки, а также свойств полимеров и температуры расплава. Обычно его подбирают экспериментально при запуске агрегата. При этом следует учитывать, что при низком давлении ухудшается внешний вид труб (образуется поверхностная рябь), а при чрезмерно большом снижается прочность и возрастает коэффициент трения. Понижение прочности обусловлено скорее всего появлением микротрещин вследствие возникновения больших сил трения. Чтобы снизить силы трения внутри насадки, между трубой и калибрующей гильзой, подают сжатый воздух (см. рис. 5.40), который образует как бы воздушную смазку, однако при этом ухудшается охлаждение расплава. Поэтому целесообразнее использовать калибрующие насадки с дренажным кольцом (рис. 5.43), в которых вода из водяной рубашки проходит через отверстия гильзы и попадает в кольцевую проточку, расположенную на внутренней поверхности, откуда тонким слоем течет между трубой и гильзой, образуя смазывающий слой. Вследствие образования плотного контакта между расплавом и гильзой резко повышается скорость охлаждения трубы. Такие калибрующие насадки можно использовать при изготовлении труб из поливинилхлоридного пластиката, который обладает большим коэффициентом трения;

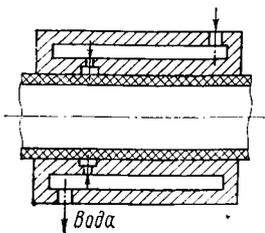


Рис. 5.43. Калибрующая насадка с подачей воды на охлаждающую поверхность через дренажные отверстия.

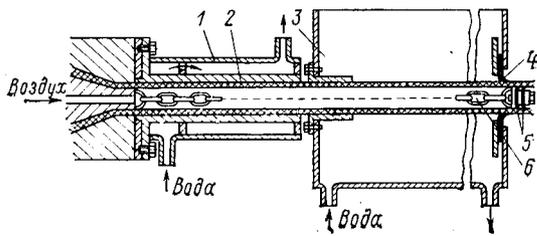


Рис. 5.44. Калибрование трубы по наружному диаметру с плавающей пробкой: 1 — калибрующая насадка; 2 — труба; 3 — охлаждающая ванна; 4 — резиновое уплотнение; 5 — плавающая пробка; 6 — цепь.

в этом случае без слоя жидкости технологический процесс калибрования практически невозможен. Для того чтобы в момент запуска агрегата вода не попадала на головку, охлаждение временно отключают или перекрывают дренажные отверстия. Для создания давления внутри трубы конец ее закрывают пробкой или несколько раз перегибают под углом 180° .

При производстве труб большого диаметра или труб из жестких полимеров, которые не наматываются в бухты, а разрезаются, применяют калибрование с плавающей пробкой (рис. 5.44). В данном случае внутрь трубы 2 вставляется пробка 5 с манжетами, которая прикреплена к дорну головки цепью 6. Чтобы исключить повреждение внутренней поверхности трубы, когда расплав еще не охлажден, длину цепи подбирают с таким расчетом, чтобы пробка была расположена за тянущим устройством. Если пробка находится до него, то при движении трубы от трения манжет пробки возникают силы, вызывающие упругие колебания, которые затем по трубе передаются на выходящий расплав, и труба может получить с кольцевыми утолщениями на внутренней поверхности.

Недостаток калибрования сжатым воздухом — отсутствие возможности наблюдать за качеством расплава, выходящего из головки. Этот недостаток можно устранить, если использовать вакуумную насадку (рис. 5.45). Для создания вакуума необходимо обеспечить герметичность между экструдатом и гильзой на входе, поэтому диаметр формирующего мундштука делают несколько больше, чем диаметр гильзы. Необходимые размеры труба приобретает в результате прижатия экструдата к стенкам гильзы под действием разности давления атмосферного воздуха и вакуума. Поскольку невозможно создать большую разность давлений, этот метод неприменим при калибровании толстостенных труб. Кроме того, невозможно уменьшить силы трения на стенках гильзы, так как подача воды на ее внутреннюю поверхность в этом случае исключается. Общим недостатком калибрования в насадках с металлическими гильзами является плохая теплопроводность. Для улучшения теплопроводности в водяной рубашке делают

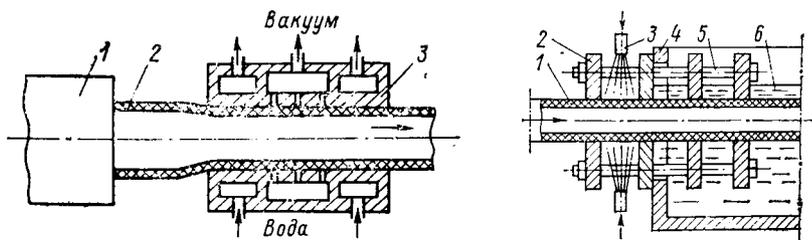


Рис. 5.45. Вакуумная калибрующая насадка:
1 — головка; 2 — труба; 3 — насадка.

Рис. 5.46. Калибрующая насадка из пластин:
1 — труба; 2 — пластина; 3 — орошающая форсунка; 4 — водяная ванна; 5 — шпильки;
6 — охлаждающая вода.

спиральные каналы или, что эффективнее, используют для калибрования пластины (рис. 5.46). Трубчатая заготовка протягивается последовательно через ряд пластин с калиброванными отверстиями, которые орошаются водой из форсунок или погружены в ванну. Отверстия пластин имеют входную фаску или радиус закругления, а диаметр их рассчитывается с учетом последовательной усадки трубы при охлаждении. При калибровании пластинами трубчатая заготовка раздувается сжатым воздухом, подаваемым внутрь трубы, или за счет создания вакуума. В этом случае набор калибрующих пластин помещают в герметичную камеру, в которой создают вакуум. В этой же камере устанавливают форсунки для разбрызгивания воды.

Во всех рассмотренных методах калибрования труба приобретает заданный размер по наружному диаметру. Внутренний диаметр трубы зависит от толщины стенок. Для обеспечения заданного наружного диаметра трубы диаметр калибрующей гильзы рассчитывают с учетом усадки полимера при охлаждении:

$$D_{\Gamma} = D_{\text{H}} (1 + \mathcal{Y}/100) + \Delta \quad (5.108)$$

где D_{Γ} — диаметр калибрующей гильзы; D_{H} — наименьший наружный диаметр трубы по ГОСТу; Δ — допуск на изготовление гильзы; \mathcal{Y} — усадка полимера, %.

Диаметр отверстия мундштука D_{M} формирующей головки определяют, исходя из размеров калибрующей гильзы:

$$D_{\text{M}} = D_{\Gamma}/1,01$$

С учетом (5.108) имеем:

$$D_{\text{M}} = D_{\text{H}} (100 + \mathcal{Y})/101 \quad (5.109)$$

Длина калибрующей гильзы должна обеспечивать необходимую толщину твердого слоя полимера в поверхностном слое трубы, выдерживающего силу трения и внутреннее давление воздуха, подаваемого для калибрования. Сила трения на поверхности гильзы равна:

$$F = \pi D_{\Gamma} f l_{\text{H}} p \quad (5.110)$$

Толщина слоя полимера δ , выдерживающего силу трения, должна быть:

$$\delta \geq F/\pi D_r [\sigma_T] \geq f l_n p / [\sigma_T] \quad (5.111)$$

где l_n — длина насадки; p — давление воздуха; $[\sigma_T]$ — допускаемое напряжение текучести при растяжении полимера для средней температуры по толщине трубы; f — коэффициент трения полимера о поверхность калибрующей гильзы

Время охлаждения полимера, необходимое для образования твердого слоя толщиной δ , находим из уравнения нестационарной теплопередачи:

$$t = \frac{l_n}{v_3} = \frac{4\delta^2}{\pi^2 a} \cdot 2,3 \lg \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_p - T_r}{T_r - T_r} \right) \quad (5.112)$$

где a — температуропроводность при температуре T_{cp} ; v_3 — скорость отвода трубы; T_p — температура расплава; T_r — температура калибрующей гильзы; T_r — температура текучести.

Решая совместно уравнения (5.111) и (5.112), находим:

$$l_n \leq \frac{a\pi^2 [\sigma_T]^2}{4f^2 p^2 v_3 2,3 \lg \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_p - T_r}{T_r - T_r} \right)} \quad (5.113)$$

С другой стороны, длина насадки должна быть такой, чтобы образовавшийся слой твердого полимера выдерживал внутреннее давление. Рассматривая затвердевший слой как тонкостенную цилиндрическую оболочку под давлением, имеем:

$$\delta \geq p D_r / 2 [\sigma_T] \quad (5.114)$$

Решая (5.114) совместно с (5.112), получаем:

$$l_n \geq \frac{2,3 p^2 D_r^2 v_3 \lg \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_p - T_r}{T_r - T_r} \right)}{a\pi^2 [\sigma_T]^2} \quad (5.115)$$

Таким образом, два неравенства (5.113) и (5.115) определяют расчетную длину насадки.

При калибровании трубы по внутреннему диаметру используют угловые или Z-образные головки с удлиненным охлаждаемым дорном. Расплав после выхода из головки поступает на удлиненный дорн, который охлаждается изнутри водой (см. рис. 5.27). За счет контакта расплава с холодной поверхностью на внутренней поверхности образуется слой твердого полимера, определяющий конфигурацию и размеры трубы. Поскольку при охлаждении трубы происходит уменьшение диаметра, то выступающая охлаждаемая часть дорна должна иметь конусность, соответствующую усадке. С целью уменьшения силы трения на дорне делают дренажные отверстия для подвода воды. При изготовлении труб из полиэтилена высокой плотности между трубой и охлаждаемым дорном необходимо создавать вакуум, иначе трубы получаются негладкими.

В зависимости от метода калибрования изменяется картина распределения внутренних напряжений в трубе после охлаждения. Так, при калибровании по наружному диаметру верхние слои

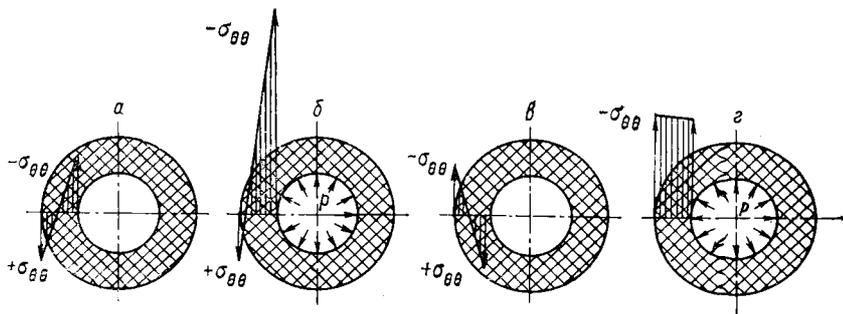


Рис. 5.47. Распределение напряжений по толщине трубы:

a — при калибровании по наружному диаметру; *б* — то же, но при наличии внутреннего давления; *в* — при калибровании на дорне; *г* — то же, но при наличии внутреннего давления (вверх направлены растягивающие напряжения).

трубы в процессе усадки сжимаются, а внутренние растягиваются (рис. 5.47, *a*). При эксплуатации труб под действием давления в них возникают растягивающие нормальные напряжения, которые совпадают по знаку с остаточными напряжениями во внутренних слоях. В связи с этим в трубе появляются большие растягивающие напряжения (рис. 5.47, *б*), под действием которых может произойти ее разрушение.

При калибровании по внутреннему диаметру вначале охлаждаются внутренние слои. При последующем охлаждении происходит усадка наружных слоев, за счет чего внутренние слои сжимаются и в них возникают положительные тангенциальные напряжения (рис. 5.47, *в*). При создании внутри трубы давления, возникающие напряжения частично компенсируются остаточными положительными напряжениями, поэтому на трубу действуют меньшие растягивающие напряжения (рис. 5.47, *г*) и она способна выдерживать большее внутреннее давление. Калибрование на удлиненном охлаждаемом дорне применяется при изготовлении тонкостенных пластмассовых труб. В случае изготовления труб с большой толщиной стенки расплав полностью не охлаждается на дорне, поэтому при входе в охлаждающую ванну возникает твердый слой расплава на наружной поверхности. При последующем охлаждении расплава в центральных слоях стенки трубы могут появиться раковины, так как твердые слои на внутренней и наружной поверхностях трубы препятствуют усадке. В связи с этим при изготовлении труб большой толщины охлаждаемую часть дорна необходимо делать укороченной, чтобы происходило лишь частичное охлаждение расплава на внутренней поверхности, а полное — в охлаждающей ванне. При таком двухстороннем охлаждении можно увеличить скорость отвода трубы и структура, образующаяся по толщине трубы, становится более однородной. Длину охлаждаемой части дорна рассчитывают так же, как и длину гильзы при калибровании по наружному диаметру, однако в уравнениях (5.113) и (5.115) вместо D_r подставляют значения внутреннего диаметра трубы.

5.2.4. Охлаждение труб

Охлаждение труб проводится орошением их водой или пропусканьем через водяную ванну. Основное требование к этой операции — равномерное и быстрое охлаждение расплава. Поскольку труба движется в горизонтальном направлении, то создаются неравномерные температурные поля по верху и по низу трубы. Чтобы исключить это, в ваннах обеспечивается интенсивное перемешивание жидкости, для чего устанавливают барботажные трубки, разбрызгивающие форсунки или создают спиральный поток вокруг трубы. Интенсивное перемешивание необходимо также для удаления пузырьков воздуха, оседающих на поверхности трубы и нарушающих теплообмен. В противном случае поверхность становится дефектной (с оспинами).

Температура охлаждающей воды обычно выбирается в зависимости от полимера, а также с учетом требований, предъявляемых к трубам. При очень низкой температуре поверхностные слои имеют аморфную или мелкокристаллическую структуру, а во внутренних слоях возникают кристаллические образования больших размеров. Для выравнивания структуры применяют охлаждение по зонам, с различной температурой или двухстороннее охлаждение. В некоторых случаях для этого внутрь трубы подают водно-воздушную смесь или охлажденный воздух.

Трубы хорошего качества получаются, если температура расплава на внутренней поверхности после выхода из ванны ниже температуры плавления или текучести. Поэтому необходимо обеспечивать определенную скорость отвода трубы тянущим устройством. Если отвод трубы чрезмерно ускорить, на внутренней поверхности расплав срезается плавающей пробкой и гладкости трубы нарушается. Высокая температура на внутренней поверхности после охлаждения приводит к увеличению размеров кристаллических структур и ухудшению качества труб, возможна также деформация труб при сжатии их треками тянущего устройства.

5.2.5. Маркировка и упаковка труб

После охлаждающей ванны труба поступает в тянущее устройство, с помощью которого обеспечивается постоянная скорость отвода трубы. При этом труба должна иметь хорошее сцепление с треками или роликами тянущего устройства, исключаяющее ее проскальзывание и появление вследствие этого кольцевых утолщений стенки.

По ходу движения трубы обычно устанавливают устройство для измерения ее длины и маркировки (см. рис. 5.22). Надпись на трубы наносится накаткой краски или методом горячего тиснения. На обогреваемом ролике надпись выполняется в виде выступающих знаков, которые при нажатии на трубу оставляют углубления.

Гибкие трубы сматывают в бухты определенного радиуса, предусмотренного ГОСТами или техническими условиями. Бухты связывают и в таком виде после испытаний отправляют потребителю.

Трубы большого диаметра с помощью режущего устройства нарезаются на отрезки определенной длины и упаковываются в виде связанного пучка. При изготовлении труб, а также перед их упаковкой периодически проводится визуальный осмотр, измерение основных размеров (диаметра, толщины стенки) и испытание на соответствие ГОСТам.

5.2.6. Расчет технологических параметров процесса

Расчет температуры расплава в формующей головке. Как уже было рассмотрено ранее, температура расплава при формовании выбирается в интервале между температурой текучести и температурой разложения. Однако этот интервал очень широк, поскольку вязкость расплава изменяется на порядок и больше. Чтобы сузить указанный интервал температур, воспользуемся реологическими данными.

Известно, что полимеры перерабатываются при различных температурах, но для каждого метода выбираются температуры, обеспечивающие необходимые значения вязкости расплава. Так, при производстве труб вязкость должна быть сравнительно высокой, чтобы не происходила самопроизвольная деформация экструдата на выходе из головки и не нарушалась трубчатая форма профиля. При изготовлении пленок щелевым методом, когда расплав сразу принимается на барабан, вязкость может быть очень низкой.

При изучении реологических зависимостей различных полимеров при температурах переработки было замечено, что для каждого метода переработки выделяется отдельная область. При этом для определенной группы полимеров эти области сравнительно узкие. На основе экспериментальных данных по этому принципу составлена расчетная номограмма для определения температуры расплава термопластов (полиэтилен, полипропилен, полистирол, полиформальдегид и пластифицированный поливинилхлорид) при изготовлении изделий методами экструзии и литья под давлением (рис. 5.48, а). Для удобства расчетов на номограмме нанесена шкала вязкости и шкала показателя текучести расплава. Как видно из номограммы, производство труб или трубчатых заготовок для выдувания осуществляется при более высокой вязкости, чем пленок. Еще меньшей вязкостью должен обладать расплав при литье под давлением. Естественно, что перерабатывать полимеры можно и при иных значениях вязкости, однако при этом возрастает давление в узлах агрегатов, повышаются энергетические затраты и изменяется качество изделий. Следует заметить, что данную номограмму нельзя использовать для всех полимеров. Например, расплавы поликарбоната и полиметилметакрилата имеют высокую вязкость, повышение температуры вызывает их термическую

расплава полимера от температуры и вязкость, соответствующая реологической области переработки.

Рассмотрим методику расчета с использованием показателя текучести расплава. Исходные данные: T_i — температура испытаний; G_i — вес груза; i — показатель текучести расплава; R — радиус капилляра; $R_{ш}$ — радиус штока. По уравнениям неустановившегося изотермического течения (3.2) и (3.3) рассчитывают напряжение сдвига τ_i и скорость сдвига $\dot{\gamma}_i$. Для расчетов необходимо знать плотность расплава при температуре T_i , показатель степени n и входовой поправочный коэффициент m . Эти значения обычно находят по справочникам или определяют для данного полимера экспериментально.

Пользуясь найденными значениями τ_i и $\dot{\gamma}_i$, находим на номограмме исходную реологическую точку (точка A на рис. 5.48, б). Эту же точку можно установить, используя значение показателя текучести расплава. Например, для полиэтилена низкой плотности с показателем текучести расплава $i = 3$ г/10 мин эта точка соответствует координатам: $\dot{\gamma}_i = 10 \text{ с}^{-1}$, $\tau_i = 1,45 \cdot 10^4$ Па (точка A на рис. 5.48, б). При скорости сдвига $\dot{\gamma}_i$ в области переработки находим новую точку B , для которой напряжение сдвига равно τ_n . Используя полученные значения τ_i и τ_n , рассчитываем температуру расплава на выходе из формующей головки T_n :

$$T_n = \frac{T_i T_{\dot{\gamma}}}{E_{\dot{\gamma}} - 2,3RT_i \lg(\tau_i/\tau_n)} \quad (5.116)$$

где T_i — температура измерения показателя текучести расплава полимера, К; $E_{\dot{\gamma}}$ — энергия активации вязкого течения, Дж/моль; R — газовая постоянная.

Энергия активации $E_{\dot{\gamma}}$ определяется графически (см. рис. 2.9) или экспериментально при $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_i$. В тех случаях, когда известна энергия активации при постоянном напряжении сдвига, на номограмме при напряжении сдвига τ_i выбирают точку C , для которой находят значение $\dot{\gamma}_n$ при $\tau_i = \text{const}$. Температуру при этом рассчитывают с использованием энергии активации E_{τ} , найденной при напряжении сдвига τ_i :

$$T_n = \frac{TE_{\tau}}{E_{\tau} - 2,3RT_i \lg \dot{\gamma}_n/\dot{\gamma}_i} \quad (5.117)$$

Если точка A , соответствующая исходным реологическим данным полимера, располагается в области переработки, то $T_n = T_i$. Например, для полиэтилена низкой плотности с показателем текучести расплава 0,3 г/10 мин точка A попадает в область переработки полимера методом экструзии (изготовление труб). Поскольку показатель текучести расплава определяется при температуре $T_i = 190$ °С, данную марку полиэтилена можно перерабатывать при этой же температуре.

Расчет температуры расплава по значению эффективной вязкости. При данном варианте расчета используется численное значение эффективной вязкости $\eta_{\dot{\gamma}}$, найденное при температуре T_2 и скорости сдвига $\dot{\gamma}_p$.

Исходную реологическую точку на номограмме (см. рис. 5.48, б) находят в месте пересечения линий вязкости $\eta_{\dot{\gamma}}$ и скорости сдвига $\dot{\gamma}_p$ — точка D . Затем при этом же значении скорости сдвига $\dot{\gamma}_p$ на средней линии области переработки выбирают точку B' . Значения напряжений сдвига, соответствующие точкам D и B' , подставляют в уравнение (5.116), а T_i заменяют на температуру измерения вязкости T_2 и рассчитывают температуру расплава.

Если для данного полимера имеется реологическая кривая, то выбирают произвольные значения напряжения и скорости сдвига, найденные при любой температуре T_j . Для повышения точности расчета исходную точку выбирают обычно при скорости сдвига, развивающейся при течении расплава в формирующем канале головки. Зная реальную скорость сдвига, на кривой течения отмечают точку F с координатами τ_2 и $\dot{\gamma}_2$, а на средней линии области переработки — точку B'' (см. рис. 5.48, б). Далее расчет проводят аналогично рассмотренным ранее вариантам, используя значения напряжения сдвига τ_2 и τ''_n .

Выбор первоначальных условий для нахождения точки F зависит также от значения энергии активации вязкого течения. Если эта величина известна для определенного значения скорости или напряжения сдвига, то точку F наносят для этих значений $\dot{\gamma}$ или τ .

Предлагаемая методика расчета позволяет уменьшить интервал температур переработки, однако для определения оптимального значения температуры переработки необходимо экспериментально уточнить режим с учетом требований, предъявляемых к качеству изделий, а также специфических особенностей конструкций машины и формирующих головок.

С помощью данной методики можно определить минимальную и максимальную температуру переработки. Для этого наносят две расчетные точки на нижнюю и верхнюю границы области переработки, а затем соответственно находят два значения напряжений сдвига τ_{\min} и τ_{\max} , по которым рассчитывают максимальную и минимальную температуры.

Определение скорости отвода труб. При наружном калибровании расплав частично охлаждается в насадке, а окончательно в охлаждающей ванне, поэтому общее время охлаждения будет равно:

$$t_{\text{охл}} = (l_n + l_{\text{охл}})/v_0 \quad (5.118)$$

где l_n и $l_{\text{охл}}$ — длина калибрующей насадки и охлаждающей ванны.

Для нестационарного процесса теплопередачи через пластину имеем:

$$\frac{T(t_x) - T_c}{T_p - T_c} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1} \cos \mu_n \frac{x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (5.119)$$

где T_{tx} — текущее значение температуры во времени и по координате x ; T_c — температура наружной поверхности трубы; T_p — температура расплава; $\mu_n = (2n - 1)(\pi/2)$, а $n = 1, 2, 3$ и т. д.; Fo — критерий Фурье, $Fo = at/x^2$; x — текущая координата по толщине пластины δ .

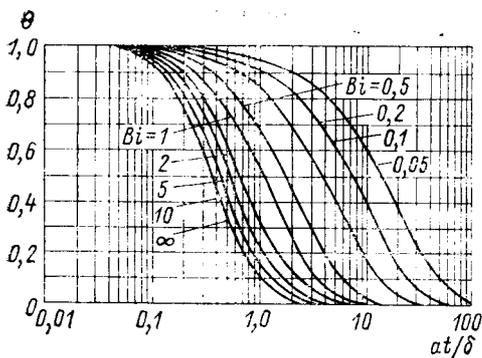


Рис. 5.49. Номограмма для расчета времени охлаждения с заданной безразмерной величиной Θ при нестационарной безразмерной теплопередаче через пластину при различных значениях критерия Bi .

Известно, что, если $Fo \geq \geq 0,1$, то при использовании одного члена ряда (5.119) ошибка в расчетах составляет около 5%. Поэтому сохранив первый член ряда уравнения, можем рассчитать температуру на внутренней поверхности трубы T_i :

$$\frac{T_i - T_c}{T_p - T_c} = \frac{4}{\pi} e^{-\pi^2 Fo/4} \quad (5.120)$$

Чтобы исключить неизвестную величину — температуру стенки трубы, введем коэффициент теплоотдачи, а вместо T_c подставим температуру охлаждающей воды T_v . Заменяя критерий Фурье его значением из уравнения (5.50) и используя (5.118), находим:

$$v_0 \leq \frac{\pi^2 (l_H + l_{охл})}{9,2c\rho (R_H - R_B) \left(\frac{R_H - R_B}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha} \right) \lg \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_p - T_B}{T_i - T_B} \right)} \quad (5.121)$$

где c и ρ — удельная теплоемкость и плотность полимера при средней температуре; R_H и R_B — наружный и внутренний радиус трубы; α — коэффициент теплоотдачи; λ_p — теплопроводность расплава полимера.

Для исключения деформации трубы принимаем, что температура на внутренней стенке трубы должна быть равна $T_{пл} T_i = T_{пл}$.

Для более точных расчетов, можно использовать графоаналитический метод. Зная температуру охлаждающей воды T_v аналогично приведенному ранее расчету, находим безразмерную величину Θ :

$$\Theta = (T_i - T_v)/(T_p - T_v)$$

Затем рассчитываем критерий Био; $Bi = \alpha\delta/\lambda_p$. По найденным значениям Θ и Bi пользуясь графиком рис. 5.49, на оси абсцисс находим значение критерия Фурье Fo , а затем с учетом (5.118) можем рассчитать скорость отвода трубы:

$$v_0 = \frac{a (l_H + l_{охл})}{Fo (R_H - R_B)^2} \quad (5.122)$$

Расчет давления воздуха при калибровании. При подаче сжатого воздуха внутрь трубы или создании вакуума выходящий из головки расплав растягивается в тангенциальном направлении. Значение нормального напряжения $\sigma_{\Theta\Theta}$ зависит от скорости деформации и вязкости:

$$\sigma_{\Theta\Theta} = \epsilon\eta_p \quad (5.123)$$

где η_p — вязкость расплава при растяжении; ε — скорость деформации для растяжения в тангенциальном направлении;

$$\varepsilon = \frac{v_3}{r} \frac{dr}{dz}$$

Принимаем, что радиус трубчатой заготовки изменяется по длине прямопропорционально, тогда $dr/dz = \text{const}$ или, переходя к конечным величинам, получаем:

$$\varepsilon = v_3 (D_r - D_m) / D_m \Delta l \quad (5.124)$$

Используя уравнение прочности для тонкостенной цилиндрической оболочки $p_k = 2\sigma_{\theta\theta} (R_n - R_b) / D_m$, а также уравнение (5.123), после подстановки скорости деформации находим давление воздуха калибрования p_k :

$$p_k \geq \frac{2Kv_3\eta_p (D_r - D_m) (R_n - R_b)}{\Delta l D_m^2} \quad (5.125)$$

где K — постоянная, для инженерных расчетов можно принять $K = 2$; Δl — расстояние от головки до точки прилегания расплава к насадке, ориентировочно можно принять $\Delta l = 0,5$ см.

При вакуумном калибровании остаточное давление в насадке p_0 :

$$p_0 \leq p_b - p_k$$

где p_b — давление атмосферного воздуха.

Полученное значение давления уточняется с использованием двух неравенств (5.113) и (5.115), решая которые, находим:

$$p \leq \frac{\pi [\sigma_T] V \bar{a}}{\sqrt{4,6 D_n / v_3 \lg \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_p - T_r}{T_T - T_r} \right)}} \quad (5.126)$$

Расчет перепада давления в головке. Для нахождения потерь давления весь путь движения расплава в головке разбивают условно на участки с постоянной геометрической формой каналов и нумеруют их. Разметку каналов проводят обычно, начиная с фильтрующей сетки по ходу движения расплава. Так, для головки, показанной на рис. 5.23, путь течения расплава можно разбить на 7 участков.

Затем, используя уравнения табл. 5.1, по объемному расходу рассчитывают для каждого участка градиент скорости. По кривой течения при температуре T_p для данного полимера или по средней линии реологической области переработки (см. рис. 5.48), находят напряжения сдвига для всех участков головки и, используя уравнения табл. 5.1, определяют перепады давлений Δp_i .

Для расчета можно использовать также уравнения, учитывающие потери давления на входе в канал [см. уравнение (2.67) или (2.68)]. Суммарный перепад давления на всех участках для трубной головки должен быть равен:

$$10 \text{ МПа} \leq \sum_{i=1}^{i=n} \Delta p_i \leq 15 \text{ МПа} \quad (5.127)$$

ТАБЛИЦА 5.1. Формулы для расчета скорости сдвига и перепада давления в каналах

R — радиус канала; l — длина канала; b и h — ширина и глубина прямоугольного канала; c — число параллельных каналов на расчетном участке; n — показатель степени; V — объемный расход; τ — напряжение сдвига; m — входовой поправочный коэффициент (принимается для тех участков, где имеется резкий переход от одного сечения канала к другому или поворот канала на 90°), значения m находят обычно экспериментально или из литературных данных.

Форма канала	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Δp_l , Па
Цилиндрическая	$\frac{3n+1}{n} \frac{V}{\pi R^3 c}$	$\frac{2\tau(l+mR)}{R}$
Коническая	$\frac{3n+1}{n} \frac{(R_1^3 + R_2^3) V}{\pi R_1^3 R_2^3 2c}$	$\frac{2\tau(l+mR_{cp})}{R_{cp}}$
Прямоугольная	$\frac{2(2n+1)}{n} \frac{V}{(h+b)h^2 c}$	$\frac{2\tau(l+mh)(b+h)}{hb}$
Щелевая	$\frac{2(2n+1)}{n} \frac{V}{bh^2 c}$	$\frac{2\tau(l+mh)}{h}$
Кольцевая $h = R_2 - R_1$	$\frac{2n+1}{n} \frac{V}{\pi R_{cp} (R_2 - R_1)^2 c}$	$\frac{2\tau[l+m(R_2 - R_1)]}{R_2 - R_1}$
Трапецидальная $b_{cp} = \frac{b_1 + b_2}{2}$	$\frac{2(2n+1)}{n} \frac{V}{(b_{cp} + h)h^2 c}$	$\frac{2\tau(l+mh)(b_{cp} + h)}{hb}$

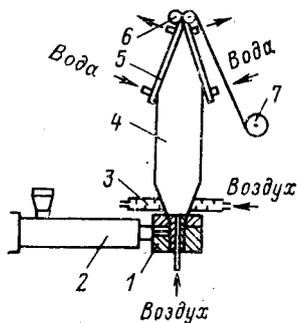
5.3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛЕНКИ РУКАВНЫМ МЕТОДОМ

Процесс изготовления пленки рукавным методом (раздувом) основан на непрерывном выдавливании расплава полимера через узкую кольцевую щель формирующей головки с последующей вытяжкой рукава в продольном и поперечном направлениях и его охлаждением. При данном методе формирования расплав выдавливается в виде тонкостенного цилиндра (рукава), который после растяжения и охлаждения наматывается сдвоенным полотном или разрезается и наматывается как плоская пленка. Таким методом могут изготавливаться пленки из термопластичных полимеров, расплав которых обладает значительными вязкоупругими свойствами, обеспечивающими устойчивость рукава при его отводе и охлаждении.

Конструктивно процесс может осуществляться с вытяжкой рукава вверх, вниз и в горизонтальном направлении. Наибольшее применение находит процесс изготовления пленки с отводом рукава вверх на агрегатах со шнековым экструдером, поскольку дисковые экструзионные машины не обеспечивают создание высоких давлений, необходимых для выдавливания (течения) расплава через узкую кольцевую щель с большой скоростью. В последнее время используют также пленочные агрегаты с отво-

Рис. 5.50. Технологическая схема производства пленки рукавным методом:

1 — формующая головка; 2 — экструдер; 3 — кольцо; 4 — рукав; 5 — направляющие пластины; 6 — тянущие вальки; 7 — приемное устройство.



дом пленки вниз; при таком исполнении удобнее осуществить жидкостное охлаждение рукава. Отвод пленки в горизонтальном направлении применяется при изготовлении рукавов небольшого диаметра, так как при больших диаметрах возможен прогиб рукава и неравномерная вытяжка пленки. В данном случае из-за наличия несимметричных циркуляционных тепловых потоков трудно обеспечить равномерное охлаждение рукава.

Процесс производства пленки рукавным методом состоит из следующих технологических операций: 1) подготовка сырья; 2) плавление гранул и гомогенизация расплава; 3) формование рукава; 4) ориентация и охлаждение пленки; 5) намотка и упаковка пленки; 6) контроль качества пленки.

Технологическая схема процесса показана на рис. 5.50. Гранулы полимера загружаются в бункер экструдера 2. Загрузка обычно осуществляется с помощью пневмо- или вакуумного устройства, которым оборудуются бункер или транспортная тара для сырья. Для загрузки гранул, опудренных красителем, применяются шнековые спиральные дозаторы. Из экструдера 2 полимер в виде расплава выдавливается через формующую головку 1, а внутрь рукава 4 подается сжатый воздух. Снаружи пленка складывается струей воздуха из кольца 3. Охлаждаемый рукав складывается в виде сдвоенного полотна направляющими пластинами 5 и попадает в тянущие вальки 6, один из которых для исключения утечки воздуха из рукава имеет эластичное покрытие. Пленка наматывается на бобины с помощью приемного устройства 7.

5.3.1. Подготовка сырья, плавление гранул и гомогенизация расплава

Подготовительные операции включают сушку полимера, окрашивание и смешение гранул (см. гл. 4).

Основные физические закономерности, характеризующие процесс плавления гранул полимера и гомогенизацию расплава, подробно рассмотрены в разделе 5.1, однако при изготовлении пленки требования к качеству расплава повышаются. Это в первую очередь относится к степени гомогенизации, равномерности нагревания расплава и отсутствию включений.

Для достижения лучшей гомогенизации расплава при изготовлении пленок используются экструзионные агрегаты с более мелкой глубиной нарезки шнека в зоне дозирования при степени сжатия 3,5 — 4. При этом технологические параметры работы

экструдера подбираются таким образом, чтобы уменьшить колебание производительности, так как в противном случае возрастает разнотолщинность пленки, вызывающая нарушение процесса ориентации и охлаждения.

Длина зоны дозирования экструдера должна быть около $8-10 D$ (D — диаметр шнека), чтобы обеспечить высокое давление и выравнивание температуры расплава по сечению. При увеличении длины шнека также улучшается перемешивание расплава и повышается гомогенизация. Температура выходящего расплава задается несколько выше, чем при производстве труб и зависит от марки полимера. Рассчитывают температуру с использованием реологической номограммы (см. рис. 5.48).

Чистота вращения шнека и его геометрические размеры выбирают в зависимости от ширины и толщины пленки и максимально допустимой скорости отвода пленки. При этом максимальная производительность экструдера может быть найдена по уравнению (5.105).

Для изменения степени гомогенизации экструзионные машины при производстве пленок целесообразно оборудовать дроссельным устройством. При уменьшении сечения канала в дросселе повышается давление в цилиндре и соответственно степень гомогенизации расплава.

Следует отметить, что при изготовлении пленок к выбору технологического режима работы экструдера и точности регулирования параметров предъявляются более высокие требования, чем при производстве труб.

5.3.2. Формование рукава

Придание расплаву полимера конфигурации цилиндра (рукава) осуществляется в формующих кольцевых головках. Наиболее часто для формования пленки используют угловые головки с боковым подводом расплава и каплеобразным распределителем на дорне (рис. 5.51, *a*). Расплав из патрубка подводится к дорнодержателю 4, разделяется на два потока, огибающих его с двух сторон, а затем течет, поворачиваясь вдоль оси головки. На некотором расстоянии после поворота каналы расширяются, и расплав переходит в сплошной кольцевой канал, образованный дорном 2 и корпусом 1. Схема течения расплава вокруг дорна показана на рис. 5.51, *б*. В данной конструкции головки при слиянии потоков образуются два шва (линии спаев), которые ослабляют прочность пленки и ухудшают ее внешний вид. Обычно такие головки применяют в том случае, когда пленка разрезается на два полотна и кромки с линиями спаев срезаются.

Регулирование разнотолщинности пленки проводится смещением формующего кольца *б* винтами *в*. Поскольку смещение должно осуществляться с большой точностью, то применяют винты с мелкой резьбой или дифференциальные (рис. 5.52). Формующее кольцо 7 перемещается между фланцем *б* и корпусом 1 с помощью резьбо-

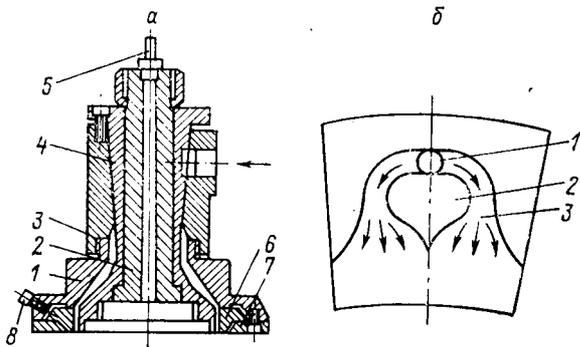


Рис. 5.51. Угловая формирующая головка с каплеобразным распределителем расплава
a — головка в разрезе; 1 — корпус; 2 — дорн; 3 — корпус патрубку; 4 — дорнодержатель; 5 — ниппель; 6 — мундштук; 7 — фланец; 8 — винт;
б — схема распределения расплава по периметру (развертка дорна): 1 — отверстие патрубку; 2 — каплеобразный распределитель; 3 — разводящие каналы.

вой втулки 4, которая одновременно движется по резьбе винта 5. При вворачивании втулка 4 перемещается относительно корпуса на шаг t_1 , а поскольку при этом происходит свинчивание ее с винта 5, имеющего другой шаг резьбы t_2 , то мундштук перемещается относительно корпуса на расстояние $S = t_1 - t_2$. Шаг нарезки втулки и шаг нарезки винта обычно отличаются на 0,25 мм, поэтому за полный оборот втулки мундштук смещается относительно дорна на 250 мкм. Для удобства регулирования винт 5 закрепляется неподвижно во вкладыше 3, а шаг резьбы на втулке должен быть больше, чем на винте: $t_1 > t_2$. Чтобы исключить перекося винтов при смещении мундштука, в нем делают пазы, в которые вставляют вкладыши 3.

В головках с боковым подводом расплава конструкция распределительных каналов обуславливает различные скорости течения,

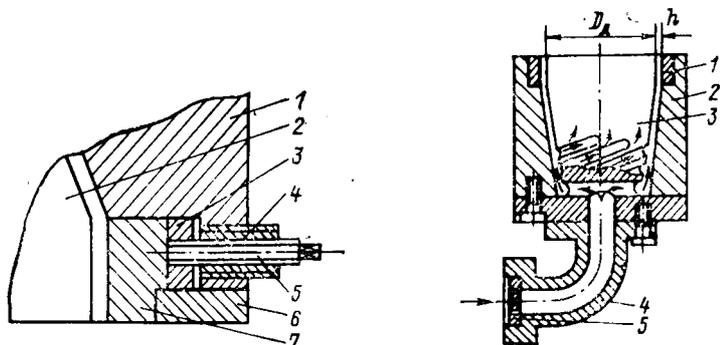


Рис. 5.52. Регулирование разнотолщинности дифференциальными винтами:
 1 — корпус; 2 — дорн; 3 — вкладыш мундштука; 4 — регулирующая втулка; 5 — винт;
 6 — фланец; 7 — мундштук.

Рис. 5.53. Формирующая головка с радиальным распределением расплава на дорне:
 1 — формирующее кольцо; 2 — корпус; 3 — дорн; 4 — патрубок; 5 — решетка фильтра.

так как по внутренней и по внешней траектории расплав совершает различный путь (см. рис. 5.51, б). Чтобы выравнять потоки, распределительные каналы, изготавливают различной глубины, что усложняет конструкцию. В угловых головках с коллекторным распределением расплава аналогично трубной, показанной на рис. 5.27, этот недостаток частично ликвидируется, однако несимметричность каналов сохраняется.

Более равномерное распределение достигается при использовании цилиндрической решетки дорнодержателя (см. рис. 5.26) или головок с радиальными распределительными каналами (рис. 5.53). Расплав из углового патрубка 4 течет по центральному осевому каналу, а затем разделяется на несколько радиальных потоков, которые переходят в спиральные винтовые каналы переменной глубины, вследствие чего ликвидируются линии спаев и обеспечивается симметричность потоков. В данном случае использованы преимущества головок двух вариантов (см. рис. 5.25 и 5.26).

Технологические расчеты головок включают определение диаметра дорна D_d и радиального зазора h . Используя коэффициенты вытяжки и раздувания, а также размеры пленки, находим:

$$h = \delta_{\Pi} K_p K_B \quad (5.128)$$

$$D_d = B / \pi K_p \quad (5.129)$$

где δ_{Π} — толщина пленки; K_p и K_B — коэффициент раздува и вытяжки; B — ширина пленки (периметр рукава).

Коэффициенты вытяжки и раздува соответственно равны:

$$K_B = v_{\Pi} / v_0 \quad (5.130)$$

$$K_p = D_{\Pi} / D_d \quad (5.131)$$

где v_{Π} и v_0 — скорость движения пленки и экструдата; D_{Π} — диаметр пленочного рукава.

Длина формирующих элементов пленочных головок в первую очередь влияет на мутность пленок. Так, при малой длине каналов, если при этом также изменяется площадь их сечения, на входе возникают значительные напряжения сдвига, которые обуславливают периодический срыв расплава или появление шероховатости (явление эластической турбулентности). При увеличении длины формиющего канала напряжения сдвига частично релаксируют и мутность пленки уменьшается (рис. 5.54). Для расчета длины формиющего канала можно использовать уравнение (5.107).

На качество пленки оказывает также влияние фильтрующий пакет (размеры отверстий и число сеток). Для улучшения качества необходимо использовать сетки с более мелкими отверстиями, однако они быстрее забиваются и требуют частой очистки или замены сеток. Число сеток и их размеры выбираются экспериментально в зависимости от требований, предъявляемых к пленке, вязкости и степени чистоты полимера. Ориентировочно сетки,

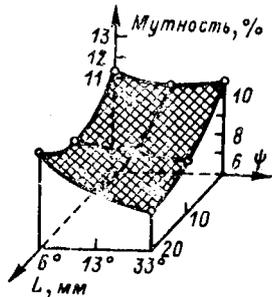


Рис. 5.54. Влияние длины формирующих каналов L и угла входа ψ на мутность пленки из полиэтилена.

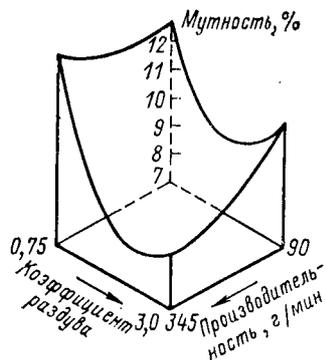


Рис. 5.55. Влияние производительности экструдера и коэффициента раздува на мутность пленки.

применяемые для набора фильтрующего пакета, должны иметь ледующие размеры:

Тип сетки	Крупная	Средняя	Мелкая
Диаметр проволоки, мм	0,37	0,16	0,052
Размер ячеек, мкм	560	250	75
Число ячеек, шт/см ²	144	576	6400
Поверхность в свету, %	34	37	34

Число мелких сеток подбирается в зависимости от перепада давления на фильтрующем пакете, которое не должно быть более 3--5 МПа.

Из технологических параметров наиболее сильное влияние на качество пленки оказывают температура и скорость течения расплава, а также коэффициент раздува. Так при увеличении температуры расплава мутность пленки понижается и тем сильнее, чем толще пленка. Подобную зависимость можно объяснить тем, что при повышении температуры снижаются напряжения сдвига, а соответственно возрастает поверхностный блеск пленки, так как уменьшаются явления «дробления струи»; кроме того, видимо, изменяются также условия кристаллизации. При увеличении скорости течения расплава (производительности экструдера) мутность пленки возрастает, однако при большом коэффициенте раздува рукава эта зависимость становится обратной. Это объясняется тем, что ориентация макромолекул при растяжении сказывается на мутности пленки (уменьшает ее) значительно сильнее, чем скорость течения (рис. 5.55).

Физико-механические свойства пленок изменяются в зависимости от перечисленных параметров неоднозначно; нужно всегда рассматривать совместное влияние скорости охлаждения, степени вытяжки, раздува рукава и др.

5.3.3. Ориентация и охлаждение пленки

После выхода из головки расплав подвергается одновременной вытяжке в продольном и поперечном направлениях. Вытяжка в продольном направлении происходит за счет разности скоростей течения расплава и тянущего устройства. Коэффициент вытяжки обычно выбирается в пределах $K_v = 2 \div 3,5$. Примерно с такой же степенью происходит вытяжка расплава в поперечном направлении за счет раздува рукава сжатым воздухом. Скорость вытяжки, т. е. изменение размеров рукава во времени, зависит от скорости охлаждения, а также от коэффициентов вытяжки и раздува. Так, при медленном охлаждении расстояние от головки до линии кристаллизации сравнительно велико, поэтому рукав имеет вытянутую форму (рис. 5.56, *а*). Под линией кристаллизации понимают участок рукава, средняя температура которого равна температуре плавления полимера. При быстром охлаждении конусность рукава возрастает, т. е. линия кристаллизации приближается к головке (рис. 5.56, *б*). При этом вытяжка пленки осуществляется на более коротком участке, что приводит к увеличению скорости деформации и повышению степени ориентации макромолекул. Таким образом, изменяя скорость охлаждения, степень вытяжки и раздува, можно в широких пределах менять свойства пленок.

В зависимости от скорости деформации и температуры расплава меняется характер структурных образований. Так, при интенсивном охлаждении и большой степени вытяжки образуются кристаллы, имеющие *c*-ориентацию, т. е. ось *c* элементарной ячейки расположена вдоль направления экструзии. При медленном охлаждении кристаллиты разворачиваются и кристаллизация протекает преимущественно с ориентацией по оси *a*. При повышении температуры и толщины пленки переход к ориентации *a*-типа возрастает. В зависимости от степени и типа ориентации изменяется прочность пленки. Так, при увеличении коэффициента раздува рукава прочность в продольном направлении уменьшается, а в поперечном возрастает (рис. 5.57). Как видно из

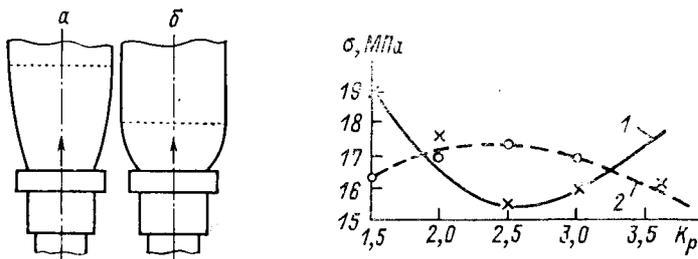


Рис. 5.56. Конфигурация пленочного рукава при медленном (*а*) и быстром (*б*) охлаждении.

Рис. 5.57. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении от коэффициента раздува рукава:

1 — вдоль направления экструзии; 2 — поперек направления экструзии.

Рис. 5.58. Обдувочное кольцо для охлаждения пленки с одним (а) и несколькими (б) воздушными потоками:

1 — нижний диск; 2 — штуцер; 3 — верхний диск; 4 — рукав пленки.

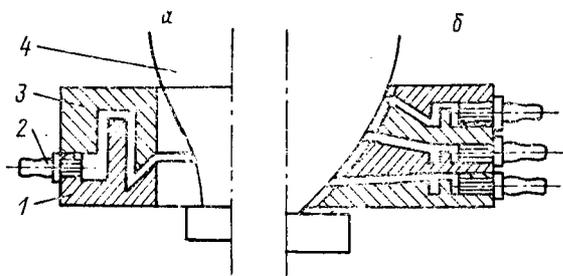


рис. 5.57 равнопрочная пленка в продольном и поперечном направлениях получается при коэффициенте раздува $K_p \approx 2$. Таким образом, численные значения K_p и K_v выбирают в зависимости от предъявляемых к пленке требований. Следует также заметить, что наряду с изменением прочности меняется относительное удлинение и разнотолщинность пленки. Разнотолщинность в основном зависит от коэффициента раздува пленки, так как растяжение расплава под действием сжатого воздуха происходит преимущественно в наиболее тонкой части. При большом коэффициенте раздува рукава незначительная несоосность дорна и мунштука может служить причиной большой разнотолщинности пленки; коэффициент раздува не должен быть выше 3.

В зависимости от скорости охлаждения изменяются степень кристалличности и размеры структур в полимере, что вызывает изменение оптических свойств пленки. При снижении скорости охлаждения расстояние до линии кристаллизации возрастает и увеличивается мутность пленки, так как в результате замедления кристаллизации происходит образование крупных кристаллических структур и уменьшается степень ориентации макромолекул.

Охлаждение пленки осуществляют преимущественно с помощью обдува рукава сжатым воздухом. Для этого используют вентиляторы или воздуходувки, соединенные плангами с обдувочным кольцом. Чтобы равномерно распределить воздух по периметру рукава, кольцо имеет лабиринтные каналы (рис. 5.58).

При производстве пленок с низкой скоростью отвода рукава применяют обдув через одну выходную щель (рис. 5.58, а). Воздух из штуцера 2 проходит через канал, образованный дисками 1 и 3. Выходную щель для воздуха направляют обычно под углом $90-45^\circ$ к поверхности пленочного рукава. Угол наклона щели зависит от давления воздуха внутри рукава и скорости струи воздуха. Если струя ударяет перпендикулярно, то может произойти деформация рукава; при уменьшении угла обдува снижается скорость охлаждения. Обычно угол обдува меньше 45° применяют при изготовлении пленки из полимеров с небольшой вязкостью или высокой температурой расплава.

Для увеличения скорости охлаждения применяют обдувочные кольца с несколькими выходными щелями (рис. 5.58, б), при

этом внутренний профиль кольца должен соответствовать профилю рукава, что способствует гидродинамической стабильности рукава при раздувании. В случае увеличения диаметра рукава зазор между кольцом и рукавом уменьшается и сопротивление выходу воздуха возрастает. В результате увеличивается давление воздуха снаружи рукава, частично компенсирующее внутреннее давление, и дальнейшее раздувание прекращается.

При одностороннем охлаждении рукава получается неоднородная по толщине пленки структура, так как кристаллизация протекает не в различных условиях. Чтобы этого не происходило и для ускорения охлаждения применяют двухсторонний обдув рукава или охлаждают воздух, находящийся внутри рукава (рис. 5.59). Рукав обдувается снаружи через кольцо 2, а внутри охлаждается воздухом, который циркулирует через водяную рубашку 5. Можно также осуществлять внутренний обдув через кольца 3, которые устанавливают над дорном головки 5 (рис. 5.60). Воздух от воздуходувки 1 подается к внутреннему обдувочному кольцу 3 через специальный теплоизолирующий воздуховод, расположенный внутри дорна 5, а из рукава воздух отсасывается воздуходувкой 7 через трубу 4. Недостатком рассмотренных схем двухстороннего охлаждения является то, что расположение внутри рукава дополнительных устройств усложняет запуск агрегата в работу, поскольку расплав при выдавливании налипает на выступающие части.

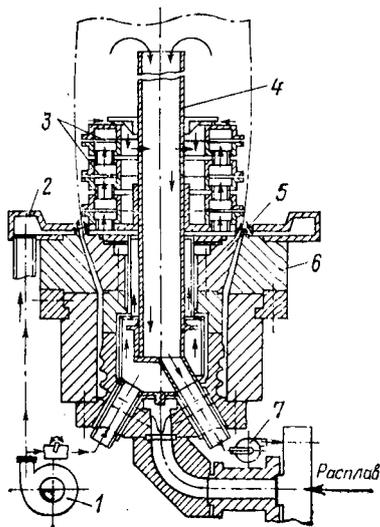
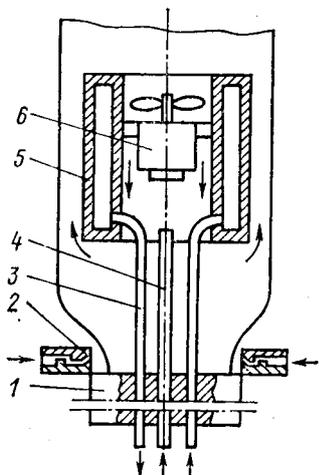
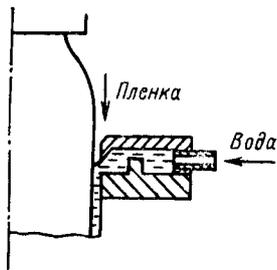


Рис. 5.59. Схема двухстороннего охлаждения при циркуляции воздуха внутри рукава: 1 — головка; 2 — обдувочное кольцо; 3 — трубка подачи воды; 4 — трубка для воздуха; 5 — водяная рубашка; 6 — вентилятор.

Рис. 5.60. Схема двухстороннего охлаждения рукава через обдувочные кольца: 1, 7 — воздуходувки; 2 — внешнее обдувочное кольцо; 3 — внутренние обдувочные кольца; 4 — труба; 5 — дорн; 6 — корпус головки.

Рис. 5.61. Охлаждение пленки водой.

При охлаждении воздухом вследствие сравнительно небольшого значения коэффициента теплоотдачи возникает значительный температурный градиент между поверхностью пленки и струей воздуха. Чтобы ускорить охлаждение, целесообразно конвективную теплопередачу заменить теплопередачей от охлаждаемой поверхности. Для этого применяют комбинированное охлаждение аналогично калиброванию труб: вначале пленка обдувается воздушной струей, а затем рукав раздувается и прижимается к охлаждаемой металлической гильзе.



Можно использовать для охлаждения рукава жидкостную пленку. Обычно для этого применяют воду, которая вытекает из специального кольца тонким слоем (рис. 5.61). Как показали расчеты, скорость охлаждения рукава стекающей пленкой воды в 1000 раз больше, чем при одностороннем воздушном охлаждении. Это позволяет резко повысить скорость отвода пленки и улучшить ее качество. Однако при таком охлаждении необходимо применять пленочные агрегаты с отводом пленки вниз, в противном случае вода может заливать формирующую головку. После отвода воды, чтобы осушить поверхность пленки, рукав обдувается струей сжатого воздуха.

Окончательное охлаждение пленки выше линии кристаллизации осуществляется атмосферным воздухом или водой. Кроме того, пленку можно дополнительно охлаждать в направляющих пластинах, установленных перед тянущими валками, в рубашку которых подается вода (см. рис. 5.50).

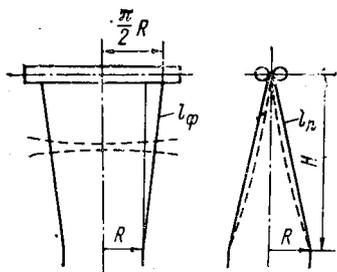
5.3.4. Намотка, упаковка и контроль качества пленки

Охлажденная пленка направляющими пластинами складывается в виде двойного полотна, захватывается тянущими валками и отводится к приемному устройству (см. рис. 5.50). При складывании пленки пластинами на рукаве могут образоваться складки, так как длина образующей на фронтальной l_{ϕ} и профильной l_{Π} ее проекциях различна (рис. 5.62). Действительно, из рис. 5.62 следует, что

$$l_{\phi} = \sqrt{H^2 + [R(\pi/2 - 1)]^2}; \quad l_{\Pi} = \sqrt{H^2 + R^2}$$

Таким образом, при плоской конструкции направляющих $l_{\phi} > l_{\Pi}$. Для исключения образования складок направляющие обычно изготавливают двояковыпуклыми в направлении к рукаву (как показано на рис. 5.62 пунктирными линиями), при этом дуга подбирается таким образом, чтобы $l_{\Pi} = l_{\phi}$. Для исключения трения и образования статического электричества направляющие

Рис. 5.62. Схема складывания рукава.



ния сваривания пленки раздувание рукава после пленка разравнивается по ширине наклонными или винтовыми направляющими роликами. Одновременно проводится также снятие статического электричества с помощью нейтрализаторов, ионизирующих воздух, или в результате увлажнения воздуха. Образование статического электричества можно снизить уменьшением сил трения пленки на направляющих роликах.

Готовая пленка наматывается в виде рулонов на специальные трубчатые оправки (бобины), изготовленные из бумаги или пластмассы. Чаще всего для этой цели используют полиэтиленовые трубы. При намотке необходимо обеспечить определенное усилие натяжения и исключить образование складок, которые образуются обычно из-за имеющейся разнотолщинности. При наматывании на бобину в месте утолщения пленки получается валик и плоскость намотки нарушается. Для предотвращения образования складок нужно постепенно утолщенное место перераспределять по ширине бобины, что достигается вращением а) формующей головки вместе с рукавом, б) приемного устройства вместе с направляющими пластинами или в) вертикально расположенного экструдера вместе с головкой.

В тех случаях, когда пленка наматывается на две бобины в виде однослойного полотна, рукав по краям обрезается дисковыми или плоскими наклонными лезвиями. Широко применяется также бескромочное разрезание рукава по линиям сгиба ножами, введенными внутрь рукава.

При изготовлении пленки проводится периодический или непрерывный контроль ее толщины по ширине и длине полотна, а также внешний осмотр с целью обнаружения геликов, посторонних включений, непрозрачности и шероховатости. При контроле толщины применяют микрометры, часовые индикаторы, а при автоматическом контроле — емкостные, индукционные или радиоактивные датчики. Прочностные и оптические показатели пленки измеряют на специальных приборах в соответствии с ГОСТами.

обтягивают ворсистой тканью или применяют воздушную подушку.

Тянущие валки располагают на такой высоте, чтобы исключить сваривание пленки по внутренней поверхности; температура внутренней поверхности пленки перед валками должна быть ниже температуры текучести полимера. При очень высоких скоростях экструзии для предотвращения

можно использовать повторное раздувание валков. Перед намоткой

Перед намоткой пленка разравнивается по ширине наклонными или винтовыми направляющими роликами. Одновременно проводится также снятие статического электричества с помощью нейтрализаторов, ионизирующих воздух, или в результате увлажнения воздуха. Образование статического электричества можно снизить уменьшением сил трения пленки на направляющих роликах.

Готовая пленка наматывается в виде рулонов на специальные трубчатые оправки (бобины), изготовленные из бумаги или пластмассы. Чаще всего для этой цели используют полиэтиленовые трубы. При намотке необходимо обеспечить определенное усилие натяжения и исключить образование складок, которые образуются обычно из-за имеющейся разнотолщинности. При наматывании на бобину в месте утолщения пленки получается валик и плоскость намотки нарушается. Для предотвращения образования складок нужно постепенно утолщенное место перераспределять по ширине бобины, что достигается вращением а) формующей головки вместе с рукавом, б) приемного устройства вместе с направляющими пластинами или в) вертикально расположенного экструдера вместе с головкой.

В тех случаях, когда пленка наматывается на две бобины в виде однослойного полотна, рукав по краям обрезается дисковыми или плоскими наклонными лезвиями. Широко применяется также бескромочное разрезание рукава по линиям сгиба ножами, введенными внутрь рукава.

При изготовлении пленки проводится периодический или непрерывный контроль ее толщины по ширине и длине полотна, а также внешний осмотр с целью обнаружения геликов, посторонних включений, непрозрачности и шероховатости. При контроле толщины применяют микрометры, часовые индикаторы, а при автоматическом контроле — емкостные, индукционные или радиоактивные датчики. Прочностные и оптические показатели пленки измеряют на специальных приборах в соответствии с ГОСТами.

5.3.5. Расчет параметров процесса

Для того чтобы перейти к расчету основных технологических параметров, рассмотрим общую задачу растяжения рукава в продольном и поперечном направлениях.

Если спроектировать все силы на ось z , то сила, действующая на пленку, F_{Π} будет уравновешена силой F_p , обусловленной растяжением расплава, составляющей силы от давления Δp , действующей на раструб рукава, и весом пленки на рассматриваемом участке (рис. 5.63). Уравнение баланса сил имеет вид:

$$F_{\Pi} = F_p \cos \psi + \pi \Delta p (R^2 - R_0^2) + 2\pi \rho g \int_0^{l_K} r \delta \sec \psi dz \quad (5.132)$$

где r , δ — текущие значения радиуса рукава и толщины пленки; g — ускорение силы тяжести; l_K — расстояние до линии кристаллизации.

Сила продольного растяжения пленки равна:

$$F_p = 2\pi r \delta \sigma_{zz} \quad (5.133a)$$

Выразим нормальное напряжение через скорости деформации при растяжении:

$$\sigma_{zz} = 2\eta_T (\dot{\epsilon}_{zz} - \dot{\epsilon}_{rr}) \quad (5.133б)$$

где η_T — вязкость расплава при сложном растяжении.

$$\eta_T = \varphi [(\dot{\epsilon}_{zz}^2 + \dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2), T_t]$$

где T_t — средняя температура по сечению пленки, изменяющаяся по времени.

$$\dot{\epsilon}_{zz} = -\frac{V \cos \psi}{2\pi r \delta} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dz} + \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dz} \right); \quad \dot{\epsilon}_{rr} = \frac{V \cos \psi}{2\pi r \delta^2} \frac{d\delta}{dz}$$

где V — объемная производительность экструдера.

С учетом записанных выражений имеем:

$$\sigma_{zz} = -\frac{\eta_T V \cos \psi}{\pi r \delta} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dz} + \frac{2}{\delta} \frac{d\delta}{dz} \right) \quad (5.134)$$

Подставив в (5.132) значение F_p из (5.133a), находим:

$$F_{\Pi} = -2\eta_T V \cos \psi \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dz} + \frac{2}{\delta} \frac{d\delta}{dz} \right) + \pi \Delta p (R^2 - R_0^2) + 2\pi \rho g \int_0^{l_K} r \delta \sec \psi dz \quad (5.135)$$

Проекция всех сил на ось r равна нулю, поэтому имеем:

$$\Delta p + \rho g \delta \sin \psi - \frac{\sigma_{zz} \delta}{R_z} - \frac{\sigma_{\theta\theta} \delta}{R_{\theta}} = 0 \quad (5.136)$$

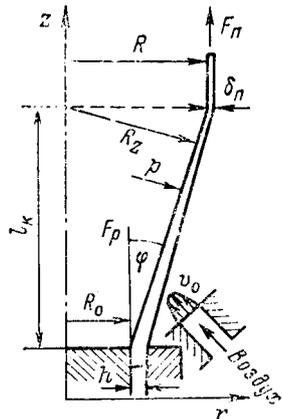


Рис. 5.63. Изменение размеров рукава в зоне вытяжки.

где R_z , R_Θ — радиусы кривизны рукава.

$$R_z = -\operatorname{sch}^3 \psi / (d^2 r / dz^2); \quad R_\Theta = r \operatorname{sch} \psi \quad (5.137)$$

Нормальное напряжение в тангенциальном направлении равно:

$$\sigma_{\Theta\Theta} = 2\eta_T (\dot{\epsilon}_{\Theta\Theta} - \dot{\epsilon}_{rr}) = \frac{\eta_T V \cos \psi}{\pi r \delta} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dz} - \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dz} \right) \quad (5.138)$$

Подставляя промежуточные значения, находим:

$$\Delta p + \rho g \delta \sin \psi + \frac{V \eta_T \cos^4 \psi}{\pi r} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dz} + \frac{2}{\delta} \frac{d\delta}{dz} \right) \frac{d^2 r}{dz^2} - \frac{V \eta_T \cos^2 \psi}{\pi r^2} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{dz} - \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dz} \right) = 0 \quad (5.139)$$

Данные уравнения содержат четыре неизвестные величины F_{II} , Δp , V и l_K , поэтому для их решения необходимо составить дополнительные уравнения. Тепловой поток при охлаждении рукава пленки на участке до линии кристаллизации q_α за счет обдува струей воздуха равен:

$$q_\alpha = 2\pi \int_0^{l_K} r_z \alpha_z \Theta_z dz \quad (5.140)$$

где r_z , α_z , Θ_z — температуры, зависящие от координаты z (расстояние вдоль оси рукава); для конического участка $r_z = R_0 + z \operatorname{tg} \psi$.

Разницу температур пленки и воздуха можно описать уравнением:

$$\Theta_z = (T_{\text{пл}} - T_B) + 28,5 \ln (l_K / z) \quad (5.141)$$

При обдуве рукава струей воздуха скорость воздуха v_B при изменении координаты z уменьшается, поэтому:

$$v_B = v_{\text{макс}} z^{-0,74}$$

где $v_{\text{макс}}$ — максимальная скорость струи воздуха на выходе из щели.

Между скоростью воздуха и коэффициентом теплоотдачи существует следующая связь: $\alpha_z = 3,3v_B^{1,5}$. Подставив значение v_B , находим:

$$\alpha_z = 3,3v_{\text{макс}} z^{-1,11} \quad (5.142)$$

Подобное уравнение можно записать для обдува пленки внутри рукава:

$$\alpha_z = 3,3v'_0 z^{-1,11}$$

где v'_0 — максимальная скорость струи воздуха внутри рукава на выходе из обдувочного устройства.

Тепловой поток q_α , отводимый снаружи и внутри рукава, после подстановки в уравнение (5.140) α_z и α_2 с учетом (5.141) равен:

$$q_\alpha = 6,6\pi (v'_0 + v_{\text{макс}}) \int_0^{l_K} (R_0 + z \operatorname{tg} \psi) [(T_{\text{пл}} - T_B) + 28,5 \ln (l_K / z)] z^{-1,11} dz \quad (5.143)$$

За счет отводимой теплоты пленка охлаждается на линии кристаллизации до температуры плавления, поэтому теплота, расходуемая на охлаждение расплава, q_p равна:

$$q_p = \rho V [(T_p - T_{пл}) c - Q_{пл}] \quad (5.144)$$

где T_p — температура расплава в головке; $Q_{пл}$ — удельная теплота плавления.

Поскольку тепловые потоки q_α и q_p равны, то, приравняв уравнения (5.143) и (5.144), находим расстояние до линии кристаллизации l_k . Кроме того, можем записать уравнение теплового потока, передаваемого от пленки к окружающему воздуху выше линии кристаллизации в результате конвекции:

$$q_k = 2\pi\alpha_0 R_{пл} l_0 (T_{пл} - T_0) \quad (5.145)$$

где l_0 — длина рукава от линии кристаллизации до направляющих пластин; $T_{пл}$ — средняя температура пленки $T_{пл} = (T_{ол} + T_{охл})/2$ — конечная температура охлажденной пленки; α_0 — коэффициент теплоотдачи от пленки к воздуху; T_0 — температура окружающего воздуха.

С учетом изменения температуры полимера тепловая мощность, затраченная на охлаждение пленки, равна:

$$q_{охл} = 2c_p \rho \pi R_{пл} \delta v_{пл} (T_{пл} - T_{охл}) \quad (5.146)$$

Таким образом, решая совместно уравнения (5.145) и (5.146), рассчитываем скорость пленки $v_{пл}$, по значению которой находим объемную производительность экструдера V . Подставив полученное значение в уравнения (5.135) и (5.139), а также приняв необходимое значение коэффициента раздува рукава, при известных размерах головки и пленки находим давление воздуха внутри рукава. При решении полученной системы уравнений используем значение температуры расплава T_p , которое находим с использованием реологической номограммы (см. раздел 5.2.6).

Расчет технологических параметров при жидкостном охлаждении рукава проводится аналогично, однако вместо уравнения (5.145) применяется решение, полученное для нестационарной теплопередачи.

Для расчета критерия Био используем коэффициент теплоотдачи α_3 , выраженный через критерий Нуссельта:

$$\alpha_3 = Nu \lambda_B / \delta_B \quad (5.147)$$

где $Nu = 0,000523 Re^{1,002} Pr^{0,344}$, $Re = 4\Gamma/\nu$; $Pr = \rho g c / \lambda_B$; δ_B — толщина слоя охлаждающей жидкости; λ_B — коэффициент теплопроводности жидкости при средней температуре; Γ — плотность орошения, $\Gamma = V_B / 2\pi R_{пл}$ (V_B — расход охлаждающей жидкости); μ и ν — коэффициенты динамической и кинетической вязкости жидкости; c — удельная теплоемкость жидкости.

Относительное значение температуры Θ определяется из соотношения:

$$\Theta = (T_{охл} - T_B) / (T_{пл} - T_B)$$

где T_B — температура охлаждающей воды.

Скорость отвода пленки рассчитываем по значению критерия Фурье:

$$v_{пл} = a l_0 / Fo \delta_{пл}^2 \quad (5.148)$$

Таким образом, расчет основных технологических параметров производства пленки рукавным методом сводится к совместному решению системы уравнений при использовании заданных значений степени вытяжки и раздува, а также размеров головки и рукава.

5.4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛЕНКИ ЩЕЛЕВЫМ МЕТОДОМ

Процесс изготовления пленки основан на выдавливании расплава через плоскую щель формующей головки с последующим охлаждением и намоткой полотна в рулон. В отличие от рукавного метода, в данном случае расплав выдавливается в виде плоского полотна, ширина и толщина которого обусловлены размерами формующей головки. Для охлаждения полотна применяются валки или жидкость, чаще всего вода. Благодаря плоской конфигурации расплав сразу же после выхода из головки быстро охлаждается, что обеспечивает получение прозрачных пленок и увеличение производительности, так как пленку можно отводить с высокой скоростью.

Применяется щелевой метод для производства пленок с высокими оптическими свойствами. Этим методом можно также изготавливать пленки из маловязких расплавов полимеров, поскольку при быстром охлаждении на барабане или в водяной ванне исключается самопроизвольная вытяжка экструдата.

Недостатками метода являются невозможность изготовления пленок большой ширины, сравнительно высокие отходы, так как проводится обрезка утолщенных краев полотна, а также возможность изменять ширину полотна только за счет смены формующей головки.

Процесс производства пленки щелевым методом состоит из следующих технологических операций: 1) плавление гранул и гомогенизация расплава; 2) формование полотна; 3) охлаждение пленки; 4) ориентация пленки; 5) намотка и упаковка пленки. Кроме перечисленных операций, может проводиться также предварительная обработка сырья (сушка, окрашивание, подогрев гранул) перед загрузкой его в бункер экструдера.

Технологическая схема процесса показана на рис. 5.64. Расплава из экструдера 1 выдавливается через формующую головку 2

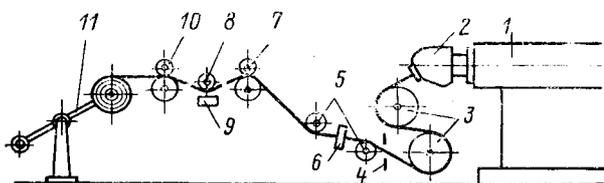


Рис. 5.64. Технологическая схема производства пленки щелевым методом с охлаждением на валке:

1 — экструдер; 2 — формующая головка; 3 — охлаждающие валки; 4 — устройство для обрезки кромок; 5 — направляющий валок; 6 — толщиномер; 7, 10 — тянущие устройства;

8 — нагревательный валок; 9 — инфракрасный нагреватель; 11 — намоточное устройство.

и поступает на охлаждающие валки 3, где подвергается двухстороннему охлаждению. Затем у пленки устройством 4 обрезаются утолщенные кромки, после чего она протягивается тянущими валками 7 и 10 и поступает в наматывающее устройство 11. В тех случаях, когда требуется ориентация пленки, тянущие валки 10 вращаются с большей скоростью, чем валки 7, вследствие чего происходит продольная вытяжка пленки. Перед вытяжкой пленка предварительно нагревается валками 8, а также инфракрасным нагревателем 9. Для поперечной ориентации между наматывающим устройством и тянущими валками 10 дополнительно устанавливается клуппное растягивающее устройство. Для контроля толщины по ширине служит толщиномер 6.

5.4.1. Плавление гранул и гомогенизация расплава

Для получения качественной пленки необходимо обеспечить однородность расплава как по физическим свойствам, так и по температуре, а также создать в цилиндре экструдера давление, за счет которого масса течет через формующую головку. Все эти параметры достигаются путем выбора определенного режима работы экструдера: температуры нагрева по зонам цилиндра и головки, частоты вращения шнека и его геометрических размеров, конструкции фильтрующего пакета и формующей головки. Как и при производстве пленки рукавным методом, расплав не должен содержать нерасплавленных частиц или быть неоднородным по структуре, так как это может повлиять на прозрачность пленки, ее блеск и прочность. Поэтому применяются шнеки с мелкой нарезкой, повышенной степенью сжатия и большой длиной в зоне дозирования.

Однородность расплава по температуре обеспечивается в основном за счет местной циркуляции у напорной грани нарезки шнека, а также благодаря давлению, возникающему при течении расплава через пакет сеток и формующую головку. При высоком давлении увеличивается время пребывания расплава в цилиндре экструдера и возрастают деформации сдвига, поэтому улучшается перемешивание и гомогенизация расплава. Профиль температуры и давления расплава по длине цилиндра, соответствующий оптимальным условиям работы экструдера, может быть найден расчетом (см. раздел 5.1).

При использовании щелевого метода пленка отводится обычно с высокой скоростью и расплав в головке течет при большой скорости сдвига, поэтому для исключения высоких перепадов давлений температуру расплава повышают. Это способствует также получению более прозрачных пленок, так как при быстром охлаждении расплава полимера образуется мелкокристаллическая структура с большим содержанием аморфной фазы. Практически температура нагревания расплава ограничивается термостойкостью полимера.

5.4.2. Формование полотна

Процесс формования пленки (полотна) осуществляется с использованием плоскощелевых головок. Расплав на выходе из головки проходит между двумя пластинами (формирующими губками), где приобретает необходимую конфигурацию, т. е. определенную толщину и ширину полотна. Поскольку расплав течет через узкую щель, для предотвращения разнотолщинности пленки необходимо обеспечивать заданный зазор между губками по ширине головки. Не должно быть и больших перепадов температуры расплава на выходе из цилиндра экструдера и по ширине головки, так как в противном случае по ширине щели появляются элементарные струи с различной вязкостью, что служит причиной неоднородности свойств и разнотолщинности пленки по ширине.

Формование пленок наиболее часто осуществляется в коллекторных головках, когда расплав из патрубка экструдера растекается по коллектору (канал расположенный по ширине), а из него перетекает в плоский формирующий зазор (рис. 5.65, а). Поскольку при течении расплава в коллекторе возникает перепад давления, выход расплава по ширине щели может быть неравномерным. Если проанализировать траектории отдельных струй течения расплава (см. рис. 5.65, б), то видно, что самый короткий путь течения от патрубка до выхода находится в центре головки. Наибольший перепад давления возникает по краям головки, поскольку расплав течет вначале по коллектору, преодолевая его сопротивление, а затем попадает в формирующий канал. При различном же перепаде давления расход расплава по ширине будет различным и это также приведет к появлению разнотолщинности.

Для выравнивания потока применяют различные устройства. Наиболее часто используют регулировочные вкладыши (см. рис. 5.65). Расплав из патрубка попадает в коллектор 9, а затем течет через плоский канал, образованный пластинами 1 и 7. В верхней плите 1 имеются гнезда, в которые вставляются вкладыши 2, плотно прилегающие друг к другу по ширине головки. Чтобы выровнять поток, центральные вкладыши 4 сдвигают по ходу движения расплава, уменьшая зазор между нижней плитой и вкладышем. При этом соответственно увеличивается сопротивление течению расплава в центре головки и расход выравнивается

по ширине. Чтобы не образовалось застойных зон, вкладыши делают обтекаемой формы. Торцовые части коллектора обычно

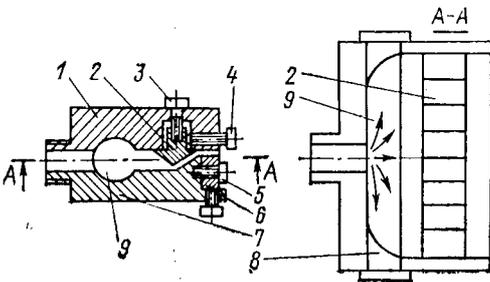
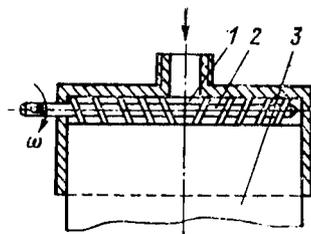


Рис. 5.65. Выравнивание потока расплава в коллекторной головке регулировочными вкладышами:

1 — верхняя плита; 2 — вкладыши; 3—5 — винты; 6 — подвижная губка; 7 — нижняя плита; 8 — вставка; 9 — коллектор.

Рис. 5.66. Распределение потока расплава в коллекторе шнеком;

1 — коллектор; 2 — шнек; 3 — полотно пленки.



закрывают вставками 8, которые плавно поворачивают поток расплава вдоль головки и исключают образование застойных зон. Для регулирования толщины пленки имеется подвижная губка 6, при смещении которой изменяется зазор щели и соответственно толщина пленки.

При изготовлении пленок из полимеров с высокой вязкостью расплава для выравнивания потока обычно применяется коллекторная головка со шнеком (рис. 5.66). В коллекторе 1 расположен шнек 2, имеющий на одной половине левую, а на второй половине правую винтовую нарезку. При вращении шнека по часовой стрелке, если смотреть со стороны привода, расплав от патрубка принудительно распределяется по коллектору к краям. Равномерность распределения расплава обеспечивается регулированием частоты вращения шнека. В некоторых случаях равномерное распределение расплава достигается изменением температуры по ширине головки, однако при этом имеет место различная степень ориентации макромолекул полимера и, следовательно, ухудшаются свойства пленки.

При получении пленок с низкой вязкостью расплава полимеров, когда перепад давления в коллекторе незначителен, выравнивание расплава осуществляется упругой губкой (рис. 5.67). Обычно центральную часть упругой губки 10 изгибают внутрь, уменьшая зазор между плитой 2 и упругой губкой 10, а по краям головки ее отгибают вверх и увеличивают глубину щели таким образом, чтобы перепады давлений по всем траекториям движения

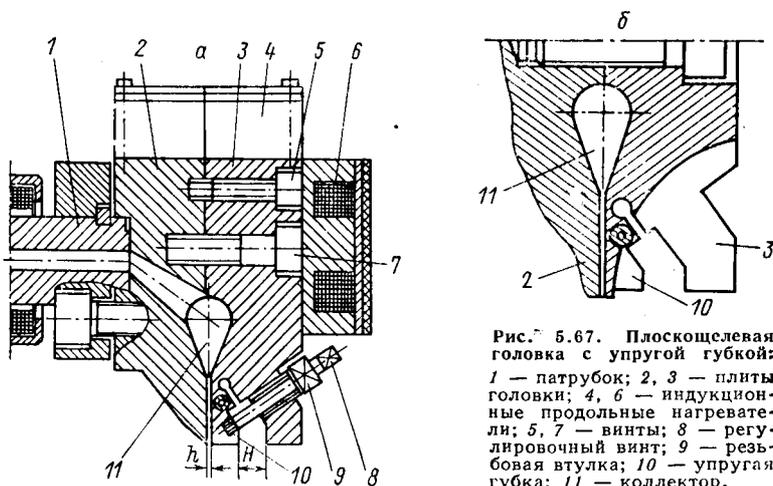


Рис. 5.67. Плоскощелевая головка с упругой губкой; 1 — патрубок; 2, 3 — плиты головки; 4, 6 — индукционные продольные нагреватели; 5, 7 — винты; 8 — регулировочный винт; 9 — резьбовая втулка; 10 — упругая губка; 11 — коллектор.

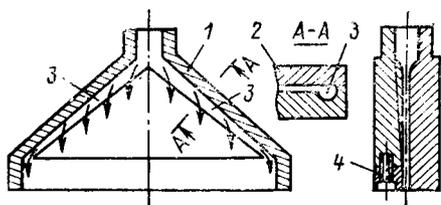


Рис. 5.68. Щелевая головка с двумя коллекторами (типа «рыбий хвост»):

1 — нижняя плита; 2 — верхняя плита; 3 — коллекторы; 4 — подвижная губка.

расплава от патрубка 1 до выхода из головки были равными. Для облегчения изгиба упругой губки 10 плита 3 по всей ширине имеет продольные

пазы (ослабленное сечение) (см. рис. 5.67, б). Таким образом плита по ширине разделена на секции, в которых установлены дифференциальные винты 8 и 9, обеспечивающие точное регулирование зазора. Упругая губка смещается относительно плиты 2, уменьшая или увеличивая формирующий зазор h . Поскольку во время работы формирующий зазор заполнен расплавом, то его ширина h определяется по изменению размера H .

Для обеспечения равномерной температуры на щелевых головках необходимо устанавливать продольные нагреватели 4 и 6, располагая их по всей ширине плит, а не секциями. При отключении продольных нагревателей не возникает перепадов температур по ширине головки, исключается появление разнотолщинности пленки.

Коллекторные головки с упругой губкой можно использовать при изготовлении пленок достаточно большой ширины, однако в этом случае внутри коллектора следует устанавливать распределительный шнек (см. рис. 5.66).

Достаточно равномерное распределение расплава обеспечивается в щелевых головках веерного типа с двумя расходящимися коллекторами (головки типа «рыбий хвост») (рис. 5.68). Расплав полимера из патрубка поступает в два коллектора переменного сечения, которые расходятся в стороны под определенным углом. Коллекторы по всей длине сообщаются с плоским каналом, поэтому расплав из них равномерно распределяется по всей ширине головки, а затем направляется в формирующий зазор. Размеры коллекторов и плоского канала рассчитывают таким образом, чтобы перепад давления при движении расплава по всем траекториям был постоянным. Толщина пленки обеспечивается изменением формирующего зазора с помощью подвижной губки 4. Изменить толщину пленки можно также за счет вытяжки экструдата тянущими валками, однако при этом появляется значительная анизотропия свойств вдоль направления экструзии и поперек пленочного полотна.

Из технологических параметров наиболее сильно на качество пленки влияет температура расплава. Как и при производстве пленки рукавным методом, чем выше температура расплава, тем меньше мутность пленки, однако при этом снижается прочность пленки при растяжении по направлению экструзии и увеличивается относительное удлинение. В поперечном направлении эти показатели изменяются незначительно. Как уже было рассмотрено

ранее, прочность пленки зависит от степени кристалличности и ориентации макромолекул. При повышении температуры вытяжка расплава происходит при более низкой вязкости, поэтому нормальные напряжения вдоль направления экструзии уменьшаются. Кроме того, снижаются напряжения сдвига при течении расплава в формирующем зазоре и происходит более быстрая их релаксация. Все это в целом обуславливает меньшую степень ориентации макромолекул и снижение прочности пленки, особенно в направлении экструзии. Следует заметить, что на процесс ориентации наиболее сильное влияние оказывает продольная вытяжка расплава. Как показали исследования, экструзия без глубокой вытяжки и закалки не сопровождается значительными ориентационными процессами и пленка обладает изотропными свойствами.

При изготовлении тонких пленок перед их охлаждением, как правило, проводят значительную вытяжку расплава, поэтому, чтобы уменьшить ориентацию макромолекул и снизить анизотропию свойств пленки, полотно формируют при высоких температурах. Получить такие пленки без вытяжки только за счет уменьшения формирующего зазора невозможно, так как в этом случае чрезмерно возрастает перепад давления в головке.

5.4.3. Охлаждение пленки

Охлаждение расплава осуществляется на валках (см. рис. 5.64) или в жидкостных ваннах. При одностороннем охлаждении расплав поступает на поверхность вращающегося валка, внутрь которого подается охлаждающая жидкость (преимущественно вода), и в полимере протекает процесс стеклования или кристаллизации. При резком охлаждении расплава возможно образование пленки, особенно для кристаллизующихся полимеров. Чтобы исключить это, в момент начала охлаждения предусматривают прижим пленки к валку, например, струей сжатого воздуха или созданием электростатического заряда. При изготовлении пленки без прижима между валками и пленкой попадает воздух, и она из-за неравномерного охлаждения становится некачественной — появляется пятнистость и кобление.

Для прижима можно использовать также подпружиненный валок (рис. 5.69). В данном случае валок 3 выполняет роль гладильно-калибровочного приспособления, поскольку он оказывает влияние на шероховатость поверхности и уменьшает разнотол-

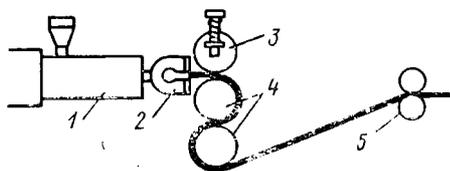


Рис. 5.69. Охлаждение пленки между двумя валками:

1 — экструдер; 2 — головка; 3 — прижимной валок; 4 — охлаждающие валки; 5 — тянущие валки.

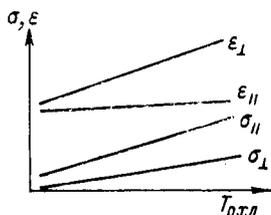


Рис. 5.70. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении σ и относительного удлинения ε пленки от температуры охлаждающего валака:

$\sigma_{||}$, $\varepsilon_{||}$ — разрушающее напряжение и относительное удлинение вдоль направления экструзии; σ_{\perp} , ε_{\perp} — то же в направлении, перпендикулярном экструзии.

щинность. Однако при значительном колебании толщины пленки по ширине на входе в валки могут появиться наплывы.

Такой же дефект возможен при большом усилии прижима, особенно когда расплав обладает небольшой вязкостью. При охлаждении пленки на валках необходимо обеспечивать равномерную температуру, поэтому на внутренней стороне валков не должно быть ребер и перегородок.

На качество пленки в основном влияют температура охлаждающего валака (рис. 5.70), расстояние его от головки и чистота обработки его поверхности. Обычно рабочую поверхность валака полируют с обеспечением 12 класса чистоты. От температуры валака и расстояния от головки до зоны охлаждения зависит главным образом скорость кристаллизации полимера. Чем ниже температура валака, тем быстрее охлаждается пленка, и кристаллизация полностью не происходит. Однако при очень резком охлаждении кристаллизующихся полимеров может появиться коробление пленки, особенно при слабом прижатии ее к поверхности валака. При переработке кристаллизующихся полимеров с понижением температуры валака уменьшается светорассеивание, поэтому пленка становится более прозрачной. С повышением температуры охлаждающей поверхности возрастают прочность при растяжении и относительное удлинение пленки (см. рис. 5.70), так как повышается степень кристалличности полимера. Однако при очень высоких температурах наблюдается прилипание пленки к охлаждающему валку и процесс ее изготовления нарушается.

При уменьшении расстояния от формирующих губок до охлаждающего валака возрастает скорость вытяжки расплава, поэтому прочность вдоль направления экструзии увеличивается, а относительное удлинение снижается. С изменением этого расстояния меняется скорость охлаждения пленки: чем меньше это расстояние, тем более резко охлаждается пленка. Прочность пленки в поперечном направлении почти не зависит от взаимного расположения охлаждающих валков и головки. Это свидетельствует о том, что основное влияние на прочность оказывает скорость вытяжки, которая изменяется пропорционально расстоянию между формирующими губками и охлаждающим валком. Обычно оно составляет 0,05—0,1 м.

При охлаждении пленки жидкостью (водой) скорость охлаждения возрастает, особенно когда жидкость тщательно перемешивается или создаются циркуляционные потоки вдоль движения пленки. В результате пленка получается более прозрачной. Поскольку пленка охлаждается одновременно с двух сторон, то структура полимера по сечению становится более равномерной

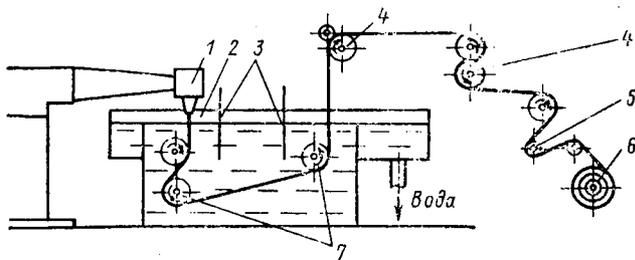


Рис. 5.71. Охлаждение пленки водой:

1 — щелевая головка; 2 — ванна с водой; 3 — перегородки; 4 — тянущие валки; 5 — компенсатор натяжения пленки; 6 — наматывающее устройство; 7 — направляющие валки.

и мелкокристаллической. Однако при формировании пленки с большой продольной вытяжкой расплава жидкостное охлаждение увеличивает анизотропию механических свойств, так как в этом случае частично происходит вытяжка расплава на участке с пониженной температурой. При охлаждении на валке этого не происходит, поскольку расплав растягивается только до линии касания к валку, а дальше движется вместе с ним за счет адгезии и прижима.

Схема охлаждения пленки жидкостью (водой) показана на рис. 5.71. Расплав из щелевой головки 1 отводится вертикально вниз и поступает в ванну с водой 2, где с помощью тянущих валков 4 протягивается через направляющие валки 7 и поступает на намотку. Расстояние от головки до уровня воды (обычно 0,05—0,1 м) подбирается с учетом скорости отвода пленки, а также предъявляемых к ней требований. Влияние этого расстояния на физико-механические и оптические свойства такое же, как и при охлаждении на валках. При больших скоростях отвода пленки на поверхности воды могут появляться волны, для гашения которых в ванне устанавливают перегородки 3. Вода с пленки на выходе из ванны удаляется с помощью тянущих валков 4 с резиновым покрытием, а затем пленка дополнительно обдувается теплым воздухом.

5.4.4. Ориентация, намотка и упаковка пленки

Процесс ориентации осуществляется вследствие глубокой вытяжки пленки в продольном и поперечном направлениях. Продольная вытяжка происходит за счет разности частот вращения нагревательных и тянущих валков (см. рис. 5.64), установленных на некотором расстоянии друг от друга. Перед вытяжкой пленка нагревается выше температуры стеклования, т. е. полимер переходит в высокоэластическое состояние. Для улучшения ориентации пленку из кристаллизующихся полимеров изготавливают при быстром охлаждении расплава, чтобы степень кристалличности полимера составляла не более 50—60 %.

Ориентация пленки проводится при определенных значениях температуры, скорости деформации и коэффициента (степени) вытяжки. (Под коэффициентом вытяжки понимают отношение окружных скоростей валков: $K_v = v_2/v_1$). Как уже говорилось в разделе 1.2, на начальной стадии ориентации начинают вытягиваться проходные участки макромолекул, расположенные в аморфных областях. Затем по мере увеличения коэффициента вытяжки происходит сдвиг отдельных ламелей, разворот их и ориентация в направлении вытяжки. Все эти процессы зависят от гибкости макромолекул и их подвижности, а следовательно, от температуры. При повышении температуры способность полимеров к вытяжке возрастает, а затем вновь снижается. При низкой температуре макромолекулы ориентируются даже при небольшой степени вытяжки, однако проводить вытяжку во избежание обрыва пленки следует при малой скорости деформации. Вытяжка при повышенной температуре позволяет повысить скорость деформации, но достигаемая при этом степень ориентации снижается.

На степень ориентации влияют также размеры кристаллических структур (сферолитов); чем они мельче, тем лучше ориентируется пленка. При малой скорости вытяжки на начальных стадиях ориентации сферолиты деформируются, удлиняются в направлении вытяжки, а ламели разворачиваются внутри сферолитов таким образом, что оси c кристаллов становятся параллельными направлению ориентации (см. рис. 1.15, *a*). При повышении температуры наряду с c -ориентацией происходит ориентация оси a кристаллов по направлению вытяжки, но при увеличении коэффициента вытяжки оси c кристаллитов вновь ориентируются преимущественно вдоль пленки. Для кристаллизующихся полимеров, таких, как полиэтилен и полипропилен, максимальная степень ориентации достигается вблизи температуры плавления.

Нагревание пленки перед ориентацией проводят с помощью нагревательных валков, инфракрасных нагревателей или конвективного теплообмена в термокамерах. Комбинированный нагрев показан на рис. 5.72. Пленка после охлаждения расплава протягивается валками 1 со скоростью v_1 , нагревается валками 2, 3 и инфракрасным излучателем 4, а затем растягивается в продольном направлении за счет разности окружных скоростей валков 1 и 6. Скорость деформации определяется расстоянием между валками 2 и 5 и разностью их окружных скоростей.

Поскольку вытяжка происходит не равномерно по всей длине, а преимущественно на участке однородного растяжения, то,

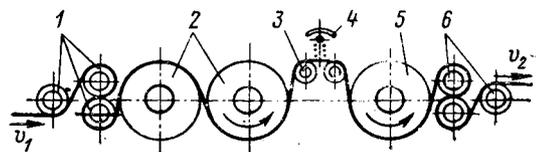


Рис. 5.72. Продольная ориентация пленки при комбинированном нагреве валками и инфракрасными излучателями: 1 — тихоходные валки; 2 — нагревательные валки; 3 — промежуточные валки; 4 — инфракрасный нагреватель; 5 — охлаждающий валок; 6 — быстроходные тянущие валки.

пренебрегая высокоэластической деформацией, можем записать:

$$\dot{\epsilon}_B = (v_2 - v_1)/l_{op}$$

Заменяв длину ориентирования l_{op} на расстояние между валками (до линий касаний пленки к валку) $l = l_{op}/g$, находим скорость деформации при продольной ориентации:

$$\dot{\epsilon}_B = (v_2 - v_1)/gl \quad (5.149)$$

где v_1 и v_2 — окружные скорости вращения валков; l — длина пленки в зоне растяжения; g — коэффициент, учитывающий неравномерность вытяжки; для лавсановой пленки $g = 0,54$.

Скорость деформации без изменения коэффициента вытяжки можно регулировать положением валков $З$ (рис. 5.72). При опускании валков скорость деформации возрастает.

При двухсторонней ориентации происходит последующее растяжение пленки в поперечном направлении. Нагретая пленка захватывается за края специальными захватами — клуппами, которые передвигаются по профильным направляющим.

Скорость деформации при поперечной ориентации зависит от скорости движения пленки и угла расположения направляющих:

$$\dot{\epsilon}_\Pi = \frac{dv_x}{dx} = \frac{2v_2 \operatorname{tg} \alpha}{B} \quad (5.150)$$

где α — угол наклона направляющих; B — ширина пленки.

Степень ориентации наиболее часто оценивают с использованием параметров «угловой» или ортогональной модели. В соответствии с угловой моделью принимают, что все сегменты макромолекул располагаются под определенным углом к направлению вытяжки, который изменяется в зависимости от степени ориентации. Для удобства расчетов степень ориентации выражают в виде функции Германса:

$$f = 0,5 (3 \cos^2 \alpha - 1) \quad (5.151)$$

При идеальной ориентации $f = 1$, а для неориентированной пленки $f = 0$.

Ортогональная модель в качестве параметра ориентации использует долю сегментов, которые направлены соответственно по осям x , y и z . Для неориентированного полимера $P_x = P_y = P_z = 1/3$. Степень ориентации находят по формуле:

$$f = 0,5 (3P_x - 1) \quad (5.152)$$

Качественные показатели пленки зависят от степени ориентации и могут быть функционально выражены через коэффициент вытяжки (рис. 5.73). Как видно из рис. 5.73, высокая степень ориентации полиэтилена при 60 °С достигается при коэффициенте вытяжки $K_B > 5$. Прочность и относительное удлинение изме-

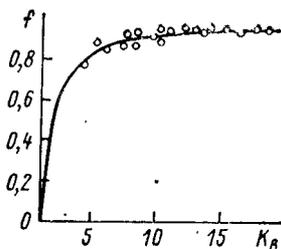


Рис. 5.73. Зависимость степени ориентации f от коэффициента вытяжки пленки из полиэтилена высокой плотности.

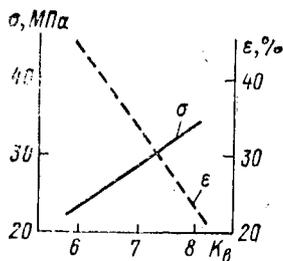


Рис. 5.74. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении σ и относительного удлинения ϵ от коэффициента вытяжки пленки из полиэтилена низкой плотности при 60°C .

няются пропорционально в зависимости от коэффициента вытяжки (рис. 5.74).

Влияние температуры ориентации на прочность пленки неоднозначно. Эта зависимость имеет максимум, а при понижении и повышении температуры ориентации от этого значения прочность падает.

Готовая пленка после обрезки кромок наматывается на бобины в виде рулонов. При намотке осуществляют равномерное разглаживание пленки по ширине и натяжение с определенным усилием. Так же, как и при намотке рукавной пленки, могут появиться складки за счет местных утолщений на рулоне, обусловленных разнотолщиной. Однако ликвидировать их практически невозможно, так как методы, используемые при производстве рукавной пленки, в данном случае неприменимы.

В процессе намотки проводится периодический контроль качества пленки — визуальный осмотр и замер разнотолщинности. Для автоматического измерения толщины применяют радиоактивный, емкостный или индуктивный толщиномер. Контроль физико-механических и оптических свойств осуществляется при испытании отобранных образцов пленки в соответствии с ГОСТами.

Глава 6

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПУСТОТЕЛЫХ ИЗДЕЛИЙ ВЫДУВАНИЕМ

Технологический процесс изготовления пустотелых изделий основан на деформации разогретых трубчатых или листовых заготовок под действием внутреннего давления и придании им с помощью формы необходимой конфигурации. Выдувание можно также проводить из заготовок, полученных на оправках литьем под давлением. Поскольку формование пустотелых изделий происходит в полости формы, то заданная конфигурация и размеры

изделия обеспечиваются только по наружной поверхности. Внутренняя полость получается несколько произвольной, так как зависит от толщины стенок отдельных элементов заготовки и степени ее раздува. Наиболее широкое применение находит выдувание изделий из трубчатых заготовок, полученных экструзией; это наиболее простой по конструктивному оформлению, легко автоматизируемый и довольно высокопроизводительный метод.

Выдуванием изготовляют емкости, бутылки, флаконы или сосуды другой произвольной конфигурации. Объем и масса изделий зависят от характеристик применяемого оборудования, т. е. могут изменяться в довольно широких пределах, например, объем — от $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $0,6 \text{ м}^3$ и более.

Этим методом обычно перерабатывают термопластичные полимеры с высокой вязкостью расплава, обладающие вязкоупругими свойствами. Наиболее часто для выдувания используют полиэтилен, полипропилен, поликарбонат, поливинилхлорид и ряд других полимеров.

6.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ВЫДУВАНИЕМ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

При данном способе получения изделий из расплава полимера методом экструзии изготавливают трубчатую заготовку, которую затем помещают в полость формы. За счет подачи внутрь заготовки сжатого воздуха происходит ее раздувание и заготовка прижимается к холодным стенкам формы, приобретая необходимую конфигурацию.

Технологический процесс состоит из следующих операций: 1) плавление и гомогенизация расплава; 2) выдавливание трубчатой заготовки; 3) смыкание формы и обрезка трубчатой заготовки; 4) формование изделия; 5) охлаждение изделия; 6) раскрытие формы и извлечение изделия. Операционная схема процесса показана на рис. 6.1. Как видно из рисунка, выдавленная трубчатая заготовка помещается между двумя полуформами, а затем с помощью механизма смыкания подвижные части формы сближаются и плотно обжимают торцы заготовки. Через ниппель внутрь заготовки подается сжатый воздух, и она раздувается (рис. 6.1, *в*).

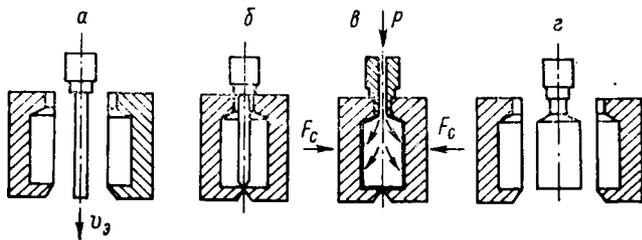


Рис. 6.1. Операционная схема изготовления изделий выдуванием из трубчатых заготовок: *а* — выдавливание трубчатой заготовки; *б* — смыкание формы; *в* — формование изделия; *г* — размыкание формы.

При этом, чтобы исключить раскрытие формы, создается усилие смыкания F_c . Отформованное изделие охлаждается стенками формы и извлекается при раскрытии формы (рис. 6.1, а).

6.1.1. Плавление гранул и гомогенизация расплава

Данная операция осуществляется в шнековых или дисковых экструзионных агрегатах. В случае применения шнековых экструдеров гранулы из бункера захватываются нарезкой шнека и, перемещаясь вдоль цилиндра, плавятся за счет теплоты от нагретых стенок и диссипации механической энергии трения. По мере движения гранулы уплотняются и создается давление. Расплавленная часть полимера благодаря сдвиговому течению перемещивается, приобретая в зоне дозирования необходимую однородность (гомогенизируется).

В тех случаях, когда агрегат работает непрерывно, процесс экструзии аналогичен рассмотренному в гл. 5. Для обеспечения непрерывной работы узел смыкания снабжается механизмом для отвода формы с захваченной (зажатой) заготовкой вниз или в сторону, чтобы в период охлаждения изделия можно было производить выдавливание последующей трубчатой заготовки. Если же форма от головки не отводится (см. рис. 6.1), то агрегат на период формования изделия и его охлаждения останавливается. В этом случае динамика процесса плавления гранул нарушается и в расчетных уравнениях (см. раздел 5.1) следует учитывать время останова шнека. Однако в настоящее время агрегаты по такой схеме практически не работают.

Несколько иная картина процесса экструзии наблюдается при использовании выдувных автоматов с отводом шнека вдоль цилиндра во время накопления порции расплава и его гомогенизации. В данном случае шнек по мере нагнетания массы отодвигается назад, преодолевая усилие подпора в гидроцилиндре агрегата. В отличие от процесса экструзии расплав в момент операции дозирования и гомогенизации не выдавливается через формующую головку, а накапливается в передней части цилиндра. При этом усилие подпора шнека играет роль противодействия в головке, благодаря которому обеспечивается необходимая степень гомогенизации массы. Накопление определенного количества расплава (дозирование) осуществляется при отводе шнека на заданное расстояние, после чего вращение его прекращается. Доза материала определяется массой трубчатой заготовки. При работе экструзионного выдувного агрегата по такой схеме изменяется длина зоны загрузки, что должно быть учтено при расчетах. Перемещение шнека вдоль цилиндра изменяет граничные условия при определении температуры расплава и производительности агрегата. При расчете производительности выдувного агрегата значение осевой скорости v'_o зависит от скорости отвода шнека v_d :

$$v'_o = v_o - v_d \quad (6.1)$$

где v_0 — скорость движения полимера вдоль оси цилиндра в зоне загрузки [см. уравнение (5.21)].

Скорость перемещения шнека равна:

$$v_d = Q/\pi R_3^2 \rho$$

где Q — производительность агрегата; R_3 — радиус цилиндра.

Используя уравнения (5.22) и (6.1), находим:

$$Q = \frac{\rho}{K_d} \left[\pi (R_3^2 - R_1^2) - \frac{eh_3}{\operatorname{tg} \varphi} \right] \omega R_{cp} (1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \omega) \sin \varphi \cos \varphi \quad (6.2)$$

где K_d — коэффициент, учитывающий осевое перемещение шнека.

$$K_d = 2 - R_1^2/R_3^2 - he/\pi R_3^2 \operatorname{tg} \varphi \quad (6.3)$$

При расчете зоны дозирования используют уравнения, рассмотренные в разделе 5.1, однако уравнение (5.81) следует решать при следующих граничных условиях:

$$\text{при } r = R_3 \quad v_z = 0; \quad \text{при } r = R_2 \quad v_z = -mG/\rho\pi R_3^2 t_d \quad (6.4)$$

где G — масса трубчатой заготовки; t_d — время дозирования полимера.

При выборе типоразмера агрегата и его производительности используется неравенство:

$$Q \geq Gm/t_b \quad (6.5)$$

где m — число формирующих каналов в головке; t_b — время выдавливания заготовки.

Время выдавливания заготовки выбирается с учетом условий, исключающих ее охлаждение окружающим потоком воздуха; обычно $t_b \leq 15$ с.

В тех случаях, когда изготавливаются крупногабаритные изделия, а производительность экструзионной машины мала, чтобы накопить большую дозу расплава и уменьшить время выдавливания заготовки, используют агрегаты с копильником (рис. 6.2). В период охлаждения изделия расплав из цилиндра 1 поступает в копильник 2, соединенный с патрубком формирующей головки 4. По мере накопления дозы расплав поступает в копильник и плунжер 3 поднимается вверх. В момент получения трубчатой заготовки расплав выдавливается в головку из копильника плунжером 3 и одновременно нагнетается шнеком из цилиндра. Вследствие этого расплав с большой скоростью выдавливается через формирующую щель головки и время получения заготовки уменьшается.

При изготовлении малогабаритных изделий, чтобы полностью использовать производительность агрегата, применяются многофильные (многоручьевые) головки. Расплав выдавливается одновременно через несколько формирующих каналов, расположенных в общем корпусе головки (рис. 6.3). Из патрубка расплав поступает в распределительный коллектор, а затем вытекает через несколько формирующих каналов. В этом случае для выравнивания скоростей течения во входных каналах всех фильер предусматривают дросселирующие краны. При таком способе формования

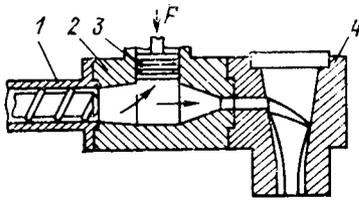


Рис. 6.2. Узел выдувного агрегата с копыльником:

1 — цилиндр экструдера; 2 — копыльник; 3 — плунжер копыльника; 4 — формирующая головка.

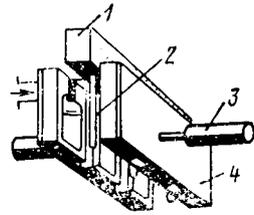


Рис. 6.3. Многооручьевая формирующая головка:

1 — корпус головки; 2 — трубчатая заготовка; 3 — цилиндр смыкания формы; 4 — многогнездная форма.

трубчатых заготовок формы также делают многогнездными. Применение многооручьевых головок повышает производительность агрегата и снижает трудоемкость.

В целом операции плавления и гомогенизации осуществляются аналогично рассмотренным ранее для процесса экструзии. Вязкость расплава должна быть такой же или несколько выше, чем при производстве труб, поэтому по зонам экструдера устанавливается соответственно меньшая температура.

6.1.2. Выдавливание трубчатой заготовки

Процесс формирования трубчатых заготовок при производстве цилиндрических изделий во многом аналогичен процессу изготовления труб. Принципиальная разница лишь в том, что заготовка выдавливается вертикально вниз без калибрования и охлаждения. Имеется и еще ряд принципиальных отличий. Так, при свободном истечении расплава происходит эластическое восстановление («разбухание»), изменяющее размеры трубчатой заготовки. Как уже было рассмотрено в разделе 2.8, коэффициент эластического восстановления зависит от скорости сдвига, вязкости расплава, длины формирующих каналов и реологических свойств полимера. Такая сложная зависимость, естественно, затрудняет расчет параметров процесса, но в то же время используется в технологии как положительное явление. Например, диаметр заготовки можно изменить, не меняя формирующей головки, а выдавливая заготовку при различных скоростях течения расплава или при различных частотах вращения дорна или мундштука.

Конструкция головки с вращающимся дорном показана на рис. 6.4. Расплав из патрубка 7 поступает в каналы между корпусом 6 и дорнодержателем 5, а затем входит в формирующий канал между дорном 3 и мундштуком 1. Дорн закреплен на валу 4 и может вращаться с различной угловой скоростью от отдельного привода. При течении расплава в канале между вращающимися элементами возникают нормальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, которые противоположны по действию нормальным напряжениям σ_{zz} .

Рис. 6.4. Угловая головка с вращающимся дорном: 1 — мундштук; 2 — корпус; 3 — дорн; 4 — вал; 5 — дорнодержатель; 6 — корпус; 7 — патрубок.

Из уравнения (2.99) следует, что с ростом тангенциальных напряжений коэффициент эластического восстановления уменьшается. Как видно из рис. 6.5, чем больше скорость сдвига в тангенциальном направлении $\dot{\gamma}_\theta$, тем меньше «разбухание». При больших значениях скорости сдвига разбухание исчезает и происходит уменьшение диаметра заготовки по сравнению с диаметром мундштука. Изменяя частоту вращения дорна в процессе выдавливания, можно получить заготовку различного диаметра по длине. Такие заготовки служат для формования изделий сложной конфигурации (например, для сосудов с узкой горловиной). Поскольку конфигурация такой заготовки соответствует форме изделия, то при смыкании формы заготовка не обрезается боковыми отжимными кромками и расход полимера уменьшается.

Диаметр трубчатой заготовки изменяется также в зависимости от длины и конусности формирующего канала. С изменением конусности меняется нормальное напряжение в тангенциальном направлении. При течении расплава в расширяющихся конических каналах макромолекулы дополнительно растягиваются в тангенциальном направлении, поэтому после выхода из головки нормальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ сужают заготовку и эластическое восстановление струи уменьшается (рис. 6.6, б и г). И наоборот, при выходе из сужающихся конических каналов диаметр заготовки увеличивается больше, чем в цилиндрических каналах (рис. 6.6, а и в), так как макромолекулы находятся в сжатом состоянии и на выходе они распрямляются, в результате повышается коэффициент эластического восстановления.

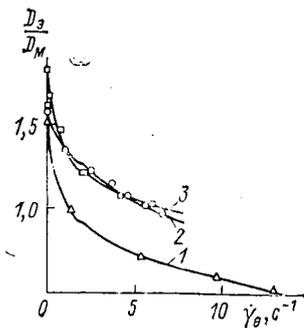
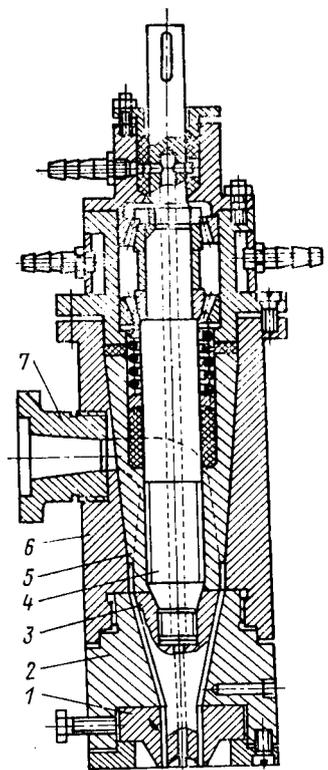


Рис. 6.5. Зависимость разбухания (отношения диаметра экструдата D_3 к диаметру мундштука D_M) от скорости сдвига в тангенциальном направлении:

- 1 — полиэтилен низкой плотности, 140 °С, $D_M = 25$ мм;
- 2 — полиэтилен низкой плотности, 140 °С, $D_M = 10$ мм;
- 3 — полиэтилен высокой плотности, 190 °С, $D_M = 10$ мм.

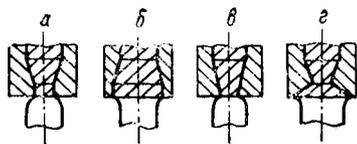


Рис. 6.6. Влияние формы канала головки на эффект эластического восстановления струи.

Для описания зависимости нормальных напряжений от конусности и реологических свойств используем уравнение (5.138). Решение проводим для случая, когда изменяется радиус дорна, а глубина канала по длине остается постоянной, т. е. $d\delta/dz = 0$. Исходя из этого имеем:

$$z\sigma_{\theta\theta} = 2\eta_p \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = -\eta_p \frac{V}{\pi h} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^2}$$

где η_p — вязкость расплава полимера при растяжении; z — расстояние вдоль оси конического канала; R_1 и R_2 — радиусы канала мундштука на входе и выходе; h — глубина канала головки; V — объемный расход расплава.

Проинтегрировав полученное выражение и заменив координату для кольцевых каналов с линейным изменением радиуса канала z длиной заготовки $z = l$, находим:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\eta_p V}{\pi h l R_2 R_1} (R_2 - R_1) \quad (6.6)$$

Определив из уравнения (2.99) коэффициенты эластического восстановления по диаметру и толщине заготовки $K_{R_{cp}}$ и K_{δ} , можем рассчитать диаметр трубчатой заготовки и ее толщину:

$$D_3 = D_M K_{R_{cp}} \quad (6.7) \quad \delta_3 = h K_{\delta} \quad (6.8)$$

где h — зазор формующего канала; D_M — диаметр мундштука головки.

Учитывая, что заготовка при выдувании изделия преимущественно увеличивается по диаметру, так как концы ее зафиксированы и вытяжки по длине не происходит, можем определить размеры формующего канала головки с учетом коэффициента раздува заготовки:

$$D_M = D_{изд} / K_{R_{cp}} K_p; \quad h = \delta_{изд} K_p / K_{\delta} \quad (6.9)$$

где K_p — коэффициент раздува, $K_p = 2-3,5$; $D_{изд}$ — диаметр изделия; $\delta_{изд}$ — толщина изделия.

Второе отличие операции выдавливания трубчатой заготовки от процесса формования труб состоит в том, что при выдавливании заготовки происходит ее вытяжка под действием силы тяжести и чем длиннее заготовка, тем с большей скоростью идет вытяжка. Самопроизвольная вытяжка служит причиной уменьшения толщины стенки и появления разнотолщинности изделия по высоте. Действие веса заготовки приводит к развитию растягивающих напряжений σ_{zz} , которые частично уравнивают нормальные напряжения, обусловленные напряжениями сдвига. В результате, когда вес заготовки велик, на верхнем участке под действием силы тяжести эластическое восстановление струи затормаживается и происходит вытяжка расплава. Чтобы уменьшить вытяжку,

понижают температуру расплава. Однако при очень низкой температуре ухудшается качество заготовки (появляется шероховатость, затрудняется свариваемость швов и уменьшается блеск), а также возрастает перепад давления в головке.

Поскольку процесс вытяжки протекает во времени, разнотолщинность заготовки зависит от скорости выдавливания расплава, вязкости, веса заготовки и напряжения сдвига. Для описания процесса вытяжки составим уравнение равновесия сил:

$$\frac{1}{2}h\pi R_{cp}(K_{R_{cp}} + 1)(K_{\delta} + 1)\rho_p g z - 2\pi R_{cp} h \sigma'_{zz} - 2\pi R_{cp} h \sigma''_{zz} \quad (6.10)$$

где σ'_{zz} — нормальные напряжения, обусловленные напряжениями сдвига при течении расплава в головке, $\sigma'_{zz} = \tau_w^2 / 4G(\psi)$; σ''_{zz} — напряжения, вызванные продольным растяжением; z — длина заготовки; g — ускорение силы тяжести; τ_w — напряжение сдвига на стенке канала; R_{cp} — средний радиус заготовки; $G(\psi)$ — модуль сдвига.

Поскольку отношение диаметра мундштука и дорна примерно равно единице, то при эластическом восстановлении и вытяжке средний радиус заготовки не изменяется. Тогда для одноосного растяжения цилиндрической оболочки можно записать:

$$\sigma''_{zz} = 2\eta_p \dot{\epsilon}_{zz} = -\eta_p \frac{V}{\pi R_{cp}} \frac{1}{\delta^2} \frac{d\delta}{dz} \quad (6.11)$$

Разделяя переменные и интегрируя, находим:

$$z \sigma''_{zz} = -\frac{\eta_p V}{\pi R_{cp}} \int \frac{d\delta}{\delta^2} + C_1$$

Постоянную интегрирования определяем при граничных условиях $z = 0$, $\delta = \delta_0$. Тогда:

$$\sigma''_{zz} = \frac{\eta_p V}{\pi R_{cp} z} \left(\frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \right) \quad (6.12)$$

Координату z заменяем длиной заготовки l , а толщину заготовки в нижней ее части $\delta = hK_{\delta}$. Подставив в (6.10) значения σ'_{zz} и σ''_{zz} , получаем скорость выдавливания заготовки v_0 :

$$v_0 = \frac{g \rho_p \delta_0 K_{\delta} l^2 (K_{R_{cp}} + 1) (K_{\delta} + 1)}{8 \eta_p (h K_{\delta} - \delta_0)} - \frac{\tau_w^2 \delta_0 K_{\delta} l}{8 G(\psi) \eta_p (h K_{\delta} - \delta_0)} \quad (6.13)$$

Из данного уравнения видно, что для обеспечения заданной разнотолщинности заготовки с уменьшением вязкости и увеличением длины заготовки скорость экструзии необходимо увеличивать.

[При расчетах разнотолщинность заготовки можно заменить разнотолщинностью изделия:

$$\Delta \delta_{изд} = \frac{h K_{\delta} - \delta_0}{K_p} \quad (6.14)$$

Рассчитав скорость экструзии с учетом допустимой разнотолщинности изделия и коэффициента раздува заготовки, можно определить производительность агрегата с учетом остальных параметров процесса:

$$Q = \pi \rho v_0 m (R_M^2 - R_D^2) \quad (6.15)$$

где R_M и R_D — радиусы мундштука и дорна головки.

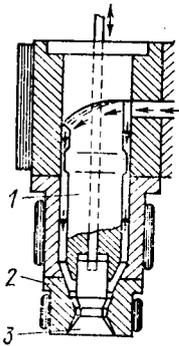


Рис. 6.7. Головка с изменяющейся глубиной формующего канала;

1 — дорнодержатель; 2 — мундштук; 3 — дорн.

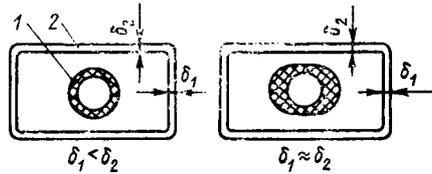


Рис. 6.8. Регулирование разнотолщинности эллипсностью мундштука;

1 — сечение заготовки; 2 — сечение детали.

При вертикальном расположении цилиндра экструдера для изготовления трубчатых заготовок можно использовать прямые трубные головки, а при горизонтальном — угловые.

Конструктивно угловые головки отличаются от трубных отсутствием удлиненного охлаждаемого дорна. В том случае, когда необходимо получить заготовки с различной толщиной стенки по длине в угловых головках дорн и мундштук изготавливают в виде конусов (рис. 6.7). При перемещении дорна 3 вдоль оси относительно мундштука 2 изменяется глубина формующего зазора и соответственно толщина трубчатой заготовки. Перемещение дорна осуществляется с помощью кулачков, механического привода или поршневой системы.

При изготовлении изделий прямоугольной формы или с несимметричным сечением также применяют головки особой конструкции. В этом случае для предупреждения разнотолщинности стенок изделия вследствие различной степени растяжения заготовки по периметру отверстие мундштука делают эллипсным (рис. 6.8). При этом его располагают таким образом, чтобы на более удаленную часть изделия приходился наибольший радиальный зазор формующего канала.

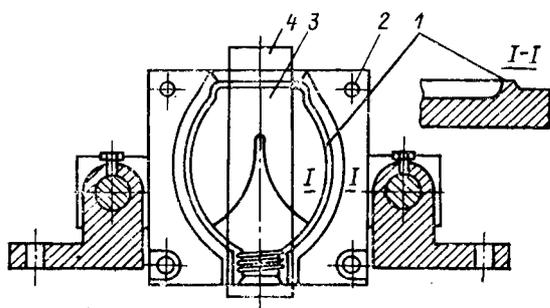
Особое значение для выдувных головок имеет или регулирование соосности дорна и формующего кольца. В случае неправильного и расположения расплав по периметру вытекает с различной скоростью, что вызывает изгиб заготовки в сторону. При смыкании формы оси заготовки и формующей полости не совпадают, в связи с чем возникает неравномерность вытяжки и на изделии появляются местные утоньшения стенок или изделие оформляется не полностью.

6.1.3. Смыкание формы и формование изделия

Полуформы закреплены на плитах узла смыкания и могут перемещаться навстречу друг другу в горизонтальном направлении. Обычно в разомкнутом состоянии полуформы подводятся к трубчатой заготовке, чтобы она расположилась симметрично

Рис. 6.9. Вид полуформы в раскрытом виде:

1 — пресс-кант; 2 — направляющая колонка; 3 — формирующая полость; 4 — трубчатая заготовка.



формирующей полости, после чего происходит их смыкание. В момент смыкания часть заготовки, выступающая за габариты формирующей полости, защемляется пресс-кантами, которые

предусмотрены по всему периметру изделия (рис. 6.9). В месте нажатия пресс-кантов под действием усилия смыкания происходит пережатие расплава, которое сваривает заготовку в виде замкнутой полости и обрезает за контуром формирующего гнезда избыток материала. Поскольку форма охлаждена, то по контуру пресс-канта образуется тонкая перемычка, по которой в дальнейшем проводится механическая доработка изделия. Толщина перемычки зависит от усилия смыкания, температуры формы и расплава, а также от ширины пресс-канта и вязкости полимера. Чем ниже температура расплава и формы, а также чем больше ширина пресс-канта, тем толще образуется перемычка. При уменьшении ширины канта улучшается обжатие заготовки и образуется тонкая перемычка, что облегчает последующее удаление приливов. Под приливом подразумевается избыток заготовки за контуром формы, который отжимается кантом. Однако при очень малой ширине канта ухудшается сваривание заготовки по дну и на боковинах, что снижает прочность изделия. Ухудшается свариваемость также при понижении температуры расплава, особенно это заметно при изготовлении заготовок с малой скоростью выдавливания. За счет длительного течения нижняя часть заготовки охлаждается воздухом, поэтому формирование ее и свариваемость затрудняются. Размеры и форму пресс-кантов обычно выбирают по справочным данным, наиболее широко применяемые из них приведены на рис. 6.10.

Усилие смыкания формы не должно допускать раскрытия формы под действием сжатого воздуха в момент формирования изделия. При этом должно соблюдаться равенство:

$$N_{\text{см}} = 1,2p_{\text{в}}F_{\text{д}}n \quad (6.16)$$

где $p_{\text{в}}$ — давление воздуха; $F_{\text{д}}$ — площадь изделия в плоскости разреза; n — гнездность формы.

В момент смыкания формы трубчатая заготовка отрезается от формирующей головки. Обрезка обычно производится ножницами или раскаленной нихромовой лентой. При движении ленты, нагретой электрическим током, в месте контакта происходит сильный перегрев расплава и получается ровный срез.

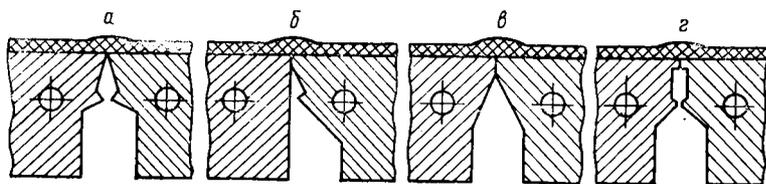


Рис. 6.10. Разновидности пресс-кантов формы.

После окончания смыкания сразу же начинается формование изделия, для чего внутрь заготовки подается сжатый воздух. Воздух обычно поступает через трубчатый ниппель, расположенный в дорне головки или в механизме узла смыкания. Если ниппель находится в головке (рис. 6.11, а), то форма после смыкания в сторону не отводится. Этот способ подвода воздуха применяется сравнительно редко, так как трудно обеспечить охлаждение ниппеля. При работе с неохлажденным ниппелем происходит налипание расплава, кроме того, процесс выдавливания заготовки должен быть периодическим.

Наиболее часто осуществляется подвод воздуха через ниппель, перемещающийся от отдельного привода. Форма после смыкания отводится вниз или в сторону, а затем в горловину ее вводится ниппель (рис. 6.11, б). При изготовлении сосудов, отверстие которых закрывается пробкой, ниппель делается ступенчатым. Будучи введенным в форму, ниппель обеспечивает ровную поверхность горловины изделия.

При формовании изделий без горловины воздух подводится внутрь заготовки через тонкую пустотелую иглу (рис. 6.12). Игла обычно располагается ближе к плоскости разъема, чтобы обеспечить прокол заготовки в момент смыкания формы. Для качественного оформления изделия воздух внутрь заготовки подается с достаточно высокой скоростью, что обеспечивает ровную поверхность и снижает разнотолщинность.

Качество изделий зависит от давления воздуха. С увеличением давления понижается шероховатость изделий и их коробление.

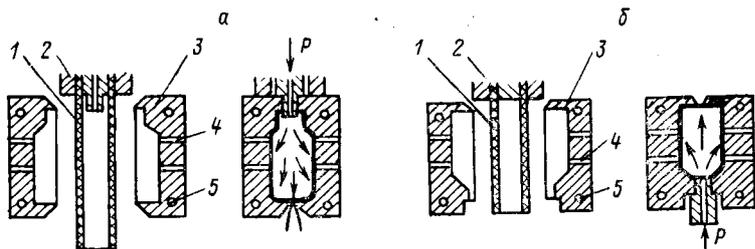


Рис. 6.11. Способы подачи воздуха через ниппель, расположенный в головке (а), и при введении ниппеля снизу (б):

1 — заготовка; 2 — формирующая головка; 3 — форма; 4 — воздушные каналы; 5 — охлаждающие каналы.

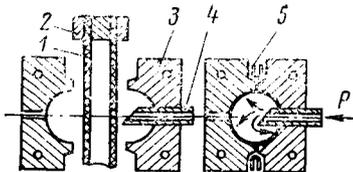


Рис. 6.12. Подвод воздуха через иглу:

1 — заготовка; 2 — головка; 3 — форма; 4 — трубчатая игла; 5 — прилив.

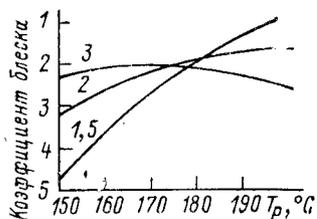


Рис. 6.13. Зависимость блеска поверхности изделия от температуры расплава при различных значениях коэффициента раздува.

Однако при чрезмерно высоком давлении требуется большое усилие смыкания формы. Минимальное значение давления воздуха может быть рассчитано по уравнению (5.125). В данном случае трение полимера о стенки отсутствует, поэтому в отличие от процесса калибрования труб давление по сравнению с расчетным можно увеличить. При высоком давлении заготовка плотно прижимается к поверхности формы и время ее охлаждения уменьшается. Обычно давление выбирается в пределах 0,2—1 МПа.

С целью удаления воздуха из полости между заготовкой и формирующей поверхностью в полуформах предусматривают воздушные каналы, просверленные в местах, где затруднен выход воздуха. Диаметр отверстий обычно составляет 1—2 мм, но не более половины толщины стенки изделия. При изготовлении малогабаритных изделий объем воздуха в полости невелик, поэтому воздух свободно удаляется в зазор между пресс-кантами на боковых стенках формы, где отсутствует пережатие расплава. Сверление в этом случае не делают.

Для того чтобы обеспечить небольшую разнотолщинность, коэффициент раздува должен быть равен $K_p = 3 \div 3,5$, при большем его значении повышается разнотолщинность изделия по периметру. С ростом коэффициента раздува увеличивается блеск изделия (рис. 6.13), особенно это заметно при повышенной температуре расплава (на рисунке 1-й класс соответствует наиболее качественному изделию). Степень раздува влияет также на усадку изделия. При увеличении коэффициента раздува усадка возрастает, что объясняется увеличением ориентации макромолекул. При охлаждении полимера конформационные переходы пропорциональны степени ориентации, поэтому размеры уменьшаются преимущественно в направлении растяжения.

При изготовлении изделий сферической или кубической конфигурации для уменьшения разнотолщинности трубчатые заготовки перед смыканием формы предварительно раздувают. Нижний конец заготовки заваривают, после чего она равномерно раздувается воздухом. При этом заготовка принимает сферическую конфигурацию. Этим достигается также сокращение расхода полимера, так как масса заготовки, срезаемая пресс-кантами в виде приливов, уменьшается.

6.1.4. Охлаждение изделия

Непосредственно после прижатия расплава к стенкам формы начинается процесс его охлаждения. Поскольку температура формы намного ниже, чем расплава, то по толщине стенки устанавливается нестационарный температурный профиль, изменяющийся во времени. При этом на стенке формы температура сохраняется почти постоянной, а на внутренней поверхности изменяется во времени от температуры расплава до значения, соответствующего охлажденному изделию. Время охлаждения зависит от толщины стенок изделия, температуры расплава и формы. Температуру формы выбирают, исходя из строения полимера и требований, предъявляемых к изделию. С увеличением температуры формы повышается блеск изделий, снижается коробление и уменьшается анизотропия свойств (рис. 6.14). Однако при этом увеличивается время охлаждения и снижается производительность агрегата.

Температура формы влияет также и на усадку. При понижении температуры в большинстве случаев усадка выдувных изделий уменьшается. Это объясняется тем, что при низкой температуре расплав охлаждается с высокой скоростью и степень кристалличности полимера снижается, следовательно, меньше изменяется и объем изделия по отношению к объему расплава. Особенно нельзя быстро охлаждать толстостенные изделия, так как возможно их коробление или появление утяжин, главным образом в утолщенных местах. Наиболее часто причиной коробления служит неравномерное охлаждение или наличие температурных полей на поверхности формы, а также разнотолщинность. Чтобы добиться равномерного охлаждения, толщина стенок изделия по возможности должна быть одинаковой. Охлаждающие каналы в форме располагают таким образом, чтобы перепад температуры по всей поверхности формирующей полости был одинаковым. В тех случаях, когда имеются местные утолщения стенок, около них предусматривают дополнительное охлаждение или охлаждающие каналы приближают к поверхности формирующей полости.

В настоящее время с целью ускорения процесса охлаждения вместо воды пытаются использовать различные хладагенты. Однако при охлаждении формы ниже 0°C на формирующих поверхностях появляется иней или конденсат (отпотевание), что может вызвать рябь или оспины на изделиях из кристаллизующихся полимеров, особенно если раздувание проводится при невысоком давлении воздуха.

Для ускорения охлаждения во внутреннюю полость изделия можно подавать смесь воздуха с водой. При таком способе охлаж-

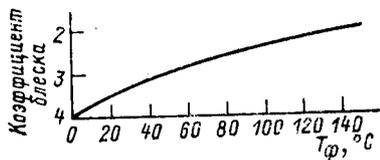


Рис. 6.14. Зависимость блеска поверхности изделия от температуры формы.

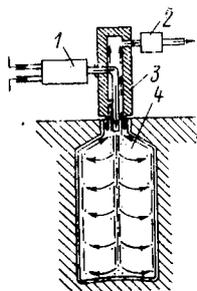


Рис. 6.15. Охлаждение внутренней поверхности изделия смесью воды и воздуха: 1 — смеситель; 2 — выпускной клапан; 3 — ниппель; 4 — изделие.

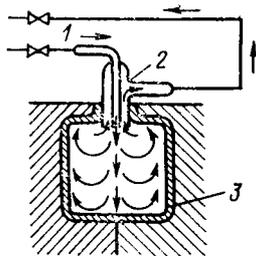


Рис. 6.16. Охлаждение внутренней поверхности изделия холодным воздухом: 1 — центральный патрубок; 2 — боковой патрубок; 3 — изделие.

дения ниппель 3 оснащается смесителем 1, в который подается вода и сжатый воздух (см. рис. 6.15). В смесителе происходит распыление воды, капельки которой попадают на внутреннюю поверхность изделия 4 и испаряются, на что расходуется значительное количество теплоты. Пары воды и воздуха из полости формы отводятся через выпускной клапан 2. При такой схеме время охлаждения уменьшается почти в 4 раза по сравнению с односторонним охлаждением.

Менее эффективен способ охлаждения внутренней поверхности изделия за счет циркуляции в его полости холодного воздуха (см. рис. 6.16). Воздух подается через центральный патрубок 1 сдвоенного сопла, омывает стенки изделия 3 и откачивается через боковой патрубок 2. Перед подачей во внутреннюю полость воздух охлаждается до -50°C , что позволяет увеличить эффективность отвода теплоты.

Для охлаждения можно использовать также жидкий азот, что, кроме сокращения длительности охлаждения, позволяет также улучшить качество изделий — повышается их стойкость к растрескиванию. Это особенно важно, если изделия предназначены для заливки в них поверхностно-активных веществ или моющих смесей.

Время охлаждения изделия при одностороннем отводе теплоты в форму $t_{\text{охл}}$ рассчитывается по уравнению:

$$t_{\text{охл}} = \frac{9,2\delta^2}{\pi^2 a} \lg \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_p - T_{\text{охл}}}{T_{\text{изд}} - T_{\text{охл}}} \right) \quad (6.17)$$

где δ — наибольшая толщина стенки изделия; $T_{\text{охл}}$ — температура охлаждаемой поверхности изделия; $T_{\text{изд}}$ — температура на внутренней поверхности изделия в конце охлаждения; T_p — температура расплава полимера.

Для обеспечения жесткости изделия и исключения его деформации после извлечения из формы принимаем, что температура в конце выдержки при охлаждении должна быть не выше температуры стеклования ($T_{\text{изд}} \leq T_c$) для аморфных полимеров

и теплостойкости по Мартенсу ($T_{\text{изд}} \leq T_{\text{м}}$) для кристаллических полимеров.

Поскольку по толщине стенки формы и на границе ее раздела с изделием возникает температурный градиент, то для расчета температуры охлаждаемой поверхности используем уравнение Винтергерста:

$$(T_{\text{р}} - T_{\text{охл}}) \sqrt{\lambda_{\text{р}} c_{\text{р}} \rho_{\text{р}}} = (T_{\text{охл}} - T_{\text{ф}}) \sqrt{\lambda_{\text{ф}} c_{\text{ф}} \rho_{\text{ф}}} \quad (6.18)$$

где $T_{\text{ф}}$ — температуры формы; $\lambda_{\text{р}}$, $c_{\text{р}}$, $\rho_{\text{р}}$ — теплопроводность, теплоемкость и плотность расплава полимера; $\lambda_{\text{ф}}$, $c_{\text{ф}}$, $\rho_{\text{ф}}$ — то же для материала формы.

Решая рассматриваемое равенство, находим:

$$T_{\text{охл}} = (T_{\text{р}} \sqrt{\lambda_{\text{р}} c_{\text{р}} \rho_{\text{р}}} + T_{\text{ф}} \sqrt{\lambda_{\text{ф}} c_{\text{ф}} \rho_{\text{ф}}}) / (\sqrt{\lambda_{\text{р}} c_{\text{р}} \rho_{\text{р}}} + \sqrt{\lambda_{\text{ф}} c_{\text{ф}} \rho_{\text{ф}}}) \quad (6.19)$$

При расчете значение температуры формы находят в табл. 7.1 или принимают ориентировочно $T_{\text{ф}} = T_{\text{изд}} - 20$. Естественно, это значение $T_{\text{ф}}$ уточняют экспериментально, так как данное уравнение не учитывает влияния скорости охлаждения на качественные показатели изделия (разрушающее напряжение, относительное удлинение, усадку и наличие остаточных напряжений).

6.1.5. Раскрытие формы и извлечение изделия

Форма раскрывается с помощью узла смыкания. Перед раскрытием формы из горловины изделия вынимается ниппель, а при автоматическом режиме одновременно отрываются приливы.

Изделия из раскрытой формы извлекаются под действием собственного веса, а в тех случаях, когда на боковых стенках возникают большие усилия, применяются толкатели (рис. 6.17). Вместо толкателей можно использовать сжатый воздух, который подается в форму через воздушные каналы в боковой стенке. При извлечении изделий толкателем в момент раскрытия формы 4 (рис. 6.17) выступающая часть толкателей 2 упирается в неподвижную плиту 5 и они останавливаются, а полуформа продолжает двигаться дальше, как бы отделяясь от изделия 3. Толкатель и изделие в момент выталкивания неподвижны, а форма относительно них перемещается. Приливы 1 выталкиваются толкателями одновременно с изделием.

Чтобы оторвать изделие от прилива, на плоскости разъема формы предусматривают замок (рис. 6.18). При смыкании формы избыток материала затекает в отверстие с обратным конусом и после охлаждения там образуется удерживающая бобышка 3. В момент раскрытия формы прилив 4 остается на полуформе 1, а изделие движется вместе со второй полуформой 5. В результате прилив 4 отрывается от изделия. При последующем движении левой полуформы 1, толкатель 2, упирается в ограничитель и бобышка 3 прилива выталкивается из гнезда. Применение подобных приспособлений снижает трудоемкость и исключает ручные

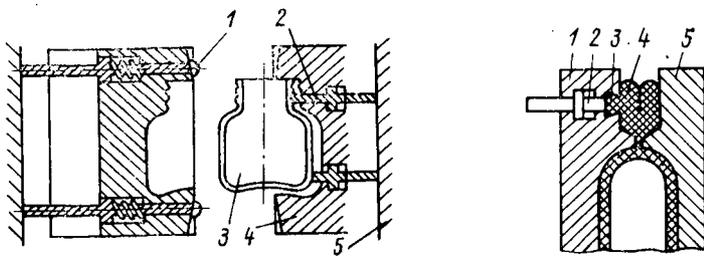


Рис. 6.17. Извлечение изделия и приливов с помощью толкателей: 1 — приливы; 2 — толкатели; 3 — изделие; 4 — форма; 5 — неподвижная плита.

Рис. 6.18. Способ отделения прилива от изделия: 1 и 5 — левая и правая полуформы; 2 — толкатель; 3 — бобышка; 4 — прилив.

операции по доработке изделий. Для отделения приливов от изделия перед раскрытием формы можно также использовать специальные захваты.

6.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ВЫДУВАНИЕМ ИЗ ЛИТЬЕВЫХ ЗАГОТОВОК

Процесс основан на выдувании тонкостенной оболочки, полученной на специальной оправке литьем под давлением. Металлическую оправку помещают в форму, которая установлена на литьевой машине, и производят отливку заготовки (оболочки). Затем оправку вынимают и помещают в форму для выдувания. Внутрь оправки подается сжатый воздух, оболочка растягивается, прижимается к стенкам формы и охлаждается.

Технологический процесс состоит из следующих операций: 1) плавление, гомогенизация и дозирование расплава; 2) установка оправки в форму для литья; 3) смыкание литьевой формы и подвод узла впрыска; 4) впрыск расплава и выдержка; 5) размыкание литьевой формы и смыкание формы для выдувания; 6) выдувание изделия; 7) охлаждение; 8) размыкание формы и извлечение изделия. Схема процесса приведена на рис. 6.19.

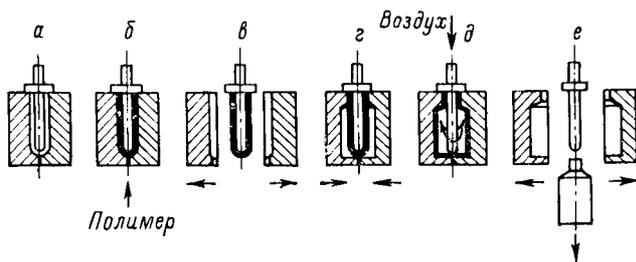


Рис. 6.19. Операционная схема изготовления изделий выдуванием из литьевых заготовок: а — смыкание литьевой формы; б — впрыск расплава; в — размыкание литьевой формы; г — смыкание формы для выдувания; д — формирование изделия; е — размыкание формы и извлечение изделия.

6.2.1. Гомогенизация и дозирование расплава

Эта операция осуществляется на литьевой машине и принципиально ничем не отличается от таковой при изготовлении трубчатых заготовок на экструзионном выдувном агрегате с отводом шнека, т. е. при периодическом накоплении расплава и последующем его выдавливании из цилиндра шнеком (см. раздел 6.1.1). При движении шнека к соплу впрыска литьевой машины создается высокое давление 80—160 МПа, поэтому вращение шнека прерывается, а для исключения обратного течения расплава по каналам нарезки на хвостовике шнека устанавливаются клапан. Кроме того, при гомогенизации расплава по зонам цилиндра литьевой машины задается более высокая температура расплава, чем при получении заготовок экструзионным методом. Это необходимо для снижения потерь давления при впрыске расплава через литниковые каналы формы и сопла. При высокой вязкости расплава большая часть давления впрыска расходуется на преодоление сопротивления течения полимера в литнике, поэтому происходит медленное заполнение формы расплавом и возможно некачественное формование оболочки.

Расчет температуры расплава аналогичен приведенному в разделе 5.2.6 с использованием реологической области литья под давлением по номограмме (см. рис. 5.48). Производительность литьевой машины при гомогенизации и дозировании расплава определяется с использованием уравнений (6.2) и (6.3).

6.2.2. Впрыск расплава и выдувание изделия

Впрыск расплава в форму осуществляется за счет перемещения шнека машины под действием усилия, создаваемого поршнем узла впрыска. Расплав под давлением, возникающим в цилиндре, течет с высокой скоростью через отверстия мундштука (сопла) и литники и впрыскивается в формующую полость, т. е. заполняет свободное пространство между оправкой и стенками формы. После заполнения формующей полости расплав под действием давления уплотняется и в таком состоянии выдерживается некоторое время. За счет холодных стенок расплав частично охлаждается, при этом к моменту размыкания формы его средняя температура должна быть несколько выше температуры плавления (текучести). Это необходимо для того, чтобы расплав обладал способностью к последующей деформации при выдувании изделия.

Процесс литья под давлением подробно описан в гл. 7, поэтому остановимся здесь лишь на рассмотрении некоторых особенностей.

В отличие от производства изделий литьем под давлением в данном случае внутренняя формующая полость формы представляет собой специальную оправку (рис. 6.20). Оправка состоит из цилиндрического корпуса 5, в который вставляется густотельный стержень клапана 6, прижимаемый пружиной 4. Стержень кла-

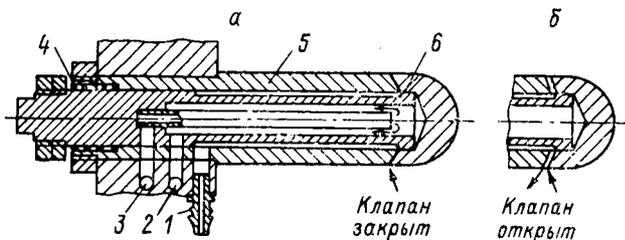


Рис. 6.20. Оправка для литья оболочки:

1 — штуцер для сжатого воздуха; 2, 3 — каналы для подачи воды; 4 — пружина; 5 — корпус; 6 — клапан.

пана имеет продольные пазы для подвода воздуха из штуцера 1, а внутрь его вставляется трубка для подачи охлаждающей воды из штуцера 3. Во время отливки оболочки клапан 6 закрыт, поэтому расплав внутрь оправки не попадает. В дальнейшем, когда происходит выдувание изделия, внутрь оправки подается сжатый воздух, пружина 4 сжимается и клапан открывается, пропуская воздух внутрь полимерной оболочки.

Для определения времени выдержки можно воспользоваться уравнением теплопередачи в нестационарных условиях (4.19). При двухстороннем охлаждении заготовки, если использовать уравнение для пластины, время выдержки t_v будет равно:

$$t_v = \frac{\delta^2}{\pi^2 a} 2,3 \lg \frac{8 (T_p - T_{охл})}{\pi^2 (T_{ср} - T_{охл})} \quad (6.20)$$

где δ — толщина оболочки; $T_{ср}$ — средняя температура расплава по толщине оболочки после выдержки оправки в форме; $T_{охл}$ — температура охлаждаемой поверхности изделия [см. уравнение (6.19)].

Средняя температура может быть принята $T_{ср} \approx T_T + 20$ и уточнена экспериментально в процессе освоения технологии.

Уточнять время выдержки необходимо, поскольку способность заготовки к выдуванию зависит также от продолжительности операции размыкания литевой формы и последующего смыкания формы для выдувания. За это время за счет более нагретой центральной части заготовки происходит нагрев поверхностных слоев и выравнивание температуры. При большой выдержке в литевой форме поверхностные слои сильно охлаждаются и заготовка не раздувается. То же происходит при малом времени между операциями размыкания литевой формы и смыкания формы для выдувания. Твердый поверхностный слой не успевает прогреться от горячих внутренних слоев, на поверхности изделия могут появиться макротрещины или заготовка плохо раздувается. Качественные изделия получаются только при определенном соотношении времени охлаждения и времени вспомогательных операций.

По окончании выдержки литевая форма размыкается, а оправку с заготовкой переносят в форму для выдувания, и форма смыкается. При работе на роторных автоматах заготовка пере-

мещается на следующую позицию, где и происходит смыкание формы для выдувания.

Операция выдувания осуществляется сжатым воздухом, который подается внутрь оправки. Под действием создаваемого усилия клапан *б* открывается (см. рис. 6.20), и воздух растягивает полимерную оболочку, плотно прижимая ее к стенкам формы; происходит оформление изделия, а затем его охлаждение.

Дальнейшие операции не отличаются от описанных в разделах 6.1.3 и 6.1.4. Время охлаждения изделий рассчитывают по уравнениям (6.17)—(6.19), однако, вместо температуры расплава T_p подставляют среднюю температуру по толщине заготовки после выдержки ее в форме: $T_{cp} = T_r + 20$.

Изделия извлекаются после раскрытия формы под действием сжатого воздуха, подаваемого в оправку, или с помощью толкателей. В последнем случае вначале из формы вынимается оправка, а затем происходит раскрытие формы и извлечение изделия.

При изготовлении пустотелых изделий выдуванием из литевых заготовок сокращается расход материала, так как отсутствуют приливы, и не требуется последующей механической доработки деталей, поскольку при смыкании формы не происходит пережатия расплава пресс-кантами. На деталях отсутствуют сварные швы, поэтому прочность их повышается и они имеют хороший внешний вид.

Преимуществом метода также является отсутствие разнотолщинности изделия как по периметру, так и по высоте, поскольку исключается вытяжка заготовки перед выдуванием. Кроме того, литевая форма может быть изготовлена с учетом несимметричности в конфигурации изделия, т. е. заготовка делается в соответствующих местах толще или тоньше в зависимости от степени ее вытяжки. К недостаткам данного метода следует отнести более высокую стоимость оборудования и увеличение длительности цикла. Поэтому для изготовления изделий выдуванием из литевых заготовок целесообразно использовать многопозиционные автоматические линии, обеспечивающие высокую производительность.

Глава 7

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Литье под давлением — наиболее распространенный и прогрессивный метод переработки пластмасс, так как позволяет получать изделия сравнительно сложной конфигурации при небольших затратах труда и энергии. Процесс изготовления изделий основан на заполнении формующей полости формы расплавом с последующим его уплотнением за счет давления и охлаждением.

Этим способом можно перерабатывать все без исключения термопластичные полимеры, вид и марки которых выбирают в зависимости от назначения изделий, прочности, теплостойкости и других свойств. Для литья под давлением обычно используют полимеры с показателем текучести расплава от 2 до 7 г/10 мин. Однако можно перерабатывать полимеры и с меньшей текучестью, но при этом требуется более высокая температура, что не всегда допустимо, так как может произойти термическая деструкция.

Физико-химические основы литья под давлением аналогичны таковым для экструзии и выдувания пустотелых изделий, однако имеются и некоторые принципиальные отличия. Так, процесс формования происходит в очень короткое время, поэтому расплав впрыскивается в форму (течет) с очень большой скоростью, что, естественно, приводит к дополнительному разогреву и значительной ориентации макромолекул. Степень ориентации повышается также за счет больших сдвиговых напряжений, возникающих в формирующей полости, при течении расплава между двумя охлаждаемыми пластинами. Очень быстрое двухстороннее охлаждение расплава приводит к сильному изменению объема, а так как полимер охлаждается снаружи, то образующийся наружный твердый слой полимера препятствует уменьшению объема, поэтому возможно появление утяжили. Для предотвращения этого необходимо перед охлаждением повышать давление в форме до 140—180 МПа. Однако охлаждение под высоким давлением затрудняет протекание релаксационных процессов и сильно изменяет условия кристаллизации. Поскольку литьем под давлением изготавливаются изделия сложной конфигурации, очень трудно обеспечить равномерное охлаждение всех их элементов. В связи с этим релаксационные процессы в отдельных местах изделия завершаются на различном уровне, а после охлаждения остаются внутренние остаточные напряжения, вызывающие коробление изделий, снижение их прочности или появление трещин.

Литье под давлением — периодический процесс, в котором технологические операции выполняются в определенной последовательности по замкнутому циклу. Поэтому процесс литья под давлением довольно просто автоматизируется с использованием простейших серийных приборов, таких, как реле времени, регуляторы давления и электронные потенциометры, а с помощью датчиков, преобразующих технологические параметры в электрические сигналы, легко может быть переключен на управление с ЭВМ. Это позволяет существенно повысить эффективность производства.

7.1. ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Технологический процесс литья изделий из термопластичных полимеров состоит из следующих операций: 1) плавление, гомогенизация и дозирование полимера; 2) смыкание формы; 3) подвод узла впрыска к форме; 4) впрыск расплава; 5) выдержка под

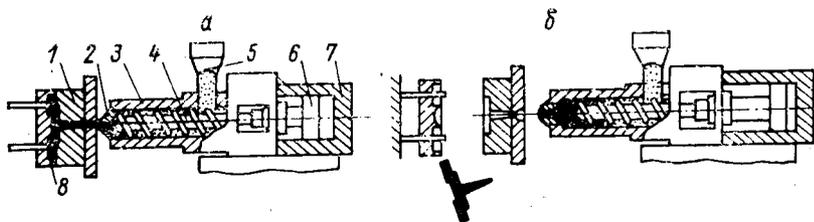


Рис. 7.1. Технологическая схема процесса литья термопластов:

а — формирование изделия, *б* — раскрытие формы и извлечение изделия; 1 — форма; 2 — сопло; 3 — цилиндр литьевой машины; 4 — шнек; 5 — бункер; 6 — поршень узла впрыска; 7 — цилиндр узла впрыска; 8 — изделие.

давлением и отвод узла впрыска; 6) охлаждение изделия; 7) раскрытие формы и извлечение изделия. Операционная схема процесса литья под давлением приведена на рис. 7.1.

В момент впрыска расплава и выдержки его под давлением (рис. 7.1, *а*) цилиндр литьевой машины 3 подведен к литьевой форме 1 и сопло 2 соединено с литниковым каналом формы. Шнек 4 под действием поршня 6 узла впрыска перемещается к форме, и расплав впрыскивается в формующую полость. Для исключения вытекания расплава из формы дается выдержка под давлением. Во время охлаждения изделия, когда расплав в литнике достаточно охлажден, узел впрыска отводится от формы (рис. 7.1, *б*) и начинается дозирование новой порции расплава, при этом шнек, вращаясь, отходит вправо. В конце операции дозирования, когда накопится определенная масса расплава, шнек останавливается. После окончания охлаждения форма раскрывается и происходит удаление изделия. Такова общая последовательность технологических операций.

7.1.1 Плавление, гомогенизация и дозирование расплава

Данная операция осуществляется периодически через равные промежутки времени и с постоянной для каждого конкретного изделия частотой вращения шнека. Плавление полимера происходит за счет передачи теплоты от нагретых стенок цилиндра, а также вследствие диссипации энергии вязкого течения расплава и трения гранул. Во время впрыска расплава шнек не вращается, поэтому нагревание гранул происходит только за счет теплопередачи. Таким образом, для расчета операция плавления при литье под давлением разбивается на два этапа нагревания — при неподвижном и вращающемся шнеке.

Операция дозирования осуществляется в результате перемещения полимера в переднюю часть цилиндра при вращении шнека. Вращение шнека включается после окончания выдержки под давлением предыдущего цикла литья и уменьшения давления в цилиндре термопластавтомата. При давлении впрыска (60—140 МПа) нагрузка на шнек очень велика и вращение его недопустимо. Дозирование сопровождается сжатием и нагреванием

гранул с последующим переходом полимера в вязкотекучее состояние. Для обеспечения хорошей гомогенизации расплава во время дозирования с помощью поршня узла впрыска на шнеке создается усилие подпора, поэтому шнеки отходят не свободно, а преодолевая давление подпора. Характер влияния давления подпора на процесс движения и гомогенизацию аналогичен рассмотренному ранее (см. раздел 5.1). Следует заметить, что давление подпора увеличивает температуру расплава и повышает ее однородность по сечению в каналах шнека. С увеличением частоты вращения шнека неоднородность расплава в его каналах возрастает, поэтому для гомогенизации расплава увеличивают усилие подпора за счет повышения давления масла в цилиндре узла впрыска. Частоту вращения шнека и температуру по зонам цилиндра определяют экспериментально или рассчитывают с учетом размеров шнека и давления подпора.

Шнеки литьевых машин конструктивно отличаются от экструзионных. Они обычно имеют меньшую длину ($L/D = 15-17$) и степень сжатия для них равна $i = 2 \div 2,5$. Это объясняется тем, что в литьевых машинах не требуется создания во время дозирования высоких давлений и не нужна очень хорошая гомогенизация, так как при впрыске происходит дополнительный нагрев расплава и он хорошо перемешивается вследствие течения в литниковых каналах. Недостаток в гомогенизации при дозировании восполняется на последующей технологической операции, т. е. при впрыске расплава в форму. Для того чтобы во время впрыска можно было создать внутри цилиндра высокое давление и исключить обратное течение расплава по каналам шнека, на хвостовике шнека устанавливают запорный клапан (рис. 7.2).

Во время дозирования расплава втулка клапана 2 отжимается расплавом от шнека 3 и полимер течет по продольным пазам между наконечником 1 и втулкой клапана 2. При впрыске (как показано на рис. 7.2) втулка прижимается к конической части хвостовика шнека, перекрывает каналы и исключает обратное течение. При переработке нетермостойких полимеров (например, жесткого поливинилхлорида) применяются шнеки без запорного клапана с удлиненным коническим наконечником. В данном случае внутреннее отверстие сопла и переходной втулки изготавливают без уступов, чтобы не возникали застойные зоны. В конце впрыска конический хвостовик шнека входит в коническое отверстие сопла, поэтому расплав почти полностью выдавливается из цилиндра, за счет чего уменьшается время его пребывания в нагретом состоянии и исключается термическая деструкция полимера. Чтобы расплав во время дозирования не вытекал из отверстия сопла, узел впрыска не отводят от формы или выходное отверстие мундштука перекрывается клапаном. Наиболее часто это осуществляется с помощью самозапирающегося сопла (мундштука) (рис. 7.3). При дозировании, когда сопло отведено от формы, расплав давит на клапан 2, смещает его влево и боковые входные отверстия перекрываются

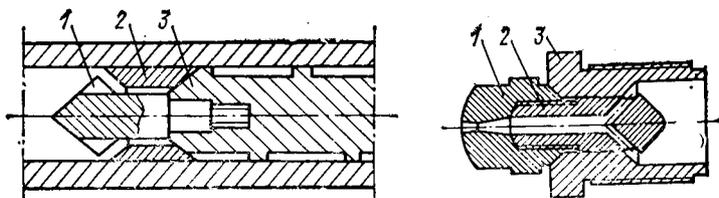


Рис. 7.2. Конструкция запорного клапана шнека:
1 — наконечник шнека; 2 — втулка клапана; 3 — шнек.

Рис. 7.3. Самозапирающееся сопло:
1 — наконечник; 2 — клапан; 3 — корпус.

корпусом 3. На рис. 7.3 клапан показан в открытом виде, когда узел впрыска подведен к форме.

Объем дозы расплава задается значением хода шнека вдоль цилиндра при его вращении за счет изменения расстояния между кулачками конечных выключателей. После того как наберется определенная порция расплава, шток при отходе назад нажимает на конечный выключатель и вращение шнека прекращается.

В отличие от экструзионных процессов температура по зонам цилиндра узла пластикации устанавливается значительно выше. Это необходимо для уменьшения вязкости расплава, чтобы в момент впрыска в отверстиях сопла и литников не возникали большие перепады давлений. Однако при очень высокой температуре на изделиях образуется облой (грат), т. е. расплав очень сильно затекает в зазоры по линии разъема формы, а это невыгодно. Поэтому температуру расплава выбирают с учетом толщины стенок изделия, площади поверхности отливки, температуры формы и реологических свойств полимера, а также в зависимости от размеров литниковых каналов и термостойкости полимера. Поскольку дозирование осуществляется во время операции охлаждения и раскрытия формы, то частоту вращения шнека рассчитывают из условия обеспечения заданной дозы материала за определенное время. При этом производительность узла пластикации должна быть равна:

$$Q_{\text{л}} \geq (nG_{\text{изд}} + G_{\text{л}})/(t_{\text{охл}} + t_{\text{р}}) \quad (7.1)$$

где $G_{\text{изд}}$ и $G_{\text{л}}$ — масса изделия и литников; n — гнездность формы; $t_{\text{охл}}$ и $t_{\text{р}}$ — время охлаждения и раскрытия формы.

Расчет частоты вращения шнека, обеспечивающей необходимую производительность, проводят по уравнениям, рассмотренным в гл. 5, с учетом поправочных коэффициентов, приведенных в уравнениях (6.3) и (6.4).

7.1.2 Смыкание формы и подвод узла впрыска

После окончания паузы, предусматриваемой по завершении операции извлечения отливки, изготовленной в предыдущем цикле, срабатывает реле времени и включается механизм смыка-

ния. Смыкание формы осуществляется в результате перемещения подвижной плиты термопластавтомата вместе с закрепленной на ней разъемной частью формы и создания определенного усилия. Усилие смыкания $N_{см}$ необходимо для исключения раскрытия формы в момент заполнения ее расплавом, оно должно быть равно:

$$N_{см} \geq p_{ф} (F_{изд} n + F_{л}) \quad (7.2)$$

где $p_{ф}$ — давление в форме, усредненное по площади отливки; $F_{изд}$ и $F_{л}$ — площадь изделия и литников в плоскости разъема формы.

В том случае, когда площадь отливки очень велика и расчетное усилие превышает максимальное усилие смыкания машины, чрезмерно возрастает упругая деформация закрывающих звеньев механизма и изделия после литья имеют толстый облой. Иногда по этой же причине может произойти раскрытие формы.

Подвод узла впрыска к форме производится отдельным механизмом, при этом сопло цилиндра упирается в литниковую втулку формы и создается необходимое давление, исключающее утечку расплава. В момент подвода узла впрыска сопло должно располагаться соосно с литниковым каналом формы. При использовании самозапирающегося сопла (см. рис. 7.3) в момент подвода узла впрыска происходит открытие клапана, так как наконечник 1 упирается в литниковую втулку и перемещает клапан 2 внутрь цилиндра. В этом положении боковые каналы клапана 2 открываются и соединяют между собой полость цилиндра с литниковыми каналами.

7.1.3. Впрыск расплава

При движении шнека вдоль цилиндра к соплу во время впрыска клапан шнека смещается, перекрывает каналы и исключает обратное течение расплава по каналам шнека. Расплав полимера под действием давления начинает течь через литниковые каналы в формующую полость формы, заполняет ее, а затем под действием давления сжимается. Так как заполнение формы происходит в течение очень короткого времени (1—3 с), эту операцию называют впрыском. Вначале расплав заполняет литниковые каналы формы, а затем формующую полость, поэтому давление постепенно повышается. Изменение давления при впрыске показано на рис. 7.4 (отрезок $0a$). Таким образом, в момент начала впрыска происходит нестационарный процесс течения, так как изменяются скорость течения и длина канала, а также температура расплава. Если не учитывать начальный период заполнения литниковых каналов, то последующее течение в литниковых каналах можно

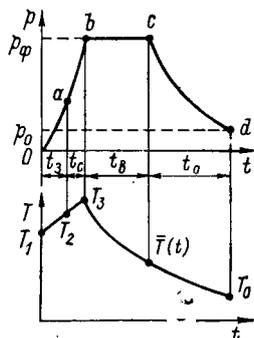


Рис. 7.4. Цикл-диаграмма процесса литья под давлением: $0a$ — заполнение формы расплавом; ab — сжатие; bc — выдержка под давлением; cd — охлаждение изделия.

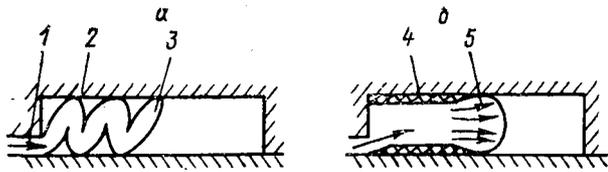


Рис. 7.5. Схема заполнения формующей полости расплавом в струйном (а) и в ламинарном (б) режимах:

1 — впускной литник; 2 — стенки формы; 3 — струя расплава; 4 — твердый слой полимера; 5 — фронт течения расплава.

с некоторым приближением считать установившимся. При этом скорость течения принимают, исходя из производительности плунжерного гидравлического насоса литьевой машины, с учетом которой объемный расход расплава через литник V_p равен:

$$V_p = V_n R_{ш}^2 / c R_n^2 \quad (7.3)$$

где V_n — объемная производительность гидравлического насоса высокого давления узла впрыска; $R_{ш}$ — радиус шнека пластикатора; c — число параллельных литниковых каналов на расчетном участке; R_n — радиус поршня узла впрыска.

В тех случаях, когда скорость впрыска регулируется, расход расплава V_p можно определить, исходя из времени впрыска t_w :

$$V_p = G / \rho_p t_w c \quad (7.4)$$

где G — масса впрыскиваемого расплава (отливки).

Время впрыска определяют по паспортным данным или экспериментально. В зависимости от скорости течения и вязкости расплава изменяется количество теплоты, выделяющейся вследствие диссипации энергии вязкого течения, и происходит дополнительный разогрев полимера. Поэтому температура после впрыска T_2 будет равна:

$$T_2 = T_1 + \frac{\Sigma \Delta p_m + \Sigma \Delta p_l}{c_p \rho_p} \quad (7.5)$$

где T_1 — температура расплава в цилиндре литьевой машины; Δp_m и Δp_l — перепады давления в каналах мундштука и литниках формы, рассчитываются по уравнениям табл. 5.1 с учетом (7.3) или (7.4); c_p — удельная теплоемкость расплава полимера.

Изменение температуры при литье под давлением показано на рис. 7.4.

Характер заполнения формы расплавом зависит от скорости впрыска и размеров формующей полости. Так, при очень высокой скорости впрыска расплав после выхода из литников движется в формующей полости вначале зигзагообразно (рис. 7.5, а), а по мере заполнения полости формы расплавом происходит уплотнение отдельных зигзагов и струйный режим переходит в ламинарный — течение сплошным потоком (рис. 7.5, б). Струйный режим возникает преимущественно в том случае, когда глубина впускного литника намного меньше формующего зазора. При литье тонкостенных изделий или впрыске расплава с невысокой

скоростью заполнение формы происходит сплошным потоком, который образуется непосредственно около впускного литника. Как в первом, так и во втором режимах заполнения расплав при соприкосновении с холодными стенками формы прилипает к поверхности и на ней появляется пленка затвердевшего полимера. С одной стороны, образование пленки несколько уменьшает глубину формующей полости, а с другой, резко снижает последующее охлаждение расплава ввиду малой теплопроводности полимера. Поскольку заполнение формы происходит с высокой скоростью, толщина образующегося твердого слоя составляет доли миллиметра и не оказывает значительного влияния на скорость течения, особенно когда литье проводится при высокой температуре расплава и формы.

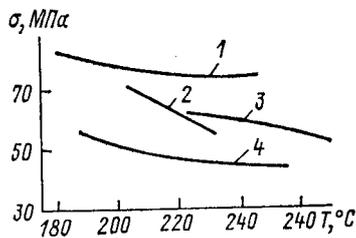
Известно, что при течении расплава наибольшее напряжение сдвига образуется на стенке [см. уравнение (2.99)]. Поскольку расплав у поверхности стенок быстро охлаждается, то релаксация напряжений затрудняется, поэтому в поверхностных слоях изделия сохраняется высокая степень ориентации макромолекул. Внутренние слои испытывают при течении меньшие напряжения сдвига и охлаждаются медленнее, поэтому в них молекулы почти не ориентированы. Таким образом, течение расплава с одновременным пристенным охлаждением обуславливает высокую степень ориентации макромолекул в формующей полости и ее неоднородность по толщине изделия. Ориентация макромолекул приводит к упрочнению изделия вдоль направления литья, однако у полимеров с жесткими цепями макромолекул вследствие неоднородности ориентации возникают большие остаточные напряжения, которые вызывают появление микротрещин или понижают прочность изделия.

Анизотропию свойств изделий можно уменьшить за счет повышения температуры расплава. При заполнении формы расплавом с повышенной температурой и, следовательно, меньшей вязкостью возникают меньшие напряжения сдвига, кроме того, ускоряются релаксационные процессы. Все это в совокупности приводит к тому, что в конце охлаждения макромолекулы полимера имеют меньшую ориентацию, чем при литье с пониженной температурой, поэтому прочность изделия в направлении литья и анизотропия свойств снижаются (рис. 7.6). Остаточные напряжения при повышении температуры также уменьшаются. Такое же влияние на степень ориентации и ее однородность по толщине изделия оказывает температура формы.

На анизотропию свойств оказывают влияние габаритные размеры

Рис. 7.6. Зависимость прочности изделия (разрушающего напряжения при растяжении) вдоль направления литья от температуры расплава:

1 — сополимер стирола с акрилонитрилом и метилметакрилатом; 2 — полиметилметакрилат; 3 — эмульсионный полистирол; 4 — блокный полистирол.



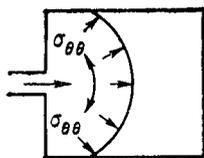


Рис. 7.7. Образование фронта расплава по ширине формующей полости формы и развитие нормальных напряжений.

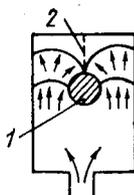


Рис. 7.8. Заполнение полости формы расплавом при наличии арматуры или формующих знаков:

1 — формующий знак; 2 — линия сая.

изделия в плоскости разъема. Так, после выхода из питающего литника расплав растекается по ширине формующей полости, при этом происходит растяжение макромолекул в тангенциальном направлении и возникают нормальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ (рис. 7.7). Чем больше площадь изделия в плоскости разъема, тем больше напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ и тем меньше анизотропия свойств изделия, так как эти нормальные напряжения уменьшают степень ориентации макромолекул в продольном и увеличивают в поперечном направлении.

На характер течения расплава оказывает также влияние наличие в формующей полости знаков или арматуры. При обтекании их поток расплава разделяется, и при слиянии этих потоков на противоположной стороне образуется линия сая (рис. 7.8). После обгибания арматуры или знака два потока встречаются друг с другом с кромкой фронта, где расплав уже частично охлажден, и дальше продолжают двигаться без взаимного перемещения, т. е. между ними отсутствует сдвиг слоев. Такой характер движения не способствует прочному соединению потоков, и изделие получается со стыковым швом, по которому при нагружении происходит разрушение. Для уменьшения влияния стыковых швов на прочность изделия литье под давлением следует проводить при высоких температурах расплава и формы, а также при повышенной скорости впрыска. Стыковые швы можно упрочнить за счет правильного подвода литника к формующей полости.

После заполнения формы полимером происходит дальнейшее увеличение давления до заданного значения и сжатие расплава, вследствие чего плотность его возрастает. До значения p_{ϕ} давление повышается в течение короткого времени (доли секунды) (см. отрезок *ab* на рис. 7.4). Давление выбирается из условия достижения необходимой плотности расплава, чтобы в процессе охлаждения не происходило значительного уменьшения объема. При недостаточном сжатии увеличивается усадка изделия и могут образовываться раковины или утяжины. Поскольку при сжатии, а также при выдержке под давлением происходит дополнительное течение расплава (подпитка), то давление в форме всегда несколько ниже, чем в цилиндре машины, что обусловлено пере-

падом давления в каналах. Однако этот перепад давления намного меньше, чем в момент заполнения формы. Среднее давление, создаваемое в форме, p_Φ можно рассчитать по уравнению:

$$p_\Phi = p_\pi (0,07/K + 0,045K + 0,72) \quad (7.6)$$

где p_π — давление расплава на выходе из литника; K — коэффициент, зависящий от размеров формирующей полости, вязкости расплава и температуры формы; $K = \varphi(X, \Phi, T_p, T_\Phi)$.

С некоторым приближением для определения коэффициента K можно применить эмпирическое уравнение:

$$K = X (170/T_2)^4 / \Phi \quad (7.7)$$

где X — длина формирующей полости от выпускного литника; Φ — средний периметр сечения формирующей полости в плоскости, перпендикулярной к направлению литья; T_p — температура расплава.

Сжатие расплава необходимо рассматривать как термодинамический процесс. Увеличение давления расплава обуславливает изменение энтальпии системы, поэтому можем записать:

$$c_p dT + dQ = \left[V_{уд}^p - T \left(\frac{dV_{уд}}{dT} \right)_p \right] dp \quad (7.8)$$

где $V_{уд}^p$ — удельный объем расплава при давлении p .

Поскольку сжатие расплава полимера происходит в очень короткое время, то потери теплоты в окружающую среду dQ малы. Выразив $V_{уд}^p$ через давление и считая, что $dQ = 0$, получаем:

$$c_p dT = V_{уд} e^{-\beta p} - T \left(\frac{dV_{уд}}{dT} \right)_p dp \quad (7.9)$$

где $V_{уд}$ — удельный объем расплава при атмосферном давлении и температуре T_2 ; β — коэффициент сжимаемости полимера:

$$\beta = RT_2 / [bM (p_\Phi + \Pi)^2 + RT_2 (p_\Phi + \Pi)]$$

Интегрируя данное уравнение, находим

$$c_p T = - \frac{V_{уд}}{\beta} e^{-\beta p} - \frac{RT}{M} \ln (p + \Pi) + C_1 \quad (7.10)$$

Постоянную интегрирования находим при граничном условии: $T = T_2$; $p = p_0$. Тогда:

$$C_1 = T_2 + \frac{V_{уд}}{\beta c_p} e^{-\beta p_0} + \frac{RT}{c_p M} \ln (p_0 + \Pi) \quad (7.11)$$

Подставив полученное значение C_1 и считая, что $p_0 = 0$, находим:

$$T - T_2 = \frac{V_{уд}}{\beta c_p} (1 - e^{-\beta p}) - \frac{RT_2}{c_p M} \ln \left(\frac{p}{\Pi} + 1 \right) \quad (7.12)$$

Значение удельного объема $V_{уд}$ можно найти, используя уравнение состояния (3.7):

$$V_{уд} = [RT_2 / M (p_0 + \Pi)] + b \quad (7.13)$$

С учетом значения $V_{уд}$ определяем температуру расплава после сжатия T_3 :

$$T_3 = \frac{1}{\beta c_p} \left(\frac{RT_2}{M\Pi} + b \right) (1 - e^{-\beta p}) - \frac{RT_2}{c_p M} \ln \left(\frac{p}{\Pi} + 1 \right) + T_2 \quad (7.14)$$

Давление можно принять равным его среднему значению в полости формы и выразить через удельное давление литья, которое с учетом (7.6) равно:

$$p_\Phi \approx (p_{уд} - \sum \Delta p'_л - \sum \Delta p'_м) (0,07/K + 0,045K + 0,72) \quad (7.15)$$

где $\sum \Delta p'_л$ и $\sum \Delta p'_м$ — перепады давлений в литниках и мундштуке во время подпитки.

С учетом потерь теплоты в форму температура расплава T_2 на противоположном от литника конце формующей полости после впрыска равна T_t . Усреднив ее по площади из уравнения (7.14) находим:

$$T_3 = \frac{1}{\beta c_p} \left(\frac{RT_2}{M\Pi} + b \right) (1 - e^{-\beta p_\Phi}) + \frac{T_2 + T_t}{2} - \frac{RT_2}{c_p M} \ln \left(\frac{p_\Phi + \Pi}{\Pi} \right) \quad (7.16)$$

Изменение температуры в процессе цикла литья показано на рис. 7.4 и зависит от диссипации энергии вязкого течения в литниковых каналах, а также от степени сжатия расплава в формующей полости.

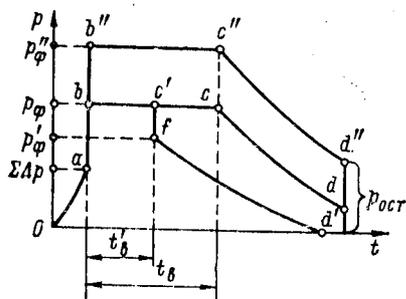
7.1.4. Выдержка под давлением

После заполнения формы расплавом происходит его охлаждение, в результате чего увеличивается плотность и уменьшается объем, занимаемый полимером. Вследствие уменьшения объема через литники в форму продолжает поступать дополнительная порция расплава и давление в ней поддерживается постоянным. Таким образом, после окончания операции впрыска наступает некоторое равновесие давлений в цилиндре машины и в формующей полости и течение переходит в медленное дополнительное нагнетание расплава (подпитку); последняя компенсирует уменьшение объема полимера в форме при его охлаждении.

Выдержка под давлением (отрезок bc на рис. 7.4) обычно продолжается до тех пор, пока расплав в центральной части впускного литника не охладится ниже температуры текучести. Так как после охлаждения литника масса расплава в формующей полости больше не изменяется (при отводе сопла вытекания расплава не происходит), исходные значения температуры и давления расплава в точке c определяют последующее изменение линейных размеров изделия при охлаждении. Чем больше выдержка под давлением, тем сильнее понижается температура расплава в формующей полости, поэтому при последующем охлаждении размеры изделия изменяются меньше. То же наблюдается при повышении давления в форме. Таким образом, выдержка под давлением компенсирует усадочные процессы, происходящие в форме, и зависит от разме-

Рис. 7.9. Цикл-диаграмма литья при различных режимах:

$0abcd$ — оптимальный режим; $0ab''c''d''$ — высокое давление в форме; $0abc'fd'$ — малая выдержка под давлением.



ров литника, температуры расплава и формы, а также от теплофизических свойств полимера. Выдержка под давлением целесообразна, пока полимер в формующей полости находится в расплаве, поэтому глубину впускного литника обычно выбирают с учетом заданной усадки, но меньше толщины стенки изделия.

При большой глубине литника время выдержки под давлением возрастает и уменьшается время, необходимое для охлаждения детали. Поскольку операция охлаждения совмещается с дозированием расплава (пластикацией), за короткий промежуток времени не успевает накопиться заданная порция расплава и необходимо будет увеличивать технологический цикл литья или повышать частоту вращения шнека, что ухудшает гомогенизацию. Поэтому не рекомендуется применять литники большого сечения. При продолжительной подпитке на расплав при его охлаждении в форме действуют напряжения сдвига, возрастает степень ориентации макромолекул и увеличивается анизотропия свойств изделия. Для предотвращения этого целесообразно заполнить форму расплавом, уплотнить его под высоким давлением, перекрыть литниковые каналы и прекратить подпитку. В этом случае течение расплава в форме прекращается и в результате релаксационных процессов происходит дезориентация макромолекул. Такой процесс можно осуществить при использовании литников с небольшой глубиной (точечные литники) или мундштуков с запорным клапаном. Однако в этом случае невозможно проводить подпитку, поэтому для уменьшения усадки изделий необходимо создавать в форме высокое давление.

Давление при выдержке рассчитывают с учетом всех технологических параметров процесса, а также размеров литников. При правильно выбранном давлении после выдержки при охлаждении в формующей полости остается некоторое остаточное давление $P_{ост}$. Если чрезмерно увеличить давление в форме (диаграмма $0ab''c''d''$ на рис. 7.9), то в конце цикла литья остаточное давление $P_{ост}$ будет очень большим. Под действием $P_{ост}$ полимер плотно прижимается к стенкам формующей полости, силы трения возрастают, поэтому затрудняется извлечение изделий из формы и при выталкивании может произойти их разрушение.

Обратная картина наблюдается при малой выдержке под давлением или создании низкого давления в форме. Если сопло машины отводится раньше, чем произойдет охлаждение расплава в литнике, полимер вытекает из формы и давление падает (диа-

грамма *Oatc'fd'* на рис. 7.9). Из-за недостаточной компенсации усадочных процессов на изделиях в этом случае появляются утяжины и раковины (пустоты) или увеличивается усадка.

7.1.5. Охлаждение изделия

Фактически охлаждение расплава начинается сразу после впрыска расплава, однако как отдельная технологическая операция охлаждение задается с помощью реле времени по окончании выдержки под давлением. Таким образом, выдержка при охлаждении необходима для окончательного затвердевания расплава полимера и достижения определенной конструкционной жесткости изделий, исключаяющей их деформацию при извлечении из формы.

Температура полимера перед размыканием формы должна быть такой, чтобы при извлечении изделия не произошло его коробления или разрушения. В процессе охлаждения температура расплава уменьшается, а так как объем остается неизменным, то давление в форме снижается (отрезок *cd* на рис. 7.9). Поскольку охлаждение происходит со всех сторон, то на поверхности формующей полости образуется твердый слой полимера, который в дальнейшем препятствует изменению объема. В отличие от производства экструзионных или выдувных изделий в данном случае дальнейший рост плотности при охлаждении происходит за счет уменьшения давления сжатого расплава, т. е. снижения давления в формующей полости.

Литьевые изделия могут иметь весьма разнообразную конфигурацию и размеры, поэтому на процесс охлаждения оказывает влияние разнотолщинность стенок, которая служит основной причиной появления остаточных внутренних напряжений. При заполнении формы расплавом там, где находится тонкая стенка, возникают большие скорости сдвига, а соответственно и высокие напряжения сдвига. На участках, где толщина стенок большая, расплав течет медленнее, поэтому и степень ориентации в этих формирующих зазорах незначительна. При последующем охлаждении расплава происходит частичная дезориентация макромолекул, однако за счет более быстрого охлаждения тонких стенок релаксация на этих участках практически не протекает и различие в ориентации усиливается. Таким образом, если изделие имеет различную толщину стенок, то после охлаждения степень ориентации будет различной и это вызовет появление остаточных напряжений. При извлечении таких изделий из формы может произойти их коробление или с течением времени образуются микротрещины. Коробление возможно и у изделий, не имеющих разнотолщинности стенок, в случае их неравномерного охлаждения. Поэтому конструкция охлаждающих каналов формы должна обеспечивать равномерное температурное поле. На коробление могут повлиять не только остаточные напряжения, но и последующая усадка неравномерно охлажденных участков. Так, при литье в форму,

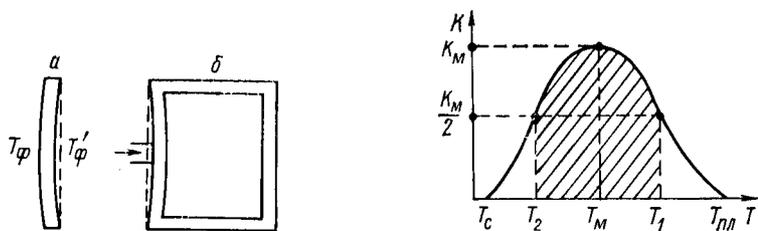


Рис. 7.10. Коробление изделий вследствие неравномерного охлаждения ($T_{\phi}' > T_{\phi}$) (а) и при неправильном расположении литника (б).

Рис. 7.11. Зависимость скорости кристаллизации от температуры полимера.

которая имеет различную температуру плит, в изделии после извлечения происходят неравномерные усадочные процессы и оно изгибается в сторону поверхности, которая была более нагретой (рис. 7.10, а). Это объясняется тем, что линейные размеры более нагретой поверхности изделия при охлаждении изменяются сильнее, чем у менее нагретой поверхности.

Зависит коробление и от расположения литника в форме (рис. 7.10, б). При литье коробчатых изделий литник, как правило, подводится к днищу. При подведении литника к боковым стенкам может произойти их коробление вследствие неодинаковой степени ориентации макромолекул. Таким образом, для получения качественных изделий необходимо создавать одинаковые условия течения расплава и равномерную скорость охлаждения. Коробление, обусловленное наличием остаточных напряжений, можно частично уменьшить за счет повышения температуры формы или расплава полимера.

На качество литьевых изделий из кристаллизующихся полимеров, кроме рассмотренных факторов, влияют также условия кристаллизации. Известно, что скорость кристаллизации зависит от температуры полимера. При температурах плавления и стеклования константа скорости кристаллизации равна нулю, а при некотором значении температуры T_M , находящемся в интервале $T_{пл} \div T_c$, она максимальна (рис. 7.11). На рис. 7.11 заштрихованная область соответствует интервалу температур $T_1 \div T_2$, при которых константа скорости кристаллизации равна половине своего максимального значения $K = K_{\max}$. Чем больше площадь, ограниченная температурами T_1 и T_2 , тем выше способность полимера к кристаллизации, оцениваемая величиной D :

$$D = K_{\max} (T_2 - T_1) \quad (7.17)$$

При охлаждении полимера размеры кристаллов определяются величиной D и скоростью охлаждения, которая зависит от температуры формы. Основные параметры кристаллизации некоторых полимеров приведены в табл. 7.1.

ТАБЛИЦА 7.1. Параметры кристаллизации некоторых полимеров

Наименование полимера	Температура, °С				
	T_c	$T_{пл}$	T_M	T_1	T_2
Полипропилен	-20	176	65	95	35
Полиэтилентерефталат	67	265	180	207	147
Полиамид П-6	45	228	146	169	123
Полиамид П-6,6	45	264	150	190	110
Полистирол (изотактический)	80	239	170	190	150
Полиэтилен высокой плотности	-21	136	—	—	—

Как видно из табл. 7.1, полупериод кристаллизации $t_{0,5}$, т. е. время, необходимое для достижения степени кристалличности 50 %, очень сильно изменяется в зависимости от строения полимера. При большом значении $t_{0,5}$ легко осуществляется регулирование процесса кристаллизации полимера. При медленном охлаждении у таких полимеров преобладает развитая кристаллическая структура, а при быстром охлаждении — аморфная. Такие полимеры, как полиэтилен и полипропилен, менее чувствительны к скорости охлаждения, так как имеют весьма малый полупериод кристаллизации, поэтому даже при очень низкой температуре формы успевают закристаллизоваться и их трудно получить в аморфной фазе.

В табл. 7.1 приведены значения температуры формы T_{ϕ} , при которых достигается равновесная степень кристалличности при литье под давлением, т. е. исключается последующая вторичная кристаллизация при комнатной температуре. Поскольку скорость охлаждения расплава по глубине формирующей полости различна, то при литье под давлением всегда образуется неоднородная структура по толщине изделия. На поверхности изделия, как правило, она мелкокристаллическая или аморфная, а к центру размеры кристаллов увеличиваются. Кроме того, могут образовываться специфические структуры, обусловленные кристаллизацией при наложении напряжений сдвига в процессе подпитки формы расплавом. В тех случаях, когда температура формы и расплава имеет пониженные значения, появляются цепочечные структуры, рассмотренные в гл. 1.

7.1.6. Раскрытие формы и извлечение изделия

После окончания операции охлаждения происходит раскрытие формы. Подвижная часть формы 3, закрепленная на плите узла смыкания, отводится, при этом изделие 4 уходит вместе с ней (рис. 7.12). Выступающая часть толкателей 2 упирается в ограничитель 1 и они останавливаются вместе с изделием 4, а подвижная часть формы 3 отводится дальше, за счет чего происходит извлече-

		$t_{0,5}, \text{ c}$	$K_M, \text{ c}^{-1}$	Скорость роста кристаллов	
$T_{\Phi_{\text{мин}}}$	$T_{\Phi_{\text{макс}}}$			$D, \text{ }^\circ\text{C/c}$	$v, \text{ мкм/c}$
30	85	1,25	0,55	33	0,334
140	190	78	$8,8 \cdot 10^{-3}$	0,53	0,167
70	120	5	0,14	6,4	2,5
70	120	0,416	1,66	133	20
—	—	185	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,15	$4,17 \cdot 10^{-3}$
40	60	0,014	49,5	—	83,4

ние изделия. Одновременно с изделием из литниковой втулки извлекается литник. Расплав при течении из центрального литника затекает в отверстие плиты 3, которое имеет обратный конус, и застывает в нем. В результате образуется замок, с помощью которого при раскрытии формы происходит извлечение литника из литниковой втулки.

При изготовлении втулок или коробок для извлечения их из формы можно использовать плиту съема (рис. 7.13). При отводе подвижной части формы 2 изделия 6 остаются на знаках 5 и движутся вместе с ними. Когда толкатели 3 упрутся в неподвижный ограничитель 1, плита съема 4 остановится, а подвижная часть формы 2 со знаками 5 будет продолжать отходить влево, при этом изделия 6 задерживаются плитой 4 и снимаются со знаков 5. В формах с плитой съема литник извлекается из литниковой втулки с помощью знака 7, имеющего на торце сферический выступ. В момент впрыска расплав охватывает этот выступ и после охлаждения удерживается на нем. В момент размыкания формы

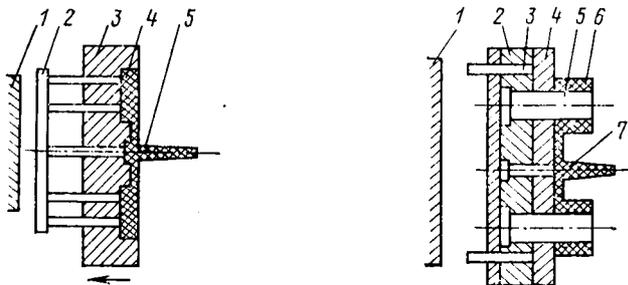


Рис. 7.12. Извлечение изделия толкателем:

1 — ограничитель; 2 — толкатели; 3 — подвижная часть формы; 4 — изделие; 5 — литник.

Рис. 7.13. Извлечение изделия плитой съема:

1 — ограничитель; 2 — подвижная часть формы; 3 — толкатель; 4 — плита съема; 5 — формующий знак; 6 — изделие; 7 — литниковый знак.

литник из канала извлекается знаком 7, а затем срывается со сферического выступа плитой съема 4 вместе с изделиями.

При производстве изделий из полимеров, обладающих сильной адгезией, для уменьшения прилипания полимера к поверхности формующей полости на нее после извлечения изделия с помощью специальных аэрозольных баллончиков наносят антиадгезионную жидкость (смазку). Обычно смазку наносят после нескольких циклов литья. При изготовлении армированных изделий цикл литья завершается установкой в форму арматуры, которую иногда перед этим подогревают.

7.1.7. Особенности технологического процесса, обусловленные конструкцией формы

При литье в многогнездные формы, показанные схематично на рис. 7.1, 7.12 и 7.13, полимер расходуется на формование изделий и литниковой системы. Это приводит к нерациональному использованию полимерного материала и увеличивает трудоемкость процесса, так как необходимо изделия отделять от литников, а последние, в свою очередь, дробить и смешивать с полимером для вторичной переработки.

Технология существенно улучшается при использовании форм с точечными литниками (рис. 7.14, а). Изделие 2 оформляется в закрепленной между двумя плитами 1 и 3 матрице, расплав в которую впрыскивается через литниковый канал 4. В связи с тем что литниковый канал 4 имеет очень малые размеры, при заполнении формующей полости весь расплав практически расходуется на формование изделия и коэффициент расхода материала (отношение массы расходуемого полимера к массе готовых изделий) приближается к единице: $K_p \approx 1$. Кроме того, при течи через литник небольшого диаметра (0,8—1,2 мм) возникают большие скорости сдвига (20 000—200 000 с⁻¹), что повышает гомогенизацию расплава. При этом расплав вследствие диссипации энергии вязкого течения дополнительно нагревается и за-

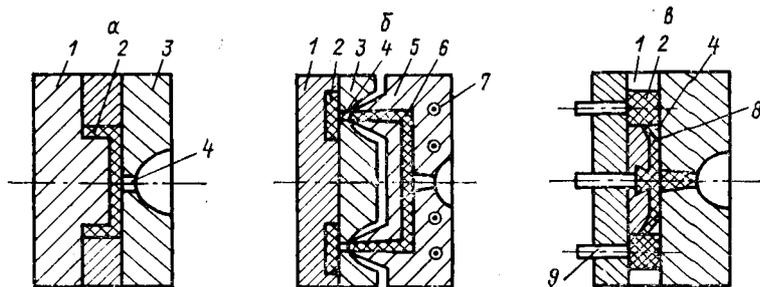
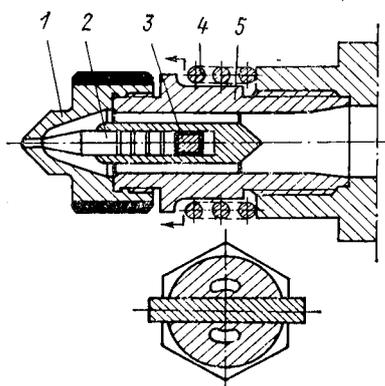


Рис. 7.14. Формы с различными вариантами литниковых каналов:

а — точечный литник; б — горячеканальный литник; в — туннельный литник.
1 и 3 — плиты; 2 — изделие; 4 — литниковый канал; 5 — плита; 6 — обогреваемый канал; 7 — нагреватели; 8 — перемычка; 9 — толкатель.

Рис. 7.15. Сопла с подпружиненным клапаном:
 1 — наконечник; 2 — клапан; 3 — планка;
 4 — пружина; 5 — корпус.



полнение формы расплавом улучшается. Благодаря малому радиусу литника время выдержки под давлением уменьшается до 1—2 с, поэтому технологический цикл сокращается. Быстрое охлаждение литника ограничивает подпитку формы расплавом, в изделии полнее протекают релаксационные процессы и качество изделий повышается — снижается анизотропия свойств и усадки.

Поскольку литник имеет небольшие размеры, его обычно не удаляют и трудоемкость механической доработки изделий сокращается.

Точечное литье имеет свои специфические особенности. При изготовлении толстостенных изделий, ввиду отсутствия подпитки расплавом, необходимо увеличивать удельное давление литья, в противном случае могут появиться утяжины. Чтобы исключить застывание полимера в литнике в начальный момент впрыска, применяют сопла с подпружиненным клапаном (рис. 7.15). Перед впрыском пружина 4 давит через планку 3 на клапан 2 и перекрывает выходное отверстие наконечника 1. В момент начала впрыска отверстие остается закрытым до тех пор, пока давление расплава не превысит усилие пружины. Благодаря этому клапан открывается тогда, когда в цилиндре уже создано достаточно высокое давление, поэтому расплав начинает течь с большой скоростью и тем самым исключается его охлаждение в литниках. Таким образом, при использовании форм с точечными литниками сокращается время выдержки под давлением, повышается качество изделий и сокращается расход полимера.

Изделия небольших размеров целесообразно изготавливать в многогнездных формах, в которых можно использовать точечный впуск, с горячеканальными литниками (см. рис. 7.14, б). Изделие 2 оформляется в матрице между плитами 1 и 3. Расплав из сопла машины через центральный литник течет по распределительным обогреваемым каналам 6, а затем через точечный впуск 4 поступает в формирующую полость. Форма охлаждается, а температура плиты 5, имеющей нагревателя 7, поддерживается равной температуре расплава в цилиндре машины. Так как после впрыска охлаждается только точечный литник 4, а литниковая система находится в нагретом состоянии, то полимер в литниковой системе не охлаждается. По сравнению с обычными многогнездными формами расход полимера в данном случае резко сокращается, не требуется механическая доработка изделий и дробление литников.

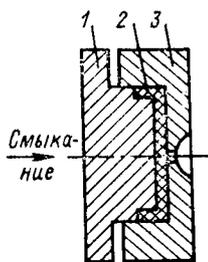


Рис. 7.16. Литевая пресс-форма с инъекционным прессованием:

1 — подвижная плита; 2 — изделие; 3 — неподвижная плита.

Операция по удалению литников исключается и при литье в формы с туннельными литниками (см. рис. 7.14, в). Расплав из распределительных литниковых каналов впрыскивается в формующую полость через туннельный литник 4. При этом расплав в форму течет не по каналам, расположенным в плоскости разреза, а через коническое отверстие, просверленное в плите 1 и отделенное от изделия в плоскости разреза перемычкой 8. Изделия и литники при раскрытии формы остаются в плите 1 и отводятся вместе с ней. Когда толкатель 9 останавливается, то изделия и литники выталкиваются, при этом перемычка 8 своей острой кромкой отрезает изделие 2 от туннельного литника 4. Это позволяет автоматизировать процесс литья и резко сократить его трудоемкость. Однако расход полимера в данном случае не сокращается, как в горячеканальных формах, и требуется вторичная переработка литников.

При литье крупногабаритных изделий в формующей полости возникают значительные перепады давлений и большая неоднородность в ориентации макромолекул. Все это приводит к ухудшению механических свойств изделий. Для исключения этих недостатков применяют литье под давлением в пресс-формы с инъекционным прессованием (рис. 7.16). Пресс-форма состоит из подвижной 1 и неподвижной 3 плит, которые имеют двойные плоскости сопряжения, образующие некоторое подобие закрытой загрузочной камеры, и могут взаимно перемещаться друг относительно друга. Точно дозируемая масса расплава впрыскивается в неполностью сомкнутую пресс-форму и заполняет свободное пространство. Так как форма не сомкнута, то в формующей полости расстояние между плитами больше, чем толщина стенок, и расплав течет без больших перепадов давлений, при этом уменьшается его охлаждение и ориентация макромолекул снижается. После впрыска дозы расплава происходит смыкание формирующих плит и подвижная плита 1 входит в плиту 3, как пуансон в матрицу. Вследствие создания усилия смыкания в форме возникает необходимое давление, под действием которого происходит сжатие расплава. В данной конструкции пресс-формы можно также использовать точечный литник. Применение инъекционного литья позволяет значительно сократить технологический цикл литья, уменьшить расход полимера и снизить трудоемкость изготовления изделий. Основное же преимущество данного метода заключается в повышении качества изделий — уменьшается коробление, снижается анизотропия усадки и прочности. Это достигается благодаря тому, что компенсация изменения объема расплава при охлаждении осуществляется без применения подпитки — только за счет сближения плит формы.

7.2. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ

Наиболее сильное влияние на прочность, усадку, твердость и другие свойства изделий оказывают давление, температура расплава и формы, время выдержки и скорость впрыска. Влияние технологических параметров на свойства изделий из аморфных и кристаллических полимеров различно. Так, при литье аморфных полимеров ударная вязкость с повышением температуры расплава вначале повышается, а затем проходя через максимум снова снижается (рис. 7.17). Аналогично изменяется разрушающее напряжение, однако его максимум достигается при более низких значениях T_p , что, вероятно, связано с изменением степени ориентации макромолекул полимера при заполнении формы расплавом.

Влияние давления на прочность аналогично влиянию температуры (рис. 7.18). Однако при изменении давления в широком интервале наблюдается несколько максимумов прочности изделий, причем наибольшее значение прочности соответствует давлению 400 МПа. Особенно это характерно для кристаллических полимеров, таких, как полиэтилен и полипропилен. Следует отметить, что для кристаллических полимеров рассмотренные зависимости несколько видоизменяются, так как от давления и температуры зависит скорость их кристаллизации (см. гл. 1).

Как уже было отмечено, температуры расплава и формы очень сильно влияют на анизотропию свойств изделия: чем выше эти температуры, тем меньше разница в свойствах изделий вдоль и поперек направления литья. Особенно сильно на анизотропии свойств сказывается время выдержки под давлением. Чем больше размеры литников, тем дольше длится подпитка формы расплавом, поэтому охлаждение происходит при воздействии напряжений сдвига, а это затрудняет релаксационные процессы и увеличивает ориентацию макромолекул.

Технологические параметры процесса литья также влияют на усадку изделий, т. е. на их линейные размеры. Это достаточно легко проследить, используя зависимость плотности полимера от температуры и давления. Известно, что при увеличении давления в форме плотность расплава возрастает. Например, при давлении

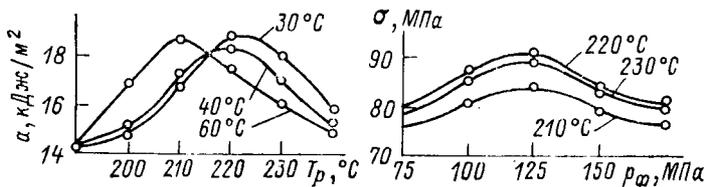


Рис. 7.17. Зависимость ударной вязкости изделий из полиметилметакрилата от температуры расплава при различной температуре формы.

Рис. 7.18. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении изделий из полиметилметакрилата от давления в форме при температуре формы 30 $^{\circ}\text{C}$ и различной температуре расплава.

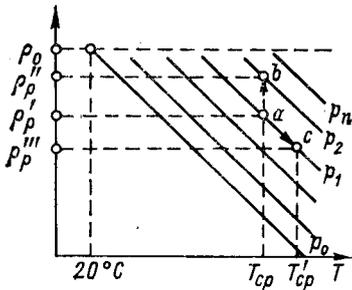


Рис. 7.19. Зависимость плотности ρ расплава аморфного полимера от давления и температуры (схема).

ρ_1 исходная точка, характеризующая состояние расплава, находится на пересечении линий давления p_1 и средней температуры расплава после выдержки под давлением T_{cp} (точка a на рис. 7.19). При увеличении давления плотность полимера повышается и исходное состояние смещается в точку b .

Поскольку в точке b плотность ρ'' выше, чем в точке a ρ' , при охлаждении расплава под высоким давлением происходит меньшее изменение объема и усадка изделий уменьшается. Действительно, если в уравнении (3.8) удельный объем заменим плотностью, то получаем:

$$V = 1 - (\rho_p / \rho_0)^{1/3} \quad (7.18)$$

где ρ_0 — плотность полимера при 20°C ; ρ_p — плотность расплава полимера в форме в конце выдержки под давлением.

Из уравнения (7.18) следует, что при увеличении плотности расплава отношение ρ_p / ρ_0 возрастает и усадка уменьшается.

Рассмотрим второй случай, когда давление остается постоянным и равным p_1 , а температура в цилиндре литьевой машины увеличивается. В этом случае средняя температура расплава в конце выдержки под давлением будет больше и равна T'_{cp} (точка c на рис. 7.19). Этому состоянию соответствует плотность ρ''' , меньшая, чем ρ' в точке a . Таким образом, с ростом температуры усадка увеличивается. То же происходит при повышении температуры формы: чем выше T_ϕ , тем больше средняя температура расплава в конце выдержки под давлением и рабочая точка смещается по направлению к точке c . Однако, если при повышении температуры T_p или T_ϕ увеличить выдержку под давлением, то усадка может остаться прежней или даже несколько уменьшиться. Действительно, если при выдержке $t'_в$ и температуре T'_ϕ исходному состоянию соответствовала точка c , то при увеличении продолжительности выдержки при том же давлении p_1 , рабочая точка смещается к точке a . Так как средняя температура расплава после окончания подпитки становится ниже, то усадка уменьшается.

Аналогичная картина наблюдается при увеличении размеров литника: чем больше его сечение, тем больше должно быть время выдержки под давлением; следовательно, подпитка длится дольше, расплав в форме охлаждается сильнее и усадка изделий снижается.

В случае изготовления изделий с различной толщиной стенок при равной выдержке под давлением средняя температура расплава должна быть пропорциональной квадрату толщины стенки. Таким образом, с увеличением толщины изделия усадка растёт значительно сильнее, чем при изменении других параметров.

Подобный анализ легко выполнить математически. Рассмотрим случай изготовления пластины толщиной δ в форме с литником прямоугольного сечения. Время выдержки под давлением t_B для литника прямоугольного сечения из условия нестационарной теплопроводности равно:

$$t_B = \frac{K_L S^2 h^2}{\pi^2 a (S^2 + h^2)} \cdot 2,3 \lg \frac{16 (T_3 - T_{\text{охл}})}{\pi^2 (T_T - T_{\text{охл}})} \quad (7.19)$$

где S и h — ширина и глубина выпускного литника; T_T — температура течучести (или плавления); $T_{\text{охл}}$ — температура охлаждающей поверхности формы [см. уравнение (6.19)]; K_L — коэффициент, учитывающий течение расплава во время подпитки; a — температуропроводность расплава; T_3 — температура расплава после сжатия [см. уравнение (7.16)].

За время выдержки под давлением происходит охлаждение полимера в форме, а поскольку температура по сечению изделия различна, то для расчета усадки необходимо использовать значение средней температуры. Это значение $\bar{T}(t)$ (в К) определяют с учетом формы изделия по уравнениям нестационарной теплопроводности, которые в несколько упрощенном виде приведены ниже:

$$\text{Пластина} \quad \bar{T}(t) = \frac{8}{\pi^2} (T_3 - T_{\text{охл}}) \exp\left(-\frac{\pi^2 a t_B}{\delta^2}\right) + T_{\text{охл}} \quad (7.20)$$

$$\text{Параллелепипед} \quad \bar{T}(t) = \frac{512}{\pi^6} (T_3 - T_{\text{охл}}) \exp\left[-\frac{\pi^2 a t_B (\delta^2 B^2 + B^2 l^2 + \delta^2 l^2)}{\delta^2 B^2 l^2}\right] + T_{\text{охл}} \quad (7.21)$$

$$\text{Сфера} \quad \bar{T}(t) = \frac{6}{\pi^2} (T_3 - T_{\text{охл}}) \exp\left(-\frac{\pi^2 a t_B}{R^2}\right) + T_{\text{охл}} \quad (7.22)$$

$$\text{Цилиндр} \quad \bar{T}(t) = \frac{32}{5,76\pi^2} (T_3 - T_{\text{охл}}) \exp\left[-\left(2,4^2 + \frac{\pi^2 R^3}{4l^2}\right) \frac{a t_B}{R^2}\right] + T_{\text{охл}} \quad (7.23)$$

Примечание. B , δ , l , R — ширина, толщина, длина, радиус изделия, м²; t_B — время выдержки под давлением, с.

Подставив значение средней температуры в уравнение (3.11), предварительно заменив t_B его выражением из (7.19), находим среднее значение усадки для изделия в виде пластины при литье в форму через шелевой выпускной литник:

$$u_{\text{ср}} = 1 - \left\{ \frac{\pi^2 M}{\rho_0} (p_\phi + \Pi) \exp\left[\frac{2,3 K_L S^2 h^2}{\delta^2 (S^2 + h^2)} \lg \frac{16 (T_3 - T_{\text{охл}})}{\pi^2 (T_T - T_{\text{охл}})}\right] \right\}^{1/3} \times \left\{ \frac{8R (T_3 - T_{\text{охл}}) + \pi^2 [RT_{\text{охл}} + Mb (p_\phi + \Pi)]}{\times \exp\left[\frac{2,3 K_L S^2 h^2}{\delta^2 (S^2 + h^2)} \lg \frac{16 (T_3 - T_{\text{охл}})}{\pi^2 (T_T - T_{\text{охл}})}\right]} \right\} \quad (7.24)$$

где R — газовая постоянная.

Если проанализировать уравнение (7.25), то можно проследить зависимость усадки от всех технологических параметров процесса (p_ϕ , T_p , T_ϕ , t_B), а также от размеров литников и изделия (δ , h , S) и от физических свойств полимера (M , ρ_0 , b , Π).

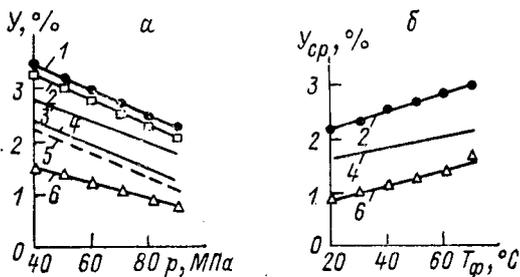


Рис. 7.20. Зависимость усадки от давления (а) и температуры формы (б) при литье полиэтилена низкой плотности:

1, 5 — экспериментально найденная усадка вдоль и поперек направления литья при толщине изделия 4 мм; 2, 6 — то же при толщине изделия 2 мм; 3, 4 — расчетная средняя усадка для изделий толщиной 4 мм и 2 мм соответственно.

Поскольку при выводе уравнения (7.24) не учитывалась ориентация макромолекул, значение усадки $Y_{\text{ср}}$ находится между экспериментально определенными значениями усадки вдоль и поперек направления течения расплава (рис. 7.20). Значения усадки вдоль направления течения расплава Y_{\parallel} и в направлении, перпендикулярном течению, Y_{\perp} взаимосвязаны:

$$K_a = Y_{\parallel} / Y_{\perp} \quad (7.25)$$

где K_a — коэффициент анизотропии.

Если принять, что значения усадки по толщине изделия и в направлении, перпендикулярном литью, примерно равны, можем записать:

$$Y_{\text{ср}} = (Y_{\parallel} Y_{\perp}^2)^{1/3} \quad (7.26)$$

Из полученного уравнения с учетом (7.26) можно определить усадку вдоль направления литья:

$$Y_{\parallel} = Y_{\text{ср}} K_a^{2/3} \quad (7.27)$$

Однако необходимо учитывать, что коэффициент анизотропии зависит от многих факторов и его значения изменяются в довольно широких пределах ($K_a = 1,0 \div 2,5$), поэтому используют экспериментальные данные.

7.3. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Основными параметрами литья под давлением являются температура расплава в цилиндре машины, температура формы, время выдержки под давлением, время охлаждения и удельное давление расплава. Поскольку часть параметров связаны друг с другом, рассчитывать их целесообразно в приведенной ниже последовательности.

Температура расплава. Температура в цилиндре машины обеспечивается за счет нагревания стенок, а также диссипации энергии вязкого течения. Численно она определяется в зависимости от назначения изделий и их прочности, а также требуемой вязкости расплава полимера. Так, при литье под давлением, когда изделия не должны обладать значительной анизотропией свойств,

применяется повышенная температура расплава. В данном случае значение T_1 рассчитывают по уравнению (5.116) или (5.117), а напряжение сдвига τ_n и $\dot{\gamma}_n$ находят по нижней линии реологической области литья под давлением номограммы (см. рис. 5.48). При изготовлении изделий с повышенными механическими свойствами в направлении литья температуру расплава понижают, поэтому напряжение сдвига τ_n определяют по верхней линии реологической области номограммы.

Температура формы. Температура формы обеспечивает необходимую скорость охлаждения и конечную температуру изделия. Кроме того, при литье кристаллизующихся полимеров она влияет на условия кристаллизации, а следовательно, и на свойства изделий. Поскольку методика расчета параметров кристаллизации в неизотермических условиях в настоящее время не разработана, температуру формы либо находят экспериментально или по справочным данным, либо задают из условия обеспечения необходимой жесткости изделия, т. е. она должна быть равна:

$$T_{\phi} = T_{\text{изд}} - 20 \quad (7.28)$$

где $T_{\text{изд}}$ — температура изделия (рассчитывается по формулам, приведенным в разделе 6.1.4).

Для определения температуры формы можно использовать также данные табл. 7.1.

Время выдержки под давлением. Поскольку литье происходит при нестационарных условиях теплопроводности, для расчета можно использовать рассмотренные ранее уравнения, вид которых зависит от геометрической формы литника. Расчет времени выдержки усложняется тем, что охлаждение расплава в литнике происходит во время подпитки, т. е. расплав течет через литник со скоростью, зависящей от изменения объема полимера в формулюющей полости. Чтобы не усложнять расчет, воспользуемся приближенным методом, для чего в уравнение нестационарной теплопроводности введем поправочный коэффициент $K_{\text{л}}$, учитывающий течение расплава через литник в момент его охлаждения:

$$K_{\text{л}} = \zeta \Delta V / V_{\text{л}}$$

где ΔV — объем расплава, нагнетаемый в форму во время выдержки под давлением; $V_{\text{л}}$ — объем впускного литника; ζ — коэффициент, учитывающий форму литника, для цилиндрического литника $\zeta = 2$, а для шелевого и кольцевого $\zeta = 1,5$.

Время выдержки под давлением находят при условии, что температура в центральной части литника понижается ниже температуры текучести $T_{\text{т}}$. Таким образом, время выдержки под давлением для цилиндрического впускного литника равно:

$$t_{\text{в}} = \frac{K_{\text{л}} r^2}{5,76a} 2,3 \lg \frac{1,6(T_{\text{з}} - T_{\text{охл}})}{T_{\text{т}} - T_{\text{охл}}} \quad (7.29)$$

где r — радиус литника, для конического литника принимают среднее значение его радиуса.

В тех случаях, когда применяется центральный впускной литник, радиус которого больше половины толщины изделия, время выдержки определяют по формуле:

$$t_b = \frac{\delta^2}{\pi^2 a} 2,3 \lg \frac{4(T_3 - T_{\text{охл}})}{\pi(T_T - T_{\text{охл}})} \quad (7.30)$$

где δ — толщина изделия.

Это же уравнение можно применять, когда форма имеет кольцевой или веерный впускной литник, тогда вместо δ подставляют глубину литника и вводят коэффициент $K_{\text{л}}$.

Время выдержки под давлением в форме с прямоугольным впускным литником рассчитывают по уравнению (7.19), причем если впускной литник имеет трапециевидальное сечение, то вместо ширины литника подставляют ее среднее значение.

Время выдержки при охлаждении. Охлаждение расплава начинается сразу же после заполнения формы и происходит до тех пор, пока изделие не достигнет определенной конструкционной жесткости. Однако технологическое расчетное время выдержки охлаждения задается по реле времени после отвода сопла от формы, когда расплав уже частично охлажден и имеет по толщине изделия определенный профиль температуры. Поскольку расчет профиля температуры сложен, удобнее найти общее время охлаждения, а затем из него вычесть выдержку под давлением. При определении времени охлаждения необходимо учитывать конфигурацию изделий, их размеры, температуру расплава и формы, а также температуропроводность расплава. Расчет проводим по уравнениям нестационарной теплопроводности, которые в зависимости от формы изделий имеют следующий вид:

$$\text{Пластина} \quad t_{\text{охл}} = \left[\frac{2,3\delta^2}{\pi^2 a} \lg \frac{4(T_3 - T_{\text{охл}})}{\pi(T_{\text{изд}} - T_{\text{охл}})} \right] - t_b \quad (7.31)$$

$$\text{Цилиндр} \quad t_{\text{охл}} = \left\{ \frac{2,3R^2}{a[5,76 + 2,46(R/l)^2]} \lg \frac{2,04(T_3 - T_{\text{охл}})}{T_{\text{изд}} - T_{\text{охл}}} \right\} - t_b \quad (7.32)$$

$$\text{Параллелепипед} \quad t_{\text{охл}} = \left[\frac{2,3\delta^2 B^2 l^2}{a\pi^2(\delta^2 B^2 + \delta^2 l^2 + B^2 l^2)} \lg \frac{4^3(T_3 - T_{\text{охл}})}{\pi^3(T_{\text{изд}} - T_{\text{охл}})} \right] - t_b \quad (7.33)$$

Примечание. δ — толщина изделия; $T_{\text{изд}}$ — температура изделия после извлечения его из формы (см. раздел 6.1.4); R , l и B — радиус, длина и ширина изделия.

Время выдержки при охлаждении можно рассчитывать также графоаналитическим методом, используя критерий Фурье. Для этого применяют график рис. 10.20 и следующее значение относительной температуры Θ :

$$\Theta = (T_3 - T_{\text{охл}})/(T_{\text{д}} - T_{\text{охл}})$$

Значение критерия Фурье Fo находят с учетом конфигурации изготавливаемого изделия. Таким образом, время охлаждения равно:

$$t_{\text{охл}} = \frac{\delta^2 Fo}{4a} - t_b \quad (7.34)$$

Удельное давление. Давление в форме наиболее сильно влияет на размеры изделий, поэтому в качестве исходной величины для расчета удобнее принять усадку. С другой стороны, давление в форме зависит от потерь его в литниках и каналах мундштука и связано с удельным давлением. Таким образом, используя уравнения (7.20)—(7.23), находим среднюю температуру в конце выдержки под давлением, а затем при совместном решении уравнений (3.11) и (7.15) рассчитываем удельное давление в цилиндре литевой машины:

$$P_{\text{уд}} = \frac{K}{(0,07 + 0,045K^2 + 0,72K)} \left\{ \frac{(1 - Y)^3 RT_{\text{ср}}}{M [v_0 - b(1 - Y)^3] - 11} \right\} + \sum \Delta p' + \sum \Delta p'_m \quad (7.35)$$

Поскольку удельное давление влияет на качество изделий, то найденное расчетное значение уточняют экспериментально с учетом остальных технологических параметров.

Глава 8

ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изготовление изделий формованием представляет собой процесс, при котором лист из термопластичного полимера, нагретый до температуры размягчения, подвергают вытяжке, придавая ему необходимую конфигурацию, а затем производят охлаждение. Для формования используют полимерные материалы, имеющие выраженную область высокоэластичного состояния. Наиболее легко формуются изделия из аморфных полимеров и несколько сложнее — кристаллических. Особенно это относится к полиэтилентерефталату, который в момент вытяжки должен находиться в аморфном состоянии. Если полиэтилентерефталат перегреть, он кристаллизуется и формование становится невозможным. Широко используются также кристаллизующиеся полимеры, такие, как полиэтилен и полипропилен, с небольшими значениями показателя текучести расплава, т. е. имеющие сравнительно высокую вязкость.

Методом формования изготавливают изделия различной конфигурации, имеющие одинаковую толщину всех стенок. Особенно широко применяется формование при изготовлении крупногабаритных изделий (ванны, панели холодильников) или тонкостенных изделий (упаковочная тара), когда литье под давлением неприменимо. Очень выгодно использовать данный метод при мелкосерийном производстве, так как технологическая оснастка намного проще и дешевле, чем литевые формы.

Физико-химические основы процесса формования аналогичны рассмотренным ранее для экструзии и литья под давлением термопластов, однако в отличие от этих процессов при формовании

листов отсутствует сдвиговое течение расплава. Придание необходимой конфигурации осуществляется или в высокоэластическом состоянии, или несколько выше температуры текучести за счет растяжения полимера, при этом действующими являются нормальные напряжения. Кроме того, у кристаллизующихся полимеров могут протекать фазовые переходы, обусловленные нагреванием и охлаждением. Из химических процессов следует назвать окисление и деструкцию, вызываемые чрезмерно высокой температурой полимера при формовании. Однако при правильно выбранном технологическом режиме эти реакции протекают незначительно.

Технологический процесс формования может осуществляться штампованием, пневмо- или вакуумформованием.

8.1. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМОВАНИЯ

В зависимости от вида формования или применяемой оснастки технологический процесс может состоять из следующих операций: 1) закрепление листовой заготовки; 2) нагревание; 3) предварительная вытяжка; 4) формование; 5) охлаждение; 6) вырубка и извлечение изделия. Операционная схема формования приведена на рис. 8.1.

Определенных размеров лист 3 закрепляется в зажимной раме 2 (рис. 8.1, а), а затем к нему подводится нагреватель 1 и проводится нагревание до температуры формования (рис. 8.1, б). Перед формованием лист иногда подвергают вытяжке (рис. 8.1, в). В представленной схеме вытяжка осуществляется пуансоном 4, который закреплен на подвижном поддоне 5. Предварительная вытяжка может проводиться также сжатым воздухом, а затем включается вакуум или создается давление, которое прижимает лист к формирующей поверхности пуансона или матрицы (рис. 8.1, г). После того как лист примет необходимую конфигурацию, он охлаждается формирующей поверхностью, а затем извлекается из формы. Для этого через нижний патрубок подается сжатый воздух, который поднимает изделие над формой (рис. 8.1, д). Извлечение можно проводить также с помощью выталкивателей.

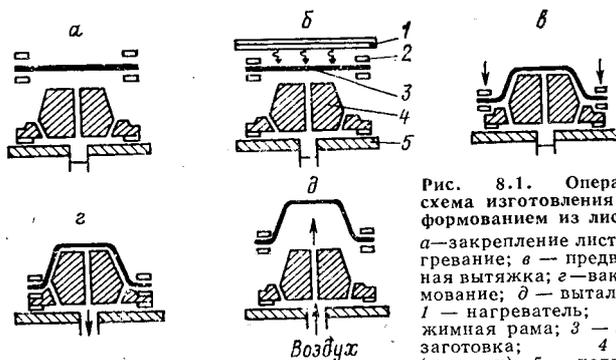


Рис. 8.1. Операционная схема изготовления изделий формованием из листов.

а — закрепление листа; б — нагревание; в — предварительная вытяжка; г — вакуумформование; д — выталкивание. 1 — нагреватель; 2 — зажимная рама; 3 — листовая заготовка; 4 — форма (пуансон); 5 — поддон.

8.1.1. Закрепление заготовки

Для быстрого закрепления заготовки обычно используют автоматические или полуавтоматические устройства с эксцентриковым или кулачковым зажимом. Поскольку на лист при вытяжке или формовании действуют растягивающие усилия, необходимо так подбирать зажимы, чтобы лист прочно удерживался в раме. Для расчета усилия зажима составим уравнение равновесия сил:

$$g_3 f S \Phi = \sigma_T \delta \Phi$$

где g_3 — удельное усилие прижима; f — коэффициент трения; S и Φ — ширина и периметр зажимной рамы; σ_T — напряжение растяжения листа при формовании или вытяжке; δ — толщина листа.

Если заменить $N_3 = g_3 S \Phi$, то можно определить суммарное усилие зажима N_3 :

$$N_3 \geq \frac{\sigma_T \delta \Phi}{f} \quad (8.1)$$

В тех случаях, когда формование или вытяжка осуществляется с проскальзыванием листа, усилие должно быть значительно меньше, оно должно лишь слегка поджимать лист, чтобы не образовались гофры или складки.

8.1.2. Нагревание листовой заготовки

Заготовки можно нагревать в сушильных шкафах, в электрическом поле высокой частоты или инфракрасными нагревателями. Нагревание в сушильных шкафах длительнее, чем остальные методы, и применяется в основном для полимеров, чувствительных к перегреванию. Это в первую очередь относится к полиметилметакрилату (органическое стекло), у которого температура размягчения близка к температуре деструкции, поэтому при интенсивном инфракрасном нагревании верх листа может пригореть, т. е. появляются следы термической деструкции.

Высокочастотный нагрев аналогичен предварительному нагреву пресс-материалов и применяется для полярных полимеров. Однако, несмотря на все преимущества, его трудно применить для нагревания больших листов или заготовок, закрепленных в зажимной раме. В том случае, когда лист не закреплен, возможно его коробление или образование складок. Это связано с тем, что при изготовлении листов методом экструзии макромолекулы ориентируются преимущественно вдоль течения расплава. При нагревании происходит дезориентация макромолекул и размеры листа изменяются несимметрично.

Наиболее часто для нагревания листов применяют инфракрасные нагреватели. Однако при инфракрасном нагреве по толщине листа возникает большой температурный градиент ΔT , обусловленный теплопроводностью полимера. Разность температур на поверхностях листа зависит от мощности нагревателя, толщины

листа δ и его теплопроводности λ . Количество теплоты, проходящей через лист при одностороннем нагреве, W равно:

$$W = \lambda S \Delta T / \delta \quad (8.2)$$

где S — площадь листа; δ — толщина листа.

Количество переданной теплоты расходуется на нагревание полимера, поэтому можно записать:

$$W = c_p \rho \delta S (T_\Phi - T_0) / t_H \quad (8.3)$$

Приравняв уравнения (8.2) и (8.3), получаем время нагревания листа t_H :

$$t_H = \frac{c_p \rho \delta^2 (T_\Phi - T_0)}{\lambda \Delta T} \quad (8.4)$$

где T_0 — начальная температура листа; T_Φ — температура формования, равная средней температуре листа после нагревания, $T_\Phi = (T_B + T_H) / 2$ (здесь T_B и T_H — температура на верхней и нижней поверхностях листа).

Обычно формование проводится при условии, когда нижняя сторона листа аморфных полимеров нагревается выше температуры стеклования T_c , а кристаллических выше температуры плавления $T_{пл}$. Обогреваемая поверхность обычно имеет более высокую температуру, но она не должна быть выше термостойкости (температуры деструкции T_d). Разница температур по толщине листа обуславливает температурный градиент $\Delta T = T_B - T_H$, зависящий от интенсивности нагревания. При уменьшении времени нагревания разность температур на поверхностях листа увеличивается, то же происходит при увеличении толщины листа. При большом градиенте температур по толщине полимер на обогреваемой поверхности может перегреться, что может вызвать его термическую деструкцию или изменение окраски. Поэтому толстые листовые заготовки обычно нагревают при двухстороннем расположении нагревателей. В этом случае время нагревания уменьшается в 4 раза.

Интенсивность нагревания во всех случаях выбирается из условия:

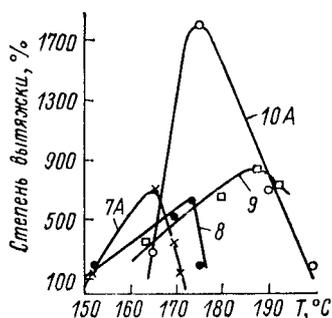
$$\Delta T \leq T_d - T_c \quad (8.5)$$

Температуру формования обычно определяют экспериментально, так как она зависит от свойств полимера, толщины листа, конфигурации изделия и его размеров. Эта температура оказывает влияние на прочность и усадку изделия. Так, при очень низкой температуре формование листа затрудняется и требуется более высокое давление (усилие) для вытяжки, а при высокой температуре может произойти вытяжка листа под действием веса заготовки и ее сильное провисание. Чем больше размеры листа, тем сильнее провисание. Начало появления провисания листа можно определить из равновесия сил. Например, для круглой зажимной рамы это равенство имеет вид:

$$\pi R^2 \delta \rho = 2 \pi R \delta \sigma_T$$

где R — радиус зажимной рамы; σ_T — предел текучести полимера.

Рис. 8.2. Зависимость максимальной степени вытяжки листа от температуры формования при различной силе тока нагревателя.



Провисание для круглой зажимной рамы исключается, если выполняется неравенство:

$$\sigma_T \geq \rho R/2 \quad (8.6)$$

Подобные неравенства можно также получить для зажимных рам другой формы. Необходимо заметить, что провисание уменьшается с увеличением молекулярной массы полимера, так как при той же температуре они обладают более высокой прочностью при растяжении. Температура формования влияет на способность полимера к вытяжке. Максимальная кратность вытяжки обеспечивается в определенной температурной области (рис. 8.2), которая изменяется в зависимости от интенсивности нагревания. Максимальная вытяжка означает, что при увеличении коэффициента растяжения больше определенного значения происходит разрыв листовой заготовки.

От температуры формования зависит также качество изделий. Формование при низких температурах обуславливает высокую степень ориентации макромолекул, и прочность изделий вдоль направления вытяжки увеличивается (рис. 8.3). Особенно это заметно для образца 1, вырубленного в месте максимальной вытяжки листа. В тех случаях, когда нужна незначительная анизотропия свойств изделия, температуру формования повышают, при этом понижается также термическая усадка. Термическая усадка проявляется при нагревании отформованных изделий выше температуры стеклования и является косвенным методом оценки степени ориентации макромолекул. Как видно из рис. 8.4, формование при высоких температурах обуславливает меньшую ориентацию макромолекул, поэтому прочность и усадка снижаются.

На разнотолщинность изделий в основном влияет равномерность нагревания по площади листовой заготовки и степень ее

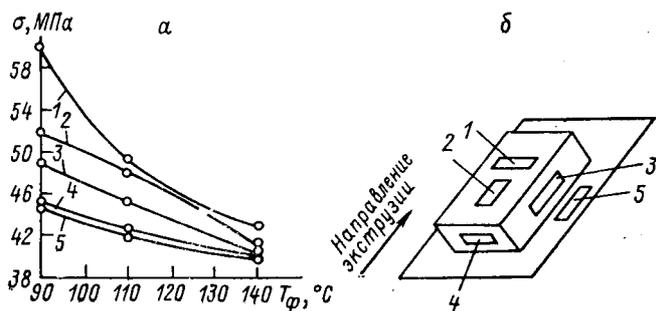


Рис. 8.3. Зависимость от температуры формования разрушающего напряжения при растяжении (а) для образцов 1—5, вырубленных из отформованного изделия (б).

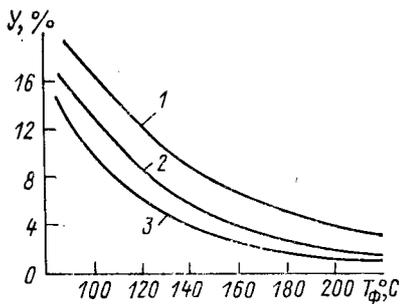


Рис. 8.4. Зависимость термической усадки изделий от температуры формования:

1 — сополимер винилхлорида с винилацетатом; 2 — пластифицированный поливинилхлорид; 3 — непластифицированный поливинилхлорид.

вытяжки. При неравномерной вытяжке в местах, где происходит сильное утонение заготовки, уменьшают интенсивность излучения нагревателей, при этом температура листа избирательно понижается, и разнотолщинность изделия уменьшается. В данном случае заготовка больше вытягивается там, где выше температура. Подобного эффекта также можно добиться установкой над листом защитных экранов, которые уменьшают поток лучистой энергии, или применением фасонных нагревательных элементов.

8.1.3. Предварительная вытяжка листов

При изготовлении глубоких изделий, чтобы уменьшить разнотолщинность, применяют предварительную вытяжку листа толкателем. В этом случае при движении толкателя вначале происходит вытяжка боковых стенок, а затем, когда на лист давит воздух или в форме создается вакуум, вытяжка листа по днищу (рис. 8.5, а). Для того чтобы лист 2 при соприкосновении с толкателем 3 не охлаждался, торцовая часть толкателя имеет более высокую температуру, чем форма. Для подогрева используют нагревательные элементы 4. Чтобы уменьшить поверхность касания листа с толкателем, торец последнего делают с выступающей кромкой, как показано на рис. 8.5, а. При формовании без толкателя лист преимущественно вытягивается по днищу и изделие имеет значительную разнотолщинность (рис. 8.5, б).

Если осуществляется формование на пуансоне (см. рис. 8.13), предварительная вытяжка происходит сжатым воздухом. Давление подбирают таким образом, чтобы образующая полусфера заготовки соответствовала размерам пуансона или была несколько меньше его. При изготовлении изделий с небольшой высотой предварительная вытяжка, как правило, не применяется.

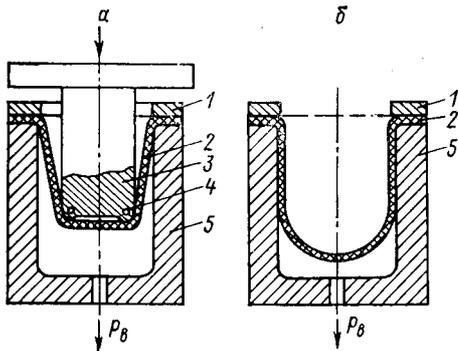


Рис. 8.5. Формование изделий с предварительной вытяжкой толкателем (а) и без вытяжки (б):

1 — зажимная рама; 2 — лист; 3 — толкатель; 4 — нагреватель толкателя; 5 — матрица.

Рис. 8.6. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении изделий из ударопрочного полистирола от коэффициента вытяжки.

8.1.4. Формование изделия

Формование изделий происходит вследствие вытяжки листа под действием усилия пресса, сжатого воздуха или вакуума. Скорость деформации листовой заготовки обеспечивается скоростью опускания плиты пресса или давлением и в каждом конкретном случае выбирается с учетом свойств полимера и температуры нагревания (формования). Скорость деформации должна быть такой, чтобы звенья макромолекул могли переходить в новое положение без разрушения основных валентных связей, т. е. без разрушения цепей полимера. Максимальная скорость деформации реализуется только при определенной температуре полимера, при этом снижается разнотолщинность и происходит очень сильная ориентация макромолекул. При уменьшении скорости деформации ориентация ослабляется, так как макромолекулы перед охлаждением частично успевают перейти в равновесное состояние. Скорость вытяжки листа обычно регулируется расходом сжатого воздуха, подаваемого в форму, или производительностью вакуум-насоса. Чаще всего это достигается дросселированием с помощью регулировочного клапана.

Процесс формования оценивается также коэффициентом вытяжки, который зависит от размеров и конфигурации изделия. Коэффициент вытяжки по площади листовой заготовки может быть различным и рассчитывается по уравнению:

$$K_v = \sqrt{\delta_n / \delta_{из}} - 1 \quad (8.7)$$

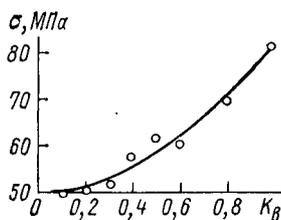
где δ_n и $\delta_{из}$ — толщина листовой заготовки и стенки изделия.

Коэффициент вытяжки так же, как и скорость деформации, влияет на ориентацию макромолекул и прочность изделия (рис. 8.6).

Для того чтобы изделие получилось полностью оформленным, необходимо определенное усилие или давление, которые зависят от толщины листа, конфигурации изделия, температуры и вязкости полимера. Как правило, заранее рассчитать давление довольно сложно, поэтому его подбирают экспериментально. В момент формования между формой и листовой заготовкой находится воздух. Для его удаления в форме сверлят отверстия диаметром 1—2 мм, но не более половины толщины стенки изделия. При вакуумном формовании такие отверстия служат для отсасывания воздуха из формы.

8.1.5. Охлаждение изделия

Охлаждение, как правило, осуществляется отводом теплоты стенками формы, обдувом сжатым воздухом или комбинированным способом. В зависимости от метода формования и конструкции



формы охлаждение бывает односторонним или двухсторонним. Время охлаждения зависит от температуры формы, температуропроводности и толщины стенки изделия. Чем ниже температура охлаждающей поверхности, тем меньше время охлаждения, однако при очень резком охлаждении может произойти коробление изделий, особенно при изготовлении их из полиэтилена высокой плотности. При низкой температуре формы затрудняется оформление ребер или острых углов, при высокой температуре формы на изделии после его извлечения могут появиться гофры или складки, вызванные неравномерной усадкой. Температура формы при переработке кристаллизующихся полимеров влияет на скорость кристаллизации, степень кристалличности и соответственно на качество изделий.

В процессе охлаждения происходит усадка изделий, которая зависит от степени ориентации макромолекул полимера. При формовании на пуансоне усадка обычно меньше, так как он препятствует уменьшению линейных размеров, однако при этом затрудняется съём изделий. Особенно опасно это при формовании изделий из жестких полимеров, поскольку усадка может привести к растрескиванию изделий на пуансоне.

Время охлаждения изделия при двухстороннем теплоотводе рассчитывается по уравнению:

$$t_{\text{охл}} = \frac{2,38^2}{\pi^2 a} \lg \left[\frac{4(T_{\text{л}} - T_{\text{охл}})}{\pi(T_{\text{изд}} - T_{\text{охл}})} \right] \quad (8.8)$$

где $T_{\text{л}}$ — средняя температура листовой заготовки; $T_{\text{охл}}$ — температура охлаждающей поверхности [см. уравнение (6.19)].

При одностороннем теплоотводе время охлаждения увеличивается в 4 раза, его определяют по уравнению (6.17).

8.2. МЕТОДЫ ФОРМОВАНИЯ

8.2.1. Штампование

Формование листовых заготовок с использованием штампов проводится на прессах, с помощью которых создается необходимое усилие. В зависимости от конструкции формы различают три способа: 1) штампование между матрицей и пуансоном; 2) штампование в матрицу эластичным пуансоном; 3) формование толкателем.

При штамповании между матрицей и пуансоном лист 3 закрепляют между двумя рамами 2, нагревают и укладывают на матрицу 4 (рис. 8.7). При опускании пуансона 1 лист деформируется и приобретает форму пуансона и матрицы. Поскольку зажимная рама несколько больше матрицы, то вытяжка вначале происходит по всей поверхности листовой заготовки, обеспечивая хорошую равнотолщинность. В конце смыкания заготовка пережимается пресс-кантами пуансона (выступами) и изделие вырубается по контуру формы. Воздух из полости формы в момент опускания пуансона удаляется по воздушным каналам 5.

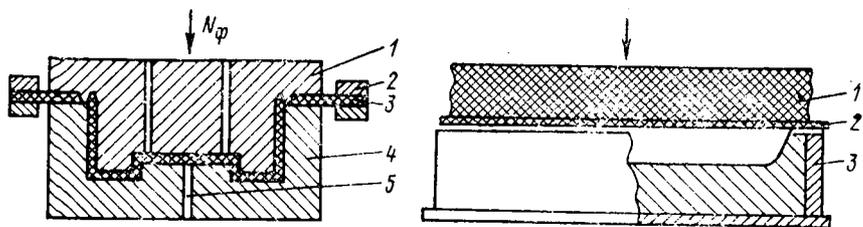


Рис. 8.7. Штампование между матрицей и пуансоном:

1 — пуансон; 2 — зажимные рамы; 3 — листовая заготовка; 4 — матрица; 5 — воздушные каналы.

Рис. 8.8. Штампование эластичным пуансоном в матрицу:

1 — губчатая резина; 2 — листовая заготовка; 3 — матрица.

Данный способ применяется для изготовления изделий сложной конфигурации, так как с помощью прессы можно создать большое усилие формования $N_{\text{ф}}$. К недостаткам метода относится высокая стоимость формы, в которой необходимо обеспечить точное соответствие размеров матрицы и пуансона. При отклонении сопрягаемых размеров может произойти пережатие листа или недооформление изделия.

Штампование эластичным пуансоном в матрицу применяется при изготовлении изделий небольшой глубины и несложной конфигурации. Разогретый лист 2 укладывают на матрицу 3, а затем проводят формование (рис. 8.8). В качестве эластичного пуансона применяют толстый слой губчатой резины или резиновую диафрагму. При создании давления губчатая резина 1 деформируется и производит вытяжку заготовки 2, плотно прижимая ее к матрице 3.

Резиновая диафрагма закрепляется на поддоне, а пространство между поддоном и мембраной заполняется жидкостью, которая распределяет давление по всей поверхности. При смыкании формы происходит деформация мембраны и она осуществляет вытяжку листовой заготовки, плотно прижимая ее к матрице, после чего изделие охлаждается.

Формование толкателем применяется для изготовления изделий простой конфигурации в виде усеченного конуса, пирамиды и их разновидностей. Форма изделия определяется конструкцией зажимной рамы и толкателя. Так, если использовать круглую раму и квадратный толкатель, то основание изделия будет в виде квадрата, а верх конический. Изделия изготавливаются в такой последовательности. Разогретый лист 2 укладывают на поддон 1, прижимают рамой 3, а затем с помощью толкателя 4 проводят формование изделия (рис. 8.9). Основным недостатком данного метода является

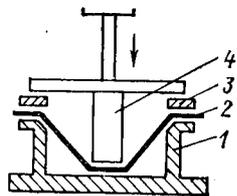


Рис. 8.9. Формование толкателем:

1 — поддон; 2 — листовая заготовка; 3 — прижимная рама; 4 — толкатель.

медленное охлаждение изделия, так как оно не всей поверхностью соприкасается с пуансоном и поддоном. Этот метод непроизводителен, поэтому применяется сравнительно редко.

8.2.2. Пневмоформование

Вытяжка листа при пневмоформовании осуществляется за счет усилия, создаваемого сжатым воздухом. В зависимости от конструкции формы существуют три разновидности способа: 1) свободное выдувание; 2) пневмоформование в матрицу; 3) пневмоформование в матрицу с вытяжкой заготовки толкателем.

Свободное выдувание. Лист 1 укладывают на поддон 3 (рис. 8.10) и закрепляют рамой 2. Подводится инфракрасный нагреватель, и листовая заготовка разогревается. Затем через отверстие в поддоне подается сжатый воздух, под действием которого лист вытягивается и образуется изделие в виде полусферы. Высота изделия регулируется давлением. Охлаждение проводится за счет обдува струей воздуха. Для того чтобы изделия получались определенной высоты, иногда применяют ограничители в виде скобы или с плоским дном. При касании полусферы и ограничителя происходит срабатывание электромагнитного клапана и подача воздуха в поддон прекращается.

Пневмоформование в матрицу. Разогретую заготовку 3 укладывают на матрицу 4 и закрепляют поддоном 1 (рис. 8.11). Через отверстие поддона подается сжатый воздух, под действием которого лист вытягивается и прижимается к охлаждаемым стенкам матрицы. Для охлаждения матрица имеет каналы, в которые подается вода. Для выхода воздуха из полости формы в момент формирования изделия в матрице имеются воздушные каналы 5.

Данным способом могут изготавливаться изделия сложной конструкции с большой толщиной стенок. Однако при изготовлении глубоких изделий получается значительная разнотолщинность стенок. При формировании тонкостенных изделий, чтобы струя воздуха не ударяла в лист и не происходило местного утонения, в поддоне устанавливают распределитель воздуха, который

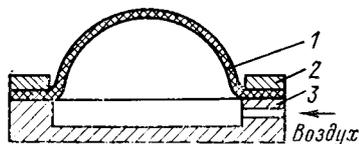


Рис. 8.10. Свободное выдувание:
1 — изделие; 2 — прижимная рама; 3 — поддон.

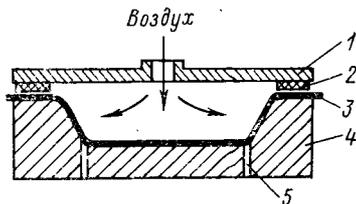


Рис. 8.11. Пневмоформование в матрицу:
1 — поддон (крышка); 2 — прокладка; 3 — заготовка; 4 — матрица; 5 — воздушные каналы.

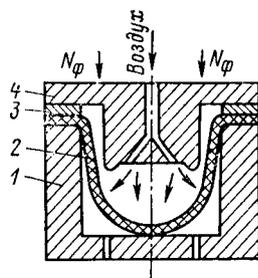
Рис. 8.12. Пневмоформование в матрицу с вытяжкой заготовки толкателем:

1 — матрица; 2 — заготовка; 3 — прижимная рама; 4 — толкатель.

подает воздух одновременно по всей поверхности, при этом воздух предварительно подогревается.

Пневмоформование в матрицу с вытяжкой листа толкателем. Этот способ применяется при изготовлении глубоких изделий.

Заготовку 2 укладывают на матрицу 1, закрепляют рамой 3 и нагревают (рис. 8.12). Затем опускается толкатель 4, происходит предварительная вытяжка заготовки, после чего через отверстия толкателя подается сжатый воздух и проводится окончательное формование изделия. Заготовка прижимается к стенкам матрицы и охлаждается. Температура толкателя обычно поддерживается на 20—30 °С ниже, чем температура листовой заготовки. При более низкой температуре возможно местное охлаждение листа и формование затрудняется.



8.2.3. Вакуумформование

Вакуумформование — наиболее простой метод изготовления изделий из листовых заготовок; применяется менее сложная конструкция формы, за вытяжкой листа можно наблюдать визуально. Процесс изготовления изделий осуществляется в результате вытяжки под действием вакуума, как и пневмоформование он имеет несколько разновидностей.

Вакуумформование в матрицу. Листовую заготовку 2 укладывают на матрицу 5, закрепляют прижимной рамой 1 и подводят нагреватель (см. рис. 8.5, б). После разогревания листа включают вакуум p_v , между листом и матрицей создается разрежение и происходит формование изделия. При этом заготовка прижимается плотно к стенкам матрицы и охлаждается. Затем вакуум отключают, а к матрице подводят сжатый воздух, происходит выталкивание изделия.

Вакуумформование с вытяжкой толкателем. В отличие от рассмотренного способа, вначале происходит вытяжка разогретого листа толкателем, а затем формование в матрицу под действием вакуума (см. рис. 8.5, а). Применяется этот способ при изготовлении глубоких изделий, когда нужна незначительная разнотолщинность стенок.

Вакуумформование на пуансоне. Лист 3 закрепляют между двумя рамами 2, затем подводят нагреватель 1 (см. рис. 8.1). После нагревания заготовки поднимается пуансон 4, закрепленный на поддоне 5, и происходит предварительная вытяжка. Окончательное оформление изделия выполняется на пуансоне под действием вакуума. В данном случае совмещены две операции — вытяжка и формование, которые проводятся на пуансоне, и не

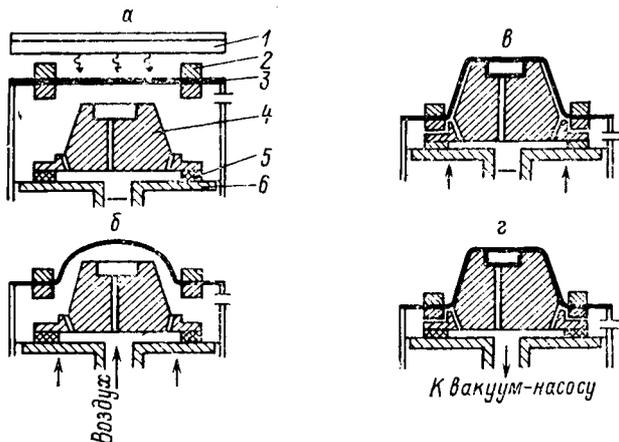


Рис. 8.13. Операционная схема вакуумформования на пуансоне с предварительной вытяжкой сжатым воздухом:

a — нагревание; *б* — предварительное выдувание; *в* — вытяжка; *г* — формирование. 1 — нагреватель; 2 — зажимная рама; 3 — заготовка; 4 — пуансон; 5 — прокладка; 6 — поддон.

требуется специального толкателя. Однако пуансон при этом должен иметь повышенную температуру, поэтому охлаждение изделия замедляется.

Этот способ находит широкое применение.

Вакуумформование на пуансоне с предварительной вытяжкой сжатым воздухом. Этот способ применяется в тех случаях, когда полимер очень чувствителен к охлаждению. Чтобы в момент вытяжки лист 3 не касался холодного пуансона 4, вначале, под листом создают давление, и лист вытягивается, как при свободном выдувании (рис. 8.13). В образовавшуюся полусферу вводят пуансон 4, а затем включают вакуум и проводят окончательное формирование изделия. Охлаждение осуществляют на пуансоне, а также за счет обдува снаружи воздухом.

Вакуумформование с вытяжкой воздушной подушкой. В тех случаях, когда требуется изготовить глубокое изделие и обеспечить разнотолщинность стенок,

применяют формирование с предварительной вытяжкой листа воздушной подушкой (рис. 8.14). Лист закрепляют между двумя рамами 2, размер которых больше матрицы, и проводят нагревание. В толкатель 4 подают подогретый воздух и начинают опускать его на лист. Внутри матрицы 1

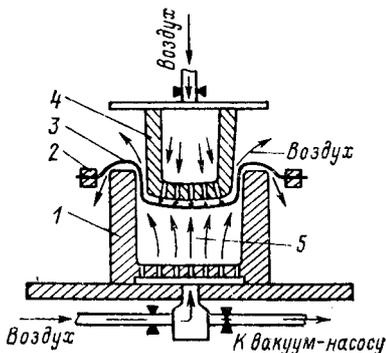


Рис. 8.14. Вакуумное формирование с вытяжкой заготовки воздушной подушкой:

1 — матрица; 2 — зажимная рама; 3 — заготовка; 4 — толкатель; 5 — воздушная подушка

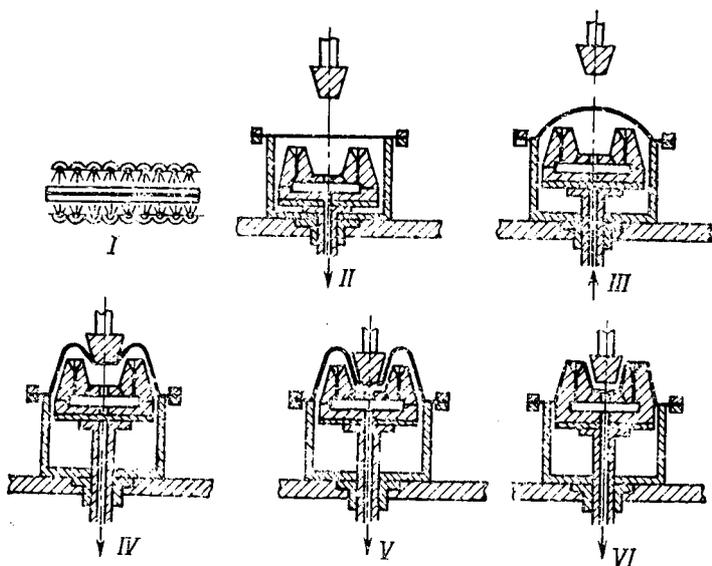


Рис. 8.15. Комбинированное формование.

также подают сжатый воздух, при этом лист как бы висит над матрицей, так как образуется воздушная подушка, в то же время он не касается толкателя. Вытяжка происходит между двумя воздушными подушками равномерно по всей поверхности заготовки. После опускания толкателя заготовка прижимается к матрице, в ней создается вакуум и происходит окончательное формование изделия.

Комбинированное формование. При изготовлении изделий сложной конструкции, в особенности с двояковыпуклым дном, применяют комбинированное формование (рис. 8.15). Лист закрепляют в раме и нагревают (I), затем подводят к форме, в которой создается давление (II). Происходит предварительная вытяжка воздухом, и пуансон вводится в полусферу заготовки (III). Затем сверху опускается толкатель, с помощью которого проводится предварительное формование внутренних элементов изделия (IV—V). Окончательное формование осуществляется под действием вакуума, который создается между листом и пуансоном (VI). Данный способ обеспечивает равномерную вытяжку листа и хорошую равнотолщинность стенок изделия.

8.3. ФОРМОВАНИЕ НА ПОТОЧНЫХ ЛИНИЯХ

Основными недостатками метода формования являются сравнительно высокие отходы полимера и длительность технологического цикла. Однако при крупносерийном и массовом производстве изделий коэффициент расхода материала можно уменьшить, применяя многогнездные формы.

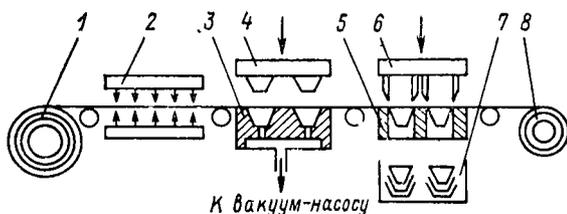


Рис. 8.16. Схема формования на поточной линии: 1 — рулон листовой заготовки; 2 — нагреватели; 3 — форма; 4 — толкатель; 5 — матрица вырубного штампа; 6 — пуансон; 7 — приемная тара; 8 — рулон отходов.

Для одновременного формования нескольких изделий используется одна общая зажимная рама, поэтому часть заготовки, идущая под зажим, а затем на вторичную переработку, значительно сокращается. Таким образом большая часть полимера расходуется рационально и расход его уменьшается.

Для сокращения длительности цикла необходимо совместить операции нагревания заготовки и охлаждения изделия или исключить операцию нагревания. Совмещения операций по времени можно добиться на поточных многопозиционных линиях (рис. 8.16). Лист из рулона 1 подается на пульсирующую конвейерную линию, где под действием нагревателей 2 разогревается до температуры формования. Затем под действием толкателей 4 происходит вытяжка листа и последующее вакуумформование в матрице 3. После охлаждения лист с отформованными изделиями устанавливается в матрицу 5 вырубного штампа. При опускании пуансона 6 происходит вырубка изделий, которые укладываются в приемную тару 7. Отходы листа наматываются в виде рулона 8, а затем измельчаются ножевой дробилкой.

Однако при такой технологической схеме остается энергоемкая операция нагревания заготовки. Чтобы повысить эффективность процесса в некоторых случаях целесообразно совместить экструзию листов и формование изделий на одной поточной линии. Для этого вместо бобины 1 устанавливается экструзионный листовальный агрегат. Расплав после выхода из щелевой головки частично охлаждается до температуры формования, а затем поступает на формование. Особенно выгодно использовать подобную технологическую схему при формовании изделий с большой толщиной стенок, когда время нагревания сравнительно велико.

Таким образом, формование на поточных линиях с использованием многогнездных форм позволяет уменьшить расход материала, снизить трудоемкость и сократить потребление энергии.

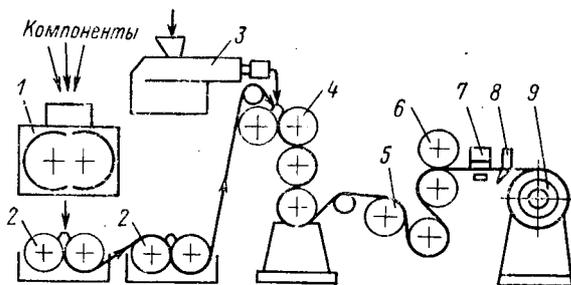
Глава 9

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ КАЛАНДРОВАНИЕМ

Каландрование — это технологический процесс получения плоского бесконечного полотна определенной ширины и толщины, осуществляемый за счет деформации расплава полимера в зазоре между вращающимися валками. Методом каландрования полу-

Рис. 9.1. Технологическая схема изготовления изделий каландрованием:

1 — смеситель; 2 — вальцы; 3 — шнековый смеситель; 4 — каландр; 5 — охлаждающие валки; 6 — тянущее устройство; 7 — толщиномер; 8 — устройство для обрезания кромок; 9 — намоточный агрегат.



чают пленки, тонкие листы из жесткого или пластифицированного поливинилхлорида, полиэтилена, ацетатов целлюлозы, ударопрочного полистирола и других полимеров. Широкое применение находит каландрование для получения линолеума из высоконаполненных композиций на основе поливинилхлорида.

9.1. ТЕХНОЛОГИЯ КАЛАНДРОВАНИЯ

Технологический процесс получения пленок или листов состоит из следующих операций: 1) смешение компонентов и нагревание композиции; 2) формование полотна; 3) охлаждение; 4) намотка или разрезание полотна. Схема процесса каландрования показана на рис. 9.1.

Исходные компоненты из дозаторов загружаются в смеситель 1, откуда смесь поступает на вальцы 2, где разогревается и дополнительно перемешивается. С вальцов масса в виде ленты направляется непосредственно на каландр 4 или в шнековый смеситель 3, а затем на каландр. Пленка полимера проходит охлаждающие валки 5, отводится тянущим устройством 6 и наматывается в виде рулонов на намоточном агрегате 9.

9.1.1. Смешение компонентов и нагревание композиции

Для смешения компонентов применяют различные смесители в зависимости от вводимых компонентов. Предварительно смешанная масса поступает на вальцы или в двухшнековый смеситель, где происходит окончательное смешение, нагревание и гомогенизация. По мере перехода с одной ступени смешения на другую температура композиции постепенно повышается и перед подачей на вальцы она обычно равна или несколько выше температуры текучести полимера. С вальцов готовая композиция подается на каландры в виде ленты, которая срезается с валька специальным устройством, и лишь в отдельных случаях загружается периодически в виде скатанных рулонов. Однако этот способ не обеспечивает стабильного протекания процесса.

В случае применения двухшнековых или одношнековых смесителей на выходе из цилиндра устанавливается формующая головка, из которой композиция в виде ленты, пленки или жгута

поступает на входные валки каландра. При подготовке массы в шнековом смесителе нагревание расплава происходит без доступа воздуха, поэтому исключается термическое окисление полимера. При этом расплав перед входом в головку проходит через фильтрующий пакет, что исключает попадание в пленку посторонних включений и повышает ее качество. В тех случаях, когда композиция подается на каландр в виде ленты или жгута, применяют качающиеся транспортеры, что способствует равномерному распределению массы по ширине валков и лучшему смешению компонентов — происходит усреднение состава композиции по ширине полотна и во времени.

9.1.2. Формование полотна

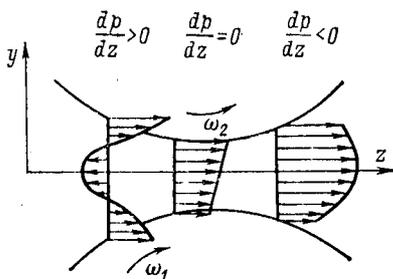
Формование полотна осуществляется в результате деформации пластичной композиции в межвалковом зазоре каландра. При вращении попарно расположенных валков масса за счет адгезионных сил затягивается в сужающийся межвалковый зазор, где приобретает форму бесконечного полотна. Ширина пленки или листа зависит от длины валков каландра, а толщина ее изменяется в зависимости от межвалкового зазора.

В отличие от вальцевания, при каландровании полимерный материал проходит через каждый зазор между валками только один раз. В зависимости от конструкции каландров полимерный материал последовательно движется через несколько (обычно два или три) межвалковых зазоров. По мере перехода с одной пары валков на другую зазор постепенно уменьшается, и на выходе его устанавливают в соответствии с требуемой толщиной пленки (0,2—0,5 мм).

Как уже было рассмотрено ранее (гл. 4), на входе в валки обычно имеется избыток материала, в котором за счет градиента давления возникает обратный поток, обеспечивающий циркуляцию массы и ее перемешивание. Обычно каландрование проводят при наличии фрикции валков (частота вращения валков различная), однако значение фрикции задается несколько меньшим, чем при вальцевании. Благодаря наличию фрикции и градиента давления скорость движения расплава по глубине зазора изменяется (рис. 9.2), изменяется она также и по ходу движения массы между валками. Перед входом массы в узкую часть межвалкового зазора градиент давления изменяет знак, поэтому скорость, обусловленная перепадом давления, суммируется со скоростью поступательного движения расплава и эпюра скоростей изменяется (см. рис. 9.2).

Такое сравнительно большое изменение скорости по глубине канала вызывает развитие высоких напряжений и скоростей сдвига. Как уже было отмечено ранее, с ростом скорости сдвига улучшается гомогенизация расплава и повышается качество пленки. Однако при высоких частотах вращения валков резкое изменение напряжений сдвига по длине зазора вызывает проявле-

Рис. 9.2. Изменение скорости v_z по глубине межвалкового зазора при различных градиентах давления.



ние вязкоупругих свойств. Значительное напряжение сдвига обуславливает сильную ориентацию макромолекул и вызывает анизотропию прочности и усадки пленки в продольном и поперечном направлениях. За счет быстрого последующего охлаждения

пленки дезориентация макромолекул исключается, поэтому при последующем хранении пленки в рулонах происходит изменение ее размеров и образование складок и гофров. Таким образом, чем больше скорость каландрования и чем меньше межвалковый зазор, тем сильнее выражена ориентация макромолекул. Уменьшить ее можно повышением температуры расплава или применением последующей термообработки пленки. Для этого полученное полотно пропускают через нагревательное устройство. За время движения в нагретом состоянии при отсутствии сдвиговых напряжений протекают релаксационные процессы и анизотропия свойств пленки снижается.

Внешний вид пленки существенно зависит от чистоты обработки поверхности, а также от характера перехода расплава с одного вала на другой. Если расплав на выходе из зазора переходит на быстро вращающийся валок, то имеет место частичное растяжение внешнего слоя и шероховатость поверхности пленки уменьшается. В значительной степени качество пленки зависит и от температуры расплава. Температуру выбирают таким образом, чтобы в межвалковом зазоре не возникали большие давления. Однако при высокой температуре вязкость сильно снижается и затрудняется сьем пленки с выходного вала. Температура валков влияет на степень ориентации, а в случае переработки кристаллизующихся полимеров и на степень кристалличности и размеры кристаллических структур. Таким образом, вязкость расплава необходимо поддерживать в определенном интервале.

Для предварительного расчета температуры валков каландра можно использовать реологическую номограмму (см. рис. 5.48), при этом напряжения сдвига должны соответствовать реологической области производства труб методом экструзии.

При движении расплава в межвалковом зазоре возникает давление, под действием которого происходит изгиб валков и толщина пленки в средней части валков увеличивается. Для предупреждения разнотолщинности валки обычно изготавливают с утолщением в средней части (делают бомбировку) или выгибают в разные стороны. Разнотолщинность можно также уменьшить за счет небольшого перекрещивания осей валков.

9.1.3. Охлаждение и намотка полотна

Полученное полотно охлаждается при помощи валков, внутрь которых подается вода. В зависимости от конструкции устройства процесс охлаждения может быть односторонним или двухсторонним. При производстве пленки или листов из полиэтилена, полипропилена и ряда других полимеров необходимо обеспечивать прижим пленки к поверхности охлаждаемого барабана или валька (см. раздел 5.4). Охлаждение полотна из кристаллизующихся полимеров следует проводить при равномерной температуре поверхности валька или барабана, поскольку от этого зависит однородность структуры и степень кристалличности. Для достижения этих условий на внутренней поверхности охлаждающих валков не должно быть ребер, а охлаждающая жидкость должна распределяться равномерно.

Температуру охлаждающих валков обычно выбирают с учетом обеспечения заданной степени кристалличности или других свойств, предъявляемых к пленке. Длина дуги валька, охватываемой расплавом S , и число валков m рассчитывают, исходя из времени охлаждения и скорости движения пленки:

$$S = 2t_{\text{охл}}v/m \quad (9.1)$$

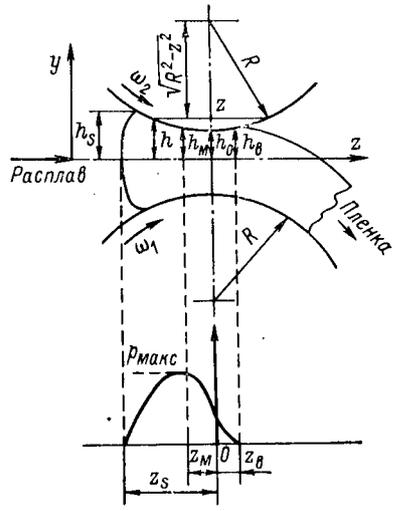
где v — скорость движения пленки; $t_{\text{охл}}$ — время охлаждения, рассчитываемое по уравнению двухсторонней нестационарной теплопередачи (5.120).

Пленка наматывается в виде рулонов на трубчатые бобины. При намотке создается определенное усилие, чтобы исключить образование в рулоне гофров или складок. Перед намоточным агрегатом обычно установлены ножи, обрезающие боковые утолщенные кромки, и толщиномеры, измеряющие толщину пленки по ширине (см. рис. 9.1). После намотки полотна в полимере продолжают протекать релаксационные процессы, сопровождаемые изменением линейных размеров, поэтому, чтобы исключить деформацию пленки, через определенное время необходимо перематывать ее на новые бобины и ослабить внутреннее натяжение полотна. Иногда эту операцию совмещают с термообработкой. В тех случаях, когда пленка поставляется в виде отдельных отрезков, ее разрезают (с помощью гильотинных ножей) и укладывают в виде пакетов.

9.2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ВАЛКАМИ

Рассмотрим изотермическое течение, когда цилиндрические валки радиусом R вращаются с различной угловой скоростью ω_1 и ω_2 (рис. 9.3). Как видно из рисунка, масса поступает в зазор и образует на входе запас материала, когда расстояние между валками равно $2h_s$. Минимальный зазор между валками равен $2h_0$, а на выходе пленки, где происходит отрыв расплава от одного из валков, он равен $2h_b$. Для указанных точек координаты по оси z

Рис. 9.3. Изменение размеров и распределения давления в межвалковом зазоре.



равны z_s , 0 и z_g . Давление в точке с координатой $z = z_s$ равно нулю, а затем достигает максимального значения при $z = z_M$, где глубина канала равна $2h_M$. В месте отрыва расплава от одного из валков давление вновь становится равным нулю. Таким образом, рост и падение давления обусловлены профилем зазора. Когда зазор на входе уменьшается, давление резко возрастает, затем рост его замедляется. При подходе к самому узкому сечению для продавливания массы между валками требуется дополнительная затрата внешней силы, поэтому часть давления расходуется на преодоление вязкого течения. Исходя из этого, в точке с координатой $z = z_M$ градиент давления меняет знак, и при последующем течении происходит уменьшение давления. Постепенно к выходу расстояние между валками возрастает и градиент давления уменьшается. В связи с таким профилем распределения давления в точке $z = z_M$ оно достигает максимального значения и $dp/dz = 0$. Межвалковый зазор h изменяется в зависимости от координаты z : $h = R + h_0 - \sqrt{R^2 - z^2}$. Это легко доказывается, если рассмотреть треугольник (см. рис. 9.3), у которого гипотенуза равна R , а один из катетов z .

При анализе процесса течения расплава принимаем, что скольжение на поверхности валков отсутствует. Вследствие того что угловая скорость валков во времени не меняется, инерционными силами пренебрегаем. Считаем, что реологические свойства описываются степенным реологическим уравнением, а гравитационные силы по сравнению с силами вязкости сравнительно малы. На основании принятых допущений из уравнения движения находим:

$$\frac{d\tau_{yz}}{dy} = \frac{dp}{dz} \quad (9.2)$$

Интегрируя данное уравнение, для фиксированного значения координаты z получаем:

$$\tau_{yz} = \frac{dp}{dz} y + C_1 \quad (9.3)$$

Постоянную интегрирования C_1 находим при следующих граничных условиях: при $y = 0$ скорость сдвига в середине зазора, обусловленная перепадом давления, равна нулю. Тогда

напряжение сдвига будет зависеть только от разности окружных скоростей валков и зазора между ними:

$$C_1 = \tau_{yz} = K [(V_2 - V_1) \sqrt{R^2 - z^2}/2hR]^n \quad (9.4)$$

где v_1 и v_2 — окружные скорости валков, $v_1 = \omega_1 R$, $v_2 = \omega_2 R = \omega_1 f R$.

При отсутствии фрикции валков $f = 1$ и $C_1 = 0$.

Подставив в уравнение (9.3) найденное значение C_1 и значения v_1 и v_2 , имеем:

$$\tau_{yz} = \frac{dp}{dz} y + K \left[\frac{\omega_1 R (f - 1) \sqrt{R^2 - z^2}}{2hR} \right]^n \quad (9.5)$$

Для нахождения скорости потока используем реологическое уравнение состояния:

$$\tau_{yz} = K \left[\frac{dv_z}{dy} \right]^n \quad (9.6)$$

Решая совместно уравнения (9.6) и (9.5), получаем:

$$\frac{dv_z}{dy} = \frac{1}{K^{1/n}} \left(\frac{dp}{dz} y + \tau_f \right)^{1/n} \quad (9.7)$$

где

$$\tau_f = K [v_1 (f - 1) \sqrt{R^2 - z^2}/2hR]^n$$

Интегрируя уравнение (9.7), находим:

$$v_z = \frac{n}{(1+n) K^{1/n}} \frac{1}{dp/dz} \left(\frac{dp}{dz} y + \tau_f \right)^{(1+n)/n} + C_2$$

Постоянную интегрирования определяем с учетом следующих граничных условий: $y = h$, $v_z = \omega_2 \sqrt{R^2 - z^2}$. Тогда:

$$C_2 = \omega_2 \sqrt{R^2 - z^2} - \frac{n}{(n+1) K^{1/n}} \frac{1}{dp/dz} \left(\frac{dp}{dz} h + \tau_f \right)^{(1+n)/n}$$

Подставив это значение C_2 в уравнение скорости, имеем:

$$v_z = \omega_2 \sqrt{R^2 - z^2} + \frac{n}{(1+n) K^{1/n}} \frac{1}{dp/dz} \left[\left(\frac{dp}{dz} y + \tau_f \right)^{(1+n)/n} - \left(\frac{dp}{dz} h + \tau_f \right)^{(1+n)/n} \right] \quad (9.8)$$

Эпюры распределения скорости по глубине зазора в различных сечениях показаны на рис. 9.2. Как видно из рисунка, при положительном градиенте давления скорость движения расплава, обусловленная вращением валков, не совпадает со скоростью, вызванной градиентом давления, поэтому при большом значении dp/dz в середине межвалкового зазора появляется поток, направленный в противоположную сторону. При отрицательном градиенте давления составляющие скорости суммируются, поэтому эпюра скорости становится выпуклой, и обратный поток исчезает.

Объемный расход расплава, проходящего через межвалковый зазор, можно определить, воспользовавшись выражением:

$$V = \int_{-h}^{+h} v_z dy$$

С учетом (9.8) имеем:

$$V = 2h\omega_2 \sqrt{R_2^2 - z^2} + (A/B^2) [(Bh + \tau_f)^{(1+2n)/n} + (Bh - \tau_f)^{(1+2n)/n} - \Phi (Bh + \tau_f)^{(1+n)/n}] \quad (9.9)$$

где

$$A = \frac{n^2}{(1+n)(1+2n)K^{1/n}}; \quad B = \frac{dp}{dz}; \quad \Phi = \frac{2nh}{(1+n)K^{1/n}B} \quad (9.10)$$

В полученные уравнения входит неизвестная величина — градиент давления. Для нахождения ее воспользуемся законом сохранения массы, согласно которому расходы на входе и на выходе должны быть равны. Исходя из этого, имеем:

$$V = 2h_B\omega_1 R = h_M(\omega_1 + \omega_2) \sqrt{R^2 - z^2} \quad (9.11)$$

где h_B — размер зазора в месте отрыва расплава от второго вала.

$$h_B = \delta K_B/2 \quad (9.12)$$

где K_B — коэффициент вытяжки пленки при отводе; δ — толщина пленки.

Таким образом, решая совместно уравнения (9.10) и (9.11), находим градиент давления dp/dz , а затем рассчитываем напряжение сдвига, скорость и производительность с учетом длины валков каландров l :

$$Q_l = 2\rho h_B \omega_1 R l$$

Для определения давления необходимо проинтегрировать уравнение градиента давления:

$$p = \int \varphi(K, n, z) dz + C_3 \quad (9.13)$$

C_3 находят с учетом граничных условий: $z = z_s$, $p = 0$, так как давление на входе равно нулю.

Координату z_s определяют по объему запаса расплава V_s , создаваемого на входе в межвалковый зазор:

$$V_s = 2l(h_s z_s - S) \quad (9.14)$$

где S — площадь сегмента высотой $h_s - h_0$.

$$S = 1/4 R^2 (\pi\varphi/90 - \sin 2\varphi) \quad (9.15)$$

где $\varphi = \arcsin z_s/R$.

Подставив полученные равенства в выражение (9.14), находим:

$$z_s = (R^2/4h_s) (\pi\varphi/90 - \sin 2\varphi) + \frac{V_s}{2lh_s} \quad (9.16)$$

Таким образом, полученная система уравнений описывает закономерности изотермического течения расплава в межвалковом зазоре. Поскольку обычно температура валков отличается от температуры расплава, который к тому же дополнительно

нагревается вследствие диссипации энергии вязкого течения, то течение расплава следует рассматривать в неизоотермических условиях с учетом уравнения энергии

$$\rho c_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \tau_{yz} \frac{\partial v_z}{\partial y} \quad (9.17)$$

при следующих начальных и граничных условиях: $y = 0, dT/dy = 0, T = T_{(t)}$; $y = \pm h, T = T_B$; $z = z_s, T = T_0$. Здесь T_B — температура валков; T_0 — начальная температура массы; c_p, λ и ρ — удельная теплоемкость, теплопроводность и плотность расплава.

Рассмотрение процесса каландрования с учетом неизоотермических условий течения позволяет определить все параметры, однако выполнить точное решение уравнений можно только с использованием ЭВМ.

Глава 10

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПРЕСС-МАТЕРИАЛОВ

Изделия из термореактивных полимерных материалов изготавливаются компрессионным и литьевым прессованием или литьем под давлением. Процесс изготовления изделий основан на пластической деформации материала при одновременном действии на него теплоты и давления с последующей фиксацией формы за счет химического отверждения связующего — образования пространственной трехмерной структуры вследствие протекания реакции поликонденсации или полимеризации связующего. В качестве исходных материалов используют композиции на основе фенолоформальдегидных, фенолофурфурольных, мочевиноформальдегидных, меламиноформальдегидных и других олигомеров. В качестве связующих применяют также кремнийорганические, полиэфирные и эпоксидные олигомеры.

Пресс-материалы обычно содержат около 40—70 % наполнителя, 30—60 % связующего, отвердители, смазывающие вещества, красители и другие добавки.

Из наполнителей применение находят органические или минеральные вещества, порошкообразные или волокнистые. К органическим порошкообразным наполнителям относится древесная мука, из минеральных наиболее распространены кварцевый порошок, силизол, каолин, молотая слюда, графит, металлы и их окислы. В качестве волокнистых наполнителей применяют хлопковое волокно, асбест, стекловолокно, углеволокно и др. В исходном состоянии пресс-материалы могут быть в виде порошка, гранул, ленты или спутанной волокнистой массы.

Несмотря на общую тенденцию резкого увеличения производства термопластичных материалов, особенно полиэтилена, поли-

стирола, полипропилена, поливинилхлорида, будет расти и выпуск терморезактивных полимеров. Этому способствует высокая теплостойкость и прочность изделий из реактопластов, незаменимых в машино- и приборостроении. Терморезактивные материалы будут перерабатываться как новым прогрессивным методом — литьем под давлением, так и методом литьевого или компрессионного прессования (при изготовлении изделий сложной конфигурации или насыщенных арматурой).

10.1. РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При нагревании выше 100—120 °С пресс-материалы вследствие плавления связующего переходят в вязкотекучее состояние и приобретают способность течь и заполнять формующую полость пресс-формы.

По характеру течения пресс-материалы в нагретом состоянии представляют собой неньютоновские псевдопластичные жидкости, характерные кривые течения которых приведены на рис. 10.1. Если представить реологические зависимости пресс-материалов в логарифмических координатах (рис. 10.2), то они имеют линейный вид, что указывает на возможность использования степенного реологического уравнения состояния. Как видно из рис. 10.1 и 10.2, реологические свойства реактопластов описываются такими же зависимостями, которые характерны для расплавов термопластичных полимеров. Наиболее сильно изменяется вязкость в зависимости от скорости сдвига у пресс-материалов, содержащих порошкообразный органический наполнитель (прямые 3—5 и 8 на рис. 10.2). Кривые течения пресс-материалов, наполненных кварцем (6, 7), имеют более крутой подъем, т. е. для них показатель степени увеличивается. Наибольшей вязкостью из всех рассмотренных пресс-материалов обладают АГ-4С и ДСВ, наполненные стекловолокном (1, 2). Если подобные материалы подвергаются шприцеванию или фильерированию, стекловолокно частично разрушается и текучесть их повышается.

Для уменьшения давления прессования вязкость пресс-материала необходимо снизить за счет нагревания до более высокой температуры. Однако при увеличении температуры уменьшается время пребывания пресс-материалов в вязкотекучем состоянии. При высокой

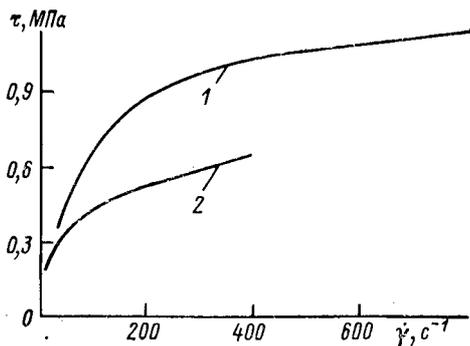


Рис. 10.1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для пресс-материалов:

1 — пресс-порошок Э6-014-30, 150 °С;
2 — стекловолкнисту АГ-4В, 140 °С.

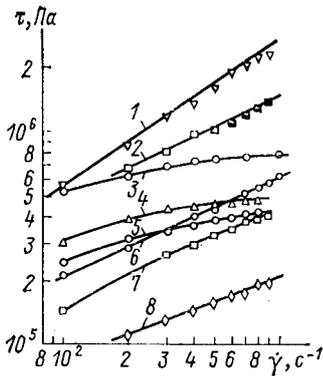


Рис. 10.2. Реологические кривые течения пресс-материалов:

1 — ДСВ, 150 °С; 2 — АГ-4С, 150 °С; 3 — Э10-342-63, 170 °С; 4 — К-18-2, 130 °С; 5 — С_П 2-342-02, 150 °С; 6 — К-114-35, 170 °С; 7 — Э3-340-65, 170 °С; 8 — К-18-2, 170 °С.

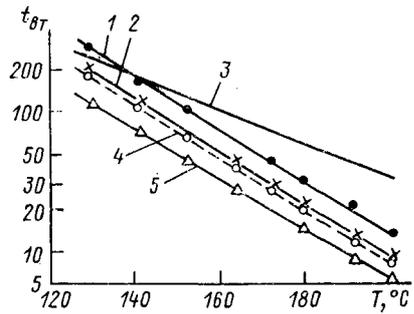


Рис. 10.3. Зависимость времени вязкотекучего состояния от температуры для различных пресс-материалов:

1 — О3-010-02; 2 — О1-010-02; 3 — Э2-330-02; 4 — К-18-2; 5 — Э3-340-65.

температуре материал начинает быстро отверждаться и текучесть его понижается. Поэтому при изготовлении тонкостенных изделий прессованием материал не успевает полностью заполнить оформляющую полость формы и они получаются недооформленными. Кроме того, снижается качество изделий — ухудшается их внешний вид и увеличивается водопоглощение. Формование изделия происходит в результате растекания пресс-материала по формующей полости, а при литвевом прессовании и литье под давлением дополнительно возникает течение в литниковых каналах. Таким образом, удельное давление, которое возникает в момент заполнения формы расплавом, зависит от вязкости, скорости опускания пуансона (подвижной части формы), а также от размеров изделия и литников. Поэтому, температуру нагревания материала следует выбирать с учетом возникающего давления, а также длительности вязкотекучего состояния. Зависимость времени пребывания материала в вязкотекучем состоянии $t_{вТ}$ от температуры является экспоненциальной (рис. 10.3) и может быть описана уравнением:

$$t_{вТ} = Ae^{U/RT} \quad (10.1)$$

где A , U — постоянные уравнения; T — температура, К.

В конце формования изделия, когда растекание материала прекращается, давление в формующей полости и в литниковых каналах почти выравнивается и достигает максимального значения. Удельное давление обычно задается по усилию прессования гидравлического пресса с учетом площади изделия или загрузочной камеры. Чем больше давление, создаваемое в пресс-форме,

тем выше плотность изделий (рис. 10.4). Аналогичная зависимость от давления наблюдается и для прочности (рис. 10.5). Следует заметить, что плотность и прочность достигают максимальных значений в форме при давлении 20—35 МПа. Однако требуемое давление зависит от конфигурации изделий и текучести пресс-материала. Чем меньше толщина стенки изделия и больше его габариты, тем выше должно быть давление. Наиболее высокие давления обычно создают при изготовлении изделий из стекловолоконистых материалов или пресс-материалов на основе кремний-органических полимеров и асбестового волокна.

Под действием температуры в связующем пресс-материала начинается химическая реакция отверждения. Например, пресс-материалы, содержащие резольные смолы, при нагревании образуют неплавкие и неразтворимые продукты трехмерной структуры, называемые резитами. По мере увеличения числа пространственных химических связей вязкость материала возрастает, что отражается на кривой изменения напряжения сдвига во времени (см. рис. 3.4).

Считают, что на начальной стадии отверждения реакции протекают не в направлении общего роста молекулярной массы связующего, а в направлении сужения его молекулярно-массового распределения за счет увеличения молекулярной массы более подвижных низкомолекулярных фракций. В этот период вязкость композиции в большей степени определяется сплелением частиц наполнителя, образующих каркасные структуры, чем вязкостью связующего. После образования сшитой структуры пресс-материалы теряют способность к вязкому течению.

Скорость протекания реакции сшивания очень сильно изменяется во времени, о чем можно судить по изменению напряжения сдвига пресс-материала (рис. 10.6). При этом максимум скорости как по ее значению, так и по времени зависит от температуры. Чем выше температура отверждения, тем больше скорость и раньше начинается реакция.

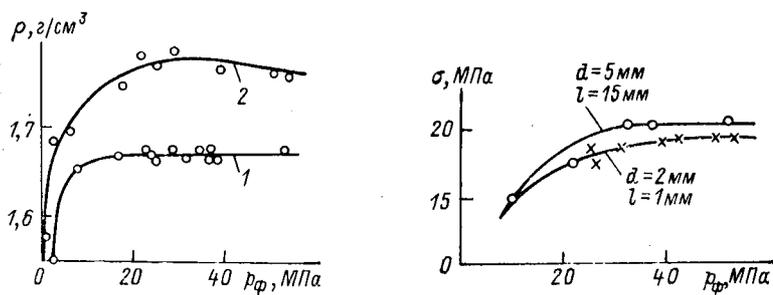


Рис. 10.4. Зависимость плотности изделия от давления в форме для различных пресс-материалов:

1 — Вх4-080-34; 2 — АГ-4.

Рис. 10.5. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении от давления в форме для пресс-материала Вх4-080-34 при различных диаметре d и длине l литника.

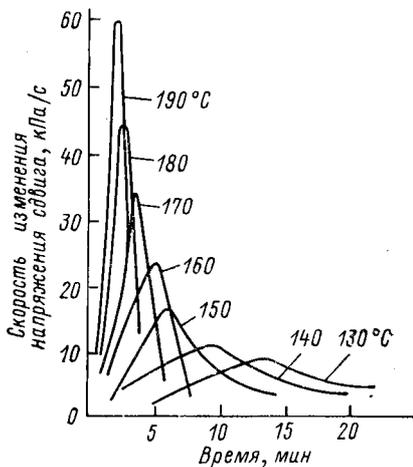


Рис. 10.6. Изменение скорости реакции поликонденсации пресс-материала Э2-330-02 во времени при различных температурах.

Степень отверждения C связана с константой скорости реакции поликонденсации уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = K(T)(1 - C)^m \quad (10.2)$$

где $K(T)$ — зависящая от температуры константа скорости реакции; m — порядок реакции, $m \approx 1,42$.

Общее время отверждения $t_{\text{отв}}$ очень сильно зависит от температуры материала (рис. 10.7) и описывается следующим уравнением:

$$t_{\text{отв}} = Be^{-\beta T} \quad (10.3)$$

где B, β — постоянные; T — температура, К.

На скорость реакции отверждения влияет также давление. При увеличении давления вначале скорость возрастает, а затем при достижении значения 80 МПа и более реакция замедляется. Это можно проследить по степени завершенности реакции, косвенной характеристикой которой может служить содержание растворимой части связующего (рис. 10.8): чем меньше это содержание, тем полнее отверждение.

Скорость отверждения зависит также от содержания воды и легколетучих соединений. Чем выше содержание воды (влажность композиции), тем медленнее протекает реакция. Поэтому влажный материал перед прессованием подвергают сушке. Вода выделяется также при реакции поликонденсации, поэтому в процессе прессования проводят периодическое удаление воды (подпрессовку).

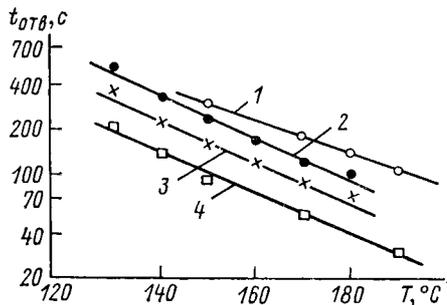


Рис. 10.7. Зависимость времени отверждения от температуры для различных пресс-материалов:

1 — Э2-330-02; 2 — 03-010-02; 3 — 01-040-02; 4 — К-18-2.

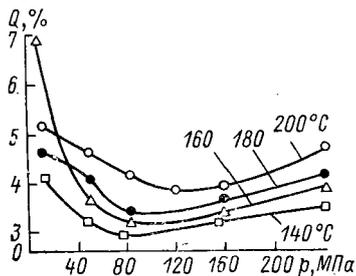


Рис. 10.8. Зависимость содержания вещества Q , экстрагируемого ацетоном из отвержденного фенолоформальдегидного олигомера, от давления при различных температурах.

Давление, создаваемое в процессе отверждения, влияет на качество изделий. При очень низком давлении изделия получают рыхлыми с плохими физико-механическими характеристиками. Поэтому после придания материалу необходимой конфигурации (во время выдержки при отверждении) давление полностью не снимают, а поддерживают в пределах 7—8 МПа. Давление предотвращает раскрытие пресс-формы от действия паров воды, оно также способствует протеканию реакции сшивания.

Реакция поликонденсации сопровождается выделением теплоты, в среднем, согласно экспериментальному определению, 40—48 кДж/кг.

Из всех рассмотренных параметров наиболее сильное влияние на процесс поликонденсации оказывает температура. В зависимости от температуры изменяется вязкость, время вязкотекучего состояния связующего, скорость отверждения. Кроме того, температура наряду с другими факторами (содержание влаги, температура предварительного нагревания, свойства связующего, размеры изделия) существенно влияет на прочность изделий.

При прессовании влажных материалов или при отсутствии предварительного нагревания поверхностные слои полимера с повышением температуры пресс-формы быстро отверждаются, поэтому на изделии могут появиться трещины, прочность его снижается. Наоборот, при интенсивном предварительном нагревании с повышением температуры пресс-формы процесс отверждения ускоряется без ухудшения свойств изделий. Это обусловлено тем, что предварительно нагретый материал отверждается равномерно по всему объему. При низких температурах реакция протекает медленно и качество изделий снижается — в результате длительного выделения воды, изделия получаются немонолитными (рыхлыми).

При прессовании изделий из материалов на основе ненасыщенных полиэфиров и эпоксидных смол реакция отверждения протекает без выделения побочных продуктов (воды, легколетучих веществ), поэтому подпрессовка не требуется. Уменьшается усадка изделий, они получают более монолитными и с более высокой точностью размеров.

10.2. КОМПРЕССИОННОЕ ПРЕССОВАНИЕ

При компрессионном прессовании предварительно подогретый материал загружается непосредственно в формующую полость нагретой до высокой температуры пресс-формы, после чего проводится смыкание пресс-формы, выдержка материала под давлением и отверждение.

Технологический процесс состоит из следующих операций: 1) предварительное нагревание материала; 2) загрузка материала; 3) смыкание пресс-формы; 4) подпрессовка; 5) выдержка

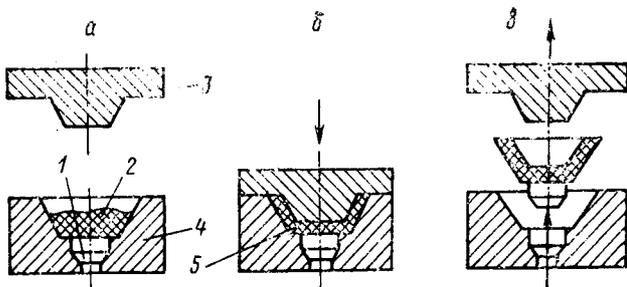


Рис. 10.9. Операционная схема изготовления изделий компрессионным прессованием: а — загрузка пресс-материала; б — смыкание пресс-формы; в — раскрытие пресс-формы и извлечение изделия. 1 — толкатель; 2 — пресс-материал; 3 — пуансон; 4 — матрица; 5 — изделие.

под давлением и отверждение; 6) размыкание пресс-формы; 7) извлечение изделия; 8) очистка пресс-формы. Схема компрессионного прессования показана на рис. 10.9.

10.2.1. Предварительное нагревание материала

Подогрев материала проводится преимущественно в генераторах высокой частоты. Навеску пресс-материала в виде таблеток укладывают на подставку и помещают в камеру установки, где выдерживают в течение заданного времени. Время нагревания материала обычно выбирается с таким расчетом, чтобы температура таблеток достигала 120—160 °С, и задается по реле времени. После этого генератор выключается, а таблетки сразу же вынимают и загружают в пресс-форму. Для того чтобы соблюдалась такая последовательность, генератор включается также автоматически в соответствии с длительностью предыдущих технологических операций (размыкание формы, извлечение изделия, очистка формирующей полости).

Как уже было показано в гл. 4, интенсивность высокочастотного нагревания зависит от напряженности электрического поля, т. е. от напряжения колебательного контура, высоты таблетки и воздушного зазора между подвижной пластиной и таблеткой. Чем меньше это расстояние, тем быстрее происходит нагревание. Для более равномерного нагревания таблетки, как правило, укладывают на торец, они должны иметь одинаковую высоту. В высокочастотных генераторах можно также подогревать порошкообразный материал. В этом случае навеску засыпают в стаканчики или поддоны, изготовленные из диэлектрических материалов (керамики, полиэтилена, фторопласта и др.). Поскольку порошок имеет невысокую плотность, время нагревания несколько увеличивается. Частоту колебательного контура и мощность генератора выбирают в зависимости от свойств материала и навески.

В тех случаях, когда прессы оборудованы шнековыми пластикаторами, нагревание осуществляется за счет тепловых процессов, протекающих в каналах шнека; при этом операции дозирования, нагревания и загрузки совмещаются.

10.2.2. Загрузка материала и смыкание пресс-формы

Материал в матрицу пресс-формы загружается с помощью приспособлений и механизмов, а также вручную. На прессах-автоматах и линиях непрерывного прессования загрузка таблеток осуществляется автоматически непосредственно на высокочастотной установке. Таблетированные пресс-материалы дозируются по числу таблеток. Для порошкообразных материалов применяется весовое или объемное дозирование, для нетаблетированных волокнистых материалов — весовое дозирование. Если пресс-форма многогнездная с несколькими загрузочными камерами, то в каждую из них загружается заданное число таблеток пресс-материала, в некоторых случаях с определенной укладкой таблеток. Например, при прессовании изделий из стекловолокна (АГ-4С) ленты укладываются с определенным расположением стекловолокна, обеспечивающим прочность деталей в нужном направлении.

Смыкание пресс-формы и процесс формообразования изделия (см. рис. 10.9, б) осуществляется в результате опускания пуансона 3, закрепленного на подвижной плите пресса, и создания необходимого удельного давления. Удельным давлением прессования называют эффективное усилие пресса, приходящееся на единицу площади прессования. Удельное давление выбирают, исходя из текучести пресс-материала, конфигурации изделия, а также температуры прессования. Чем больше текучесть, тем меньше требуется давление. Обычно компрессионное прессование проводят при удельном давлении 25—40 МПа. При изготовлении тонкостенных изделий или изделий сложной конфигурации, а также при прессовании волокнистых пресс-материалов требуется большее удельное давление (40—50 МПа).

При смыкании пресс-формы происходит дополнительное нагревание материала от стенок формы и переход его в вязкотекучее состояние. Вследствие создания удельного давления материал течет в формующей полости, приобретает конфигурацию изделия и уплотняется.

10.2.3. Подпрессовка, выдержка под давлением, отверждение

Подпрессовки проводятся через некоторое время после смыкания пресс-формы. Когда пресс-материал нагреется, начинается процесс поликонденсации, сопровождающийся выделением воды и легколетучих соединений (побочных продуктов); кроме того, испаряется влага, находившаяся в пресс-материале. Для удаления образовавшихся паров пресс-форму размыкают на непродолжительное время. Если пресс-материал был предварительно нагрет до высокой температуры, то подпрессовку проводят сразу же после смыкания пресс-формы, так как процесс отверждения протекает весьма интенсивно. Если изделие имеет большую

толщину, а материал предварительно нагревался до невысокой температуры, подпрессовку делают через некоторое время (30—60 с) после смыкания пресс-формы, после того как материал прогреется. При прессовании очень влажных материалов делают несколько подпрессовок. Число подпрессовок можно сократить, применяя большее предварительное нагревание. При прессовании изделий из материалов на основе полиэфиров или эпоксидных смол подпрессовки не требуются.

Выдержка проводится в сомкнутой пресс-форме под давлением, при этом за счет высокой температуры происходит реакция отверждения и пресс-материал переходит в неплавкое и нерастворимое состояние, т. е. изделие становится твердым. В отличие от прессования термопластичных полимеров, в данном случае изделия после отверждения извлекаются из пресс-формы без охлаждения, так как полимер необратимо переходит в неплавкое и нерастворимое состояние.

При отверждении изделий поддерживают определенный технологический режим (давление и температуру). Давление при отверждении может быть снижено до 8—9 МПа, поскольку оно необходимо в основном для исключения раскрытия пресс-формы под действием паров воды и легколетучих соединений. Практически удельное давление при отверждении на прессах поддерживают таким же, как и в момент смыкания пресс-формы (25—40 МПа). Однако это обусловлено лишь конструкцией гидропресса и не связано с требованиями технологии.

Температуру прессования обычно выбирают по справочным данным или определяют экспериментально. Время выдержки устанавливают с учетом толщины и температуры формы: чем выше температура, тем короче выдержка. Однако при очень высокой температуре происходит слишком быстрое отверждение поверхностных слоев изделия и вода, находящаяся внутри изделия, через отвержденный слой удалиться не может. При раскрытии пресс-формы под действием паров воды возможен разрыв поверхностных слоев и появление на изделии вздутий или трещин.

10.2.4. Размыкание и очистка пресс-форм

Размыкание стационарных пресс-форм, т. е. пресс-форм, закрепленных на нижней или верхней плите пресса, проводится за счет движения подвижной плиты пресса. Съемные пресс-формы разбирают на рабочем столе с помощью специальных разъемников. Размыкающие штанги имеют уступы, которые при нажатии действуют на плиты пресс-формы и разъединяют их. При размыкании стационарных и съемных пресс-форм изделие, как правило, остается в матрице, отсюда его легко извлечь выталкивателями. При изготовлении изделий сложной конфигурации пресс-формы могут размыкаться по нескольким горизонтальным или вертикальным плоскостям.

Отпрессованные изделия извлекаются из стационарных пресс-форм с помощью выталкивателей (см. рис. 10.9, в), соединенных

со штоком нижнего гидроцилиндра пресса, а из съемных пресс-форм — вручную с применением приспособлений.

Для очистки пресс-формы обдувают сжатым воздухом с помощью пистолета (рис. 10.10). Если наплывы пресс-материала струей сжатого воздуха не очищаются, то применяют скребки, изготовленные из мягкой стали или латуни.

Стационарные пресс-формы не требуют специальной сборки, в них иногда после очистки вставляют вставки, арматуру или

ТАБЛИЦА 10.1. Технологические режимы прямого и литьевого прессования пресс-материалов

Марка пресс-материала	Температура предварительного нагрева, °С	Температура прессования, °С			Удельное давление, МПа	
		без под- огрева	с подо- гревом	литьевое прессо- вание	прямое прессо- вание	пресс- литье
01-040-02, 03-010-02, 01-030-02	130—170	155±5	185±5	185±5	25—35	40—80
Э2-330-02	80—100	155±5	160±5	160±10	25—35	40—90
У4-080-02	120—130	150±5	175±5	—	25—35	50—80
Вх4-080-34	140—150	160±5	175±5	—	30—40	50—80
Сп1-342-02	150—160	155±5	185±5	160±10	25—35	60—80
О4-010-12	—	—	180±5	—	25—35	—
Сп3-342-02	150	165±5	185±5	180±5	25—35	50—80
Э3-340-65	130—140	155±5	180±10	180±10	30—40	50—100
Э3-340-61	130—140	175±5	185±5	—	40—50	—
К-114-35	165	185	170±5	—	25—35	60—80
В-4-70	150—160	165±5	165±5	165±5	30—40	50—80
К-123-45 (ОФПМ-296)	—	185±5	—	—	25—35	45—55
Э6-014-30	150—160	—	160±10	160±5	25—35	80—100
К214-52	—	165±5	—	—	35—75	—
Вх1-090-34	150—160	155±5	165±5	165±5	30—50	50—80
Вх5-010-73	130—140	—	170±10	—	25—35	—
Ж1-010-60	150—160	155±5	155±5	155±5	25—35	50—100
Ж2-040-60, Ж2-010-60	150—160	155±5	155±5	165±5	25—35	50—80
Э9-342-73, Э10-342-63	150—160	165±5	165±5	165±5	25—35	50—80
У1-301-07, У2-301-07	—	150±5	160±5	160±5	40—45	75—100
У5-301-41	110—120	170±5	175±5	180±5	40—50	75—100
Ф6-337-67	—	155±5	160±5	175±5	40—50	75—100
Текстолит-крошка	100—110	150±5	155±5	—	40—50	—
КФ-3, КФ-3Г	110—130	175±5	180±5	180±5	40—50	75—100
Аминопласт	90—100	155±5	160±5	160±5	25—35	50—80
К-78-51, К-77-51	105±5	165±5	175±5	—	30—35	50—80
КМК-9	—	165±5	—	—	30—35	—
КМК-218А, КМК-218Б	100—110	155±5	155±5	—	28—32	—
КМК-218Л	100—110	150±5	160±5	160±5	30—40	60—110
КПЖ-9	100—110	155±5	155±5	—	30—40	—
КМС-9	—	165±5	—	—	30	—
КВЧ-9	120—125	—	145±5	—	25—35	—
КФ-10	150	—	145±5	150±5	30	50—70
ПК-9А, ПК-9Б	—	140±5	—	—	45—55	—
АГ-4В, АГ-4С	120—130	145±5	145±5	150±5	30—40	70—120
ВПМ-1	—	160±10	170±10	170±10	40—50	75—80
ВПМ-3, ВПМ-3П	160	—	185±10	190±10	30—40	100—120

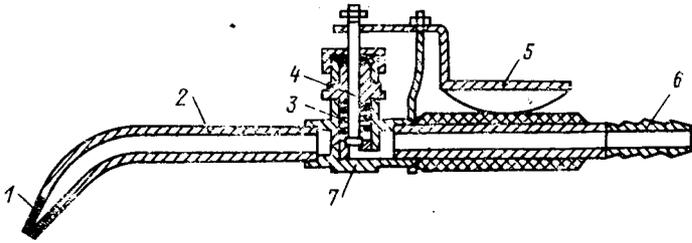


Рис. 10.10. Пистолет для очистки пресс-формы сжатым воздухом:

1 — наконечник; 2 — трубка; 3 — пружина; 4 — клапан; 5 — корпус клапана; 6 — ручка клапана; 7 — штуцер.

вкладыши. Съемные пресс-формы собирают на рабочем столе с использованием гидроразъемника. Технологический режим прессования (температуру предварительного нагревания, удельное давление, температуру пресс-формы) выбирают в соответствии с данными табл. 10.1 и уточняют для отдельных партий и изделий экспериментально.

10.2.5. Особенности прессования в пресс-формах различной конструкции

Компрессионное прессование проводится в пресс-формах открытого, полузакрытого и закрытого типа.

Открытые пресс-формы (рис. 10.11, а) применяют для изготовления изделий коробчатого типа несложной конфигурации. Так как торец изделия совпадает с плоскостью разреза, в пресс-формах невозможно создать высокое давление вследствие вытекания избытка материала по плоскости разреза. Пуансон крепится к верхней подвижной плите прессы. При поднятом пуансоне 1 в оформляющую полость матрицы 3 загружается пресс-материал и пуансон опускается, происходит оформление изделия и выдержка при отверждении. Матрица закреплена на нижней не-

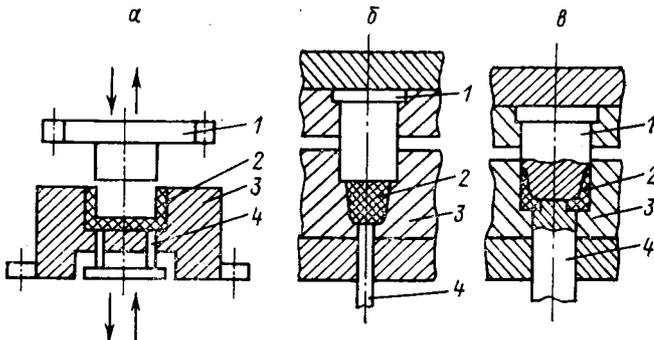


Рис. 10.11. Открытые (а), полузакрытые (б) и закрытые (в) пресс-формы для компрессионного прессования:

1 — пуансон; 2 — изделие; 3 — матрица; 4 — выталкиватель.

подвижной плите пресса, поэтому при подъеме пуансона во время подпрессовки и размыкания она остается на месте. После окончания выдержки под давлением пуансон поднимается и изделие выталкивается выталкивателем 4, соединенным со штоком нижнего гидроцилиндра.

В *полузакрытых пресс-формах* (рис. 10.11, б) площадь загрузочной камеры несколько больше, чем площадь изделия в плоскости разъема, поэтому пуансон при смыкании упирается на отжимную кромку. Избыток пресс-материала выдавливается в загрузочную камеру, а так как пуансон плотно прижимается к отжимной кромке матрицы, то в оформляющей полости сохраняется давление, облой получается тонким, и размеры изделия по высоте изменяются в узких пределах. Облоем называют тонкие заусенцы на деталях, образующиеся в плоскостях разъема пресс-формы вследствие вытекания пресс-материала.

В *закрытых пресс-формах* размеры пуансона соответствуют размерам и конфигурации изделия в плоскости разъема, поэтому опускание пуансона ограничивается самим пресс-материалом, т. е. он воспринимает все усилие прессования (рис. 10.11, в). При прессовании в закрытых пресс-формах высота изделия зависит от навески пресс-материала. Если навеска больше нормы, увеличивается высота изделия. Применяется прессование в закрытых пресс-формах в основном для изготовления изделий, имеющих правильную геометрическую форму в плоскости разъема и не требующих высокой точности размеров по высоте (штулок, коробок и т. д.). Изделия, имеющие в плоскости разъема сложную форму (эллипс, треугольник и т. д.) или малые габариты, изготавливаются, как правило, в полузакрытых пресс-формах.

В зависимости от вида прессования изменяется форма и направление облоя на изделиях. Так, при прессовании в полузакрытых пресс-формах облой расположен в плоскости разъема, т. е. на боковой поверхности изделия. Изделия, изготовленные в закрытых пресс-формах, имеют облой на торцевой поверхности. Удаление облоя проводится на специальных агрегатах. При выборе метода формования заранее предусматривают способ удаления облоя.

В зависимости от вида пресс-формы меняется усилие прессования $P_{\text{пр}}$. Усилие прессования в закрытых пресс-формах можно рассчитать по уравнению:

$$P_{\text{пр}} = p_{\text{уд}} F_{\text{изд}}^n \quad (10.4)$$

где $p_{\text{уд}}$ — удельное давление; $F_{\text{изд}}$ — площадь изделия в плоскости разъема; n — число гнезд в пресс-форме.

При прессовании в полузакрытых пресс-формах расчет усилия прессования проводится по уравнению:

$$P_{\text{пр}} = p_{\text{уд}} F_{\text{зк}} m \quad (10.5)$$

где $F_{\text{зк}}$ — площадь загрузочной камеры; m — число загрузочных камер.

В зависимости от необходимого усилия прессования, удельного давления и технических характеристик пресса рассчитывается манометрическое давление p_m в гидросистеме пресса:

$$p_m = p_r p_{пр} / N_T \quad (10.6)$$

где p_r — максимальное давление в гидросистеме пресса; N_T — номинальное усилие пресса; $p_{пр}$ — усилие прессования.

Преимуществом компрессионного прессования является его простота. К недостаткам следует отнести длительность процесса отверждения и возможность коробления изделий, имеющих большую разнотолщинность стенок. Компрессионное прессование не может быть применено при изготовлении изделий с тонкой проходной арматурой, так как в момент смыкания формы может произойти ее изгиб и изделия получатся бракованными.

10.3. ЛИТЬЕВОЕ ПРЕССОВАНИЕ

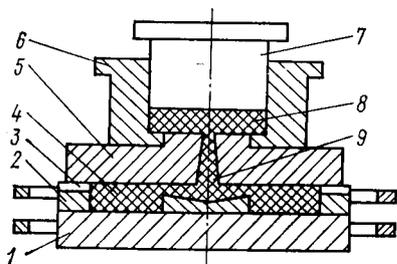
Литьевое прессование отличается от компрессионного тем, что пресс-материал загружается в специальную загрузочную камеру, из которой в оформляющую полость поступает под давлением через литниковые каналы. В отличие от компрессионного прессования загрузка материала проводится после смыкания плит пресс-формы, т. е. в закрытую оформляющую полость. При литьевом прессовании также отсутствует операция подпрессовки.

Предварительно подогретый материал в виде таблеток, порошка или волокна помещается в нагретую загрузочную камеру, где дополнительно нагревается и под действием давления, создаваемого штоком, выдавливается в оформляющую полость нагретой пресс-формы. Благодаря тому, что пресс-материал течет через нагретые литниковые каналы, и вследствие выделения теплоты от вязкого течения температура пресс-материала повышается. При наличии скорости сдвига в литниковых каналах материал тщательно перемешивается и становится более равномерно прогретым. При поступлении нагретого материала в оформляющую полость, где давление равно атмосферному, происходит интенсивное выделение паров воды и легколетучих соединений, которые удаляются из формы через воздушные каналы или зазоры в плоскостях разъема. После заполнения формующей полости пресс-формы материал затекает в воздушные каналы, а так как они имеют небольшую глубину, материал в них быстро отверждается и они перекрываются. В результате создается замкнутый объем и давление в форме повышается до значения, необходимого для уплотнения пресс-материала (25—30 МПа при удельном давлении в загрузочной камере 80—120 МПа).

Обычно температуру пресс-формы при литьевом прессовании выбирают несколько выше, чем при компрессионном. Это необходимо для уменьшения вязкости расплава и облегчения заполнения пресс-формы материалом (см. табл. 10.1). Более высокая температура пресс-формы и равномерное нагревание ускоряют

Рис. 10.12. Съемная пресс-форма для литьевого прессования с верхней загрузочной камерой:

1 — нижняя плита; 2 — матрица; 3 — воздушные каналы; 4 — изделие; 5 — верхняя плита; 6 — загрузочная камера; 7 — шток; 8 — пресс-остаток; 9 — литниковые каналы.



процесс отверждения, поэтому выдержка под давлением сокращается на 30—40 % по сравнению с компрессионным прессованием. Вследствие более полного удаления воды и легколетучих соединений уменьшается пористость изделий и качество их повышается. При литьевом прессовании точнее соблюдаются размеры изделий. Это обусловлено тем, что заполнение формирующей полости пресс-материалом осуществляется после смыкания пресс-формы, поэтому образуется тонкий облой (до 0,1 мм).

Технологический процесс литьевого прессования состоит из таких же операций, что и компрессионное прессование, за исключением операции подпрессовки, однако последовательность их несколько меняется в зависимости от конструкции пресс-формы. При изготовлении изделий в литьевых пресс-формах с верхней загрузочной камерой (рис. 10.12), процесс прессования осуществляется следующим образом.

Пресс-форму собирают на рабочем столе, устанавливают на плиту пресса, а затем загружают материал в загрузочную камеру 6, в которую вставляют шток 7. При опускании верхней плиты 5 пресса в загрузочной камере штоком создается давление, под действием которого пресс-материал через литниковые каналы 9 затекает в оформляющую полость матрицы 2; происходит формование изделия. После отверждения пресс-материала верхняя плита пресса поднимается. Пресс-форму с пресса снимают и разбирают с помощью разъемников на рабочем столе прессовщика. Изделия извлекают одновременно с разборкой пресс-формы или выталкивают вручную. Шток из загрузочной камеры выпрессовывается специальным стержнем, после чего проводят очистку пресс-формы и загрузочной камеры от пресс-остатка 8, т. е. от избытка пресс-материала, оставшегося в загрузочной камере. Прессование в подобных съемных пресс-формах очень трудоемкий и малопроизводительный процесс, так как в период разборки и сборки пресс-формы пресс не загружен.

При крупносерийном производстве литьевое прессование обычно проводят в специальных полустационарных литьевых блоках со съемным пакетом пресс-формы (рис. 10.13). При вынутых скобах 6 собранный пакет пресс-формы, состоящий из плит 4, 8 и матрицы 5, вставляют в пазы захватов 3. При опускании поршня нижнего гидроцилиндра пресса смыкающая плита 2, соединенная с подвижной траверсой 7, движется вниз, при этом загрузочная камера 9 прижимается к литниковой плите 8. В загрузочную камеру 9 помещают подогретый пресс-материал,

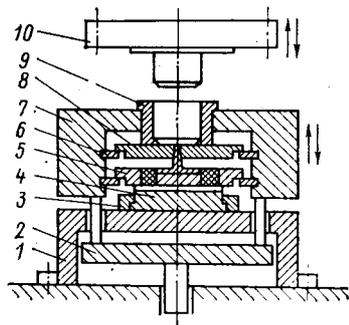


Рис. 10.13. Полуstationарный литьевой блок со съемным пакетом пресс-формы в разомкнутом состоянии:

1 — опорная плита; 2 — размыкающая плита; 3 — захваты; 4 — нижняя плита пресс-формы; 5 — матрица; 6 — скобы; 7 — подвижная траверса; 8 — верхняя плита пресс-формы; 9 — загрузочная камера; 10 — шток.

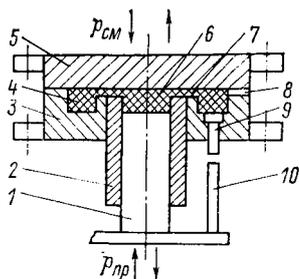


Рис. 10.14. Литьевая стационарная пресс-форма с нижней загрузочной камерой:

1 — шток; 2 — загрузочная камера; 3, 5 — плиты пресс-формы; 4 — изделие; 6 — пресс-остаток; 7 — литники; 8 — воздушные каналы; 9 — выталкиватель; 10 — стержень толкателя.

опускается верхняя плита пресса с закрепленным штоком 10, и происходит прессование изделия. После выдержки под давлением в пазы траверсы 7 вставляются две скобы 6. При подъеме плиты пресса шток 10 извлекается из загрузочной камеры 9. Затем поршнем нижнего гидроцилиндра поднимается плита 2, скобами 6 пакет пресс-формы размыкается и в разобранном виде плиты извлекаются из блока. Очистка и сборка пакета пресс-формы проводится на рабочем месте. При прессовании в таких пресс-формах разборка пакета и извлечение штока из загрузочной камеры совершаются прессом, поэтому цикл прессования сокращается.

При литьевом прессовании в пресс-формах с верхней загрузочной камерой (см. рис. 10.12 и 10.13) усилие прессования $p_{пр}$ должно быть равно:

$$p_{пр} = p_{уд} F_{зк} \quad (10.7)$$

где $p_{уд}$ — удельное давление; $F_{зк}$ — площадь загрузочной камеры.

В пресс-формах с верхней загрузочной камерой усилие прессования является одновременно усилием смыкания пресс-формы. Для того чтобы не произошло ее раскрытия по плоскости разъема от давления материала, площадь загрузочной камеры $F_{зк}$ должна быть больше площади изделий и литников; $F_{зк}$ можно определить по уравнению:

$$F_{зк} = (F_{изд} n + F_{л}) \cdot 1,25 \quad (10.8)$$

где $F_{изд}$ — площадь изделия в плоскости разъема; n — гнездность пресс-формы; $F_{л}$ — площадь литников в плоскости разъема.

При прессовании в пресс-формах с нижней загрузочной камерой (рис. 10.14) материал загружается в загрузочную камеру 2, при этом верхняя плита 5 пресс-формы находится в поднятом состо-

янии. Вследствие опускания подвижной плиты пресса пресс-форма смыкается, а затем при движении штока 1, соединенного с нижним гидроцилиндром, материал выдавливается через литники 7 в оформляющую полость и происходит формирование изделия 4. Воздух и пары воды удаляются из формы через воздушные каналы 8. После выдержки под давлением плита 5 поднимается, а при движении поршня нижнего гидроцилиндра вверх шток 1 выталкивает пресс-остаток 6 из загрузочной камеры. Одновременно с этим стержень толкателя 10 упирается в выталкиватель 9 и происходит извлечение изделия. Пресс-форма обдувается струей сжатого воздуха, очищается от остатка пресс-материала, шток опускается вниз, и происходит следующий цикл прессования.

Применение литьевых пресс-форм с нижней загрузочной камерой позволяет максимально механизировать процесс прессования или полностью его автоматизировать. Единственным недостатком является то, что пресс-формы с нижней загрузочной камерой трудно применить для изготовления армированных изделий, так как арматуру нужно устанавливать в раскрытой пресс-форме непосредственно на прессе, а при смыкании пресс-формы может произойти смещение и поломка арматуры. Армированные изделия, как правило, изготавливают в съемных пресс-формах (см. рис. 10.12) или в полустационарных блоках (см. рис. 10.13), при этом иногда на одном прессе работают одновременно на двух пресс-формах. Пока происходит выдержка под давлением, разбирают и подготавливают к прессованию вторую пресс-форму, поэтому пресс все время находится в работе.

При литьевом прессовании в пресс-формах с нижней загрузочной камерой усилие прессования $p_{пр}$ создается гидроцилиндром выталкивателя пресса и должно быть равно:

$$p_{пр} = p_{уд} F_{зл} \quad (10.9)$$

Усилие смыкания $p_{см}$, исключаяющее раскрытие формы от давления расплава, создается верхним гидроцилиндром и должно быть равно:

$$p_{см} = p_{уд} (F_{изд}^n + F_{л} + F_{зл}) \cdot 1,25 \quad (10.10)$$

Литьевое прессование имеет целый ряд преимуществ перед компрессионным. Ускоряется процесс отверждения, так как в оформляющую полость материал поступает равномерно нагретым до высокой температуры, полнее удаляются пары воды и легколетучие соединения, поэтому качество изделий повышается. Благодаря более равномерному нагреванию пресс-материала уменьшается коробление, так как отверждение в различных слоях изделий протекает с одинаковой скоростью и остаточные напряжения снижаются, поэтому можно получать изделия с большой разнотолщинностью стенок. К недостаткам литьевого прессования следует отнести необходимость более высокого удельного давления и усложнение конструкции пресс-форм. Увеличивается расход пресс-материала, поскольку часть его отверждается в литниковых каналах и загрузочной камере. Применяется литьевое прессова-

ние при изготовлении изделий сложной конфигурации, имеющих тонкую проходную арматуру или сквозные отверстия небольшого диаметра.

10.4. ПРЕССОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ НА ЛИНИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ

При изготовлении толстостенных изделий время выдержки увеличивается и достигает в некоторых случаях 10—20 мин. Поскольку выдержка при отверждении может осуществляться при удельном давлении 7—8 МПа, то гидравлическая система (гидронасосы) практически работает в это время бесполезно, увеличивая износ пресса и расход электроэнергии. Во время разборки и сборки пресс-формы или при установке арматуры пресс простаивает. Все это приводит к тому, что коэффициент использования машинного времени при изготовлении изделий на гидропрессах составляет 0,2—0,3.

Для того чтобы ликвидировать эти недостатки, в последнее время широко внедряются автоматические линии прессования. Процесс прессования основан на использовании выносных пресс-форм с замковыми зажимами. Автоматические линии могут по конструкции быть роторными или конвейерными. Конвейерная линия показана на рис. 10.15. Блоки прессования перемещаются по конвейеру, где выполняются последовательно все технологические операции, при этом пресс-форма под силовым прессом находится только в течение времени, необходимого для формования изделия. Выдержка при отверждении, раскрытие формы, удаление изделий и загрузка материала осуществляются на конвейере. Температура пресс-форм при движении их по конвейерной линии поддерживается автоматически, а необходимое удельное давление создается за счет усилия тарельчатых пружин.

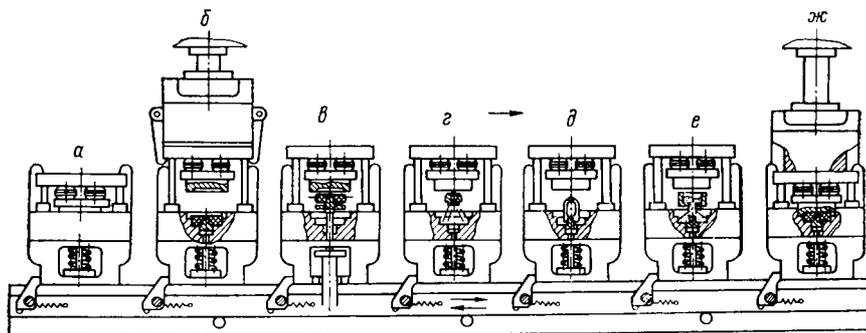


Рис. 10.15. Операционная схема прессования на автоматической конвейерной линии: а — выдержка при отверждении; б — раскрытие пресс-формы; в — извлечение изделия; г — очистка пресс-формы; д — установка арматуры; е — загрузка пресс-материала; ж — смыкание формы и формование изделия.

Конструкция блока для компрессионного прессования показана на рис. 10.16. Блок состоит из верхней плиты 1, на которой закреплены тарельчатые пружины 2 и подвижная плита 5. К подвижной плите 5 крепится пуансон 6. В нижней плите 10 установлена матрица и закреплены выталкиватели 7. В сомкнутом состоянии пресс-форма удерживается захватами 3, которые при раскрытии опираются на упоры 4 и удерживают плиты 1 и 5 в поднятом состоянии. После загрузки пресс-материала с помощью силового устройства происходит смыкание пресс-формы и создается необходимое удельное давление прессования. Захваты 3 под действием пружин 9 закрывают форму, а после того, как блок перейдет на конвейерную линию, давление в формующей полости поддерживается тарельчатыми пружинами 2. Для того чтобы раскрыть пресс-форму, на плиту 1 давит пресс, отбрасывает захваты 3 в сторону, и верхняя плита 1 поднимается вверх. Выталкивающий шток воздействует на плиту толкателей 11, и толкатели 7 извлекают изделия из матрицы.

При литьевом прессовании в съемных пресс-формах применяется блок с нижним расположением тарельчатых пружин (рис. 10.17). После сборки на рабочем месте пресс-форму вместе с загрузочной камерой устанавливают на фиксаторы 3, загружают пресс-материал и вставляют в камеру шток (см. рис. 10.12). Блок последовательно перемещается по конвейеру. Вначале он устанавливается под силовое устройство, где происходит смыкание пресс-формы и формование изделия, а затем пресс-форма захватами 4 удерживается в закрытом состоянии и движется по конвейерной линии; происходит отверждение изделия. Усилие при отверждении создается с помощью тарельчатых пружин 5, число которых должно обеспечить давление смыкания 7—8 МПа. После выдержки и отверждения материала происходит размыкание блока, захваты 4 отводятся в стороны и пресс-форма вынимается. Разъем пресс-формы, очистка ее и извлечение изделий проводятся на рабочем столе.

При прессовании изделий в стационарной литьевой пресс-форме с нижней загрузочной камерой применяется конструкция блока, показанная на рис. 10.18. Пресс-форма состоит из плит 7, закрепленных на плите блока 6 и основании блока 10. В раскрытом положении верхняя часть блока удерживается на захватах 9 и дополнительно фиксируется защелкой 3, которая в раскрытом положении пресс-формы западает в паз А колонки 2. После помещения материала в загрузочную камеру 8 защелка 3 выводится из паза специальным упором, закрепленным на ползуне пресса, упоры 5, сжимая пружину 11, разводят боковые захваты 9 и верхняя подвижная часть блока опускается до тех пор, пока пружинные демпферы 1 не уравновесят блок. После загрузки пресс-материала и закрытия пресс-формы изделия прессуются штоком нижнего цилиндра. Тарельчатые пружины 4 после закрытия блока боковыми захватами 9 создают усилие, необходимое для отверждения изделий. Блок к столу крепится двумя колонками 12.

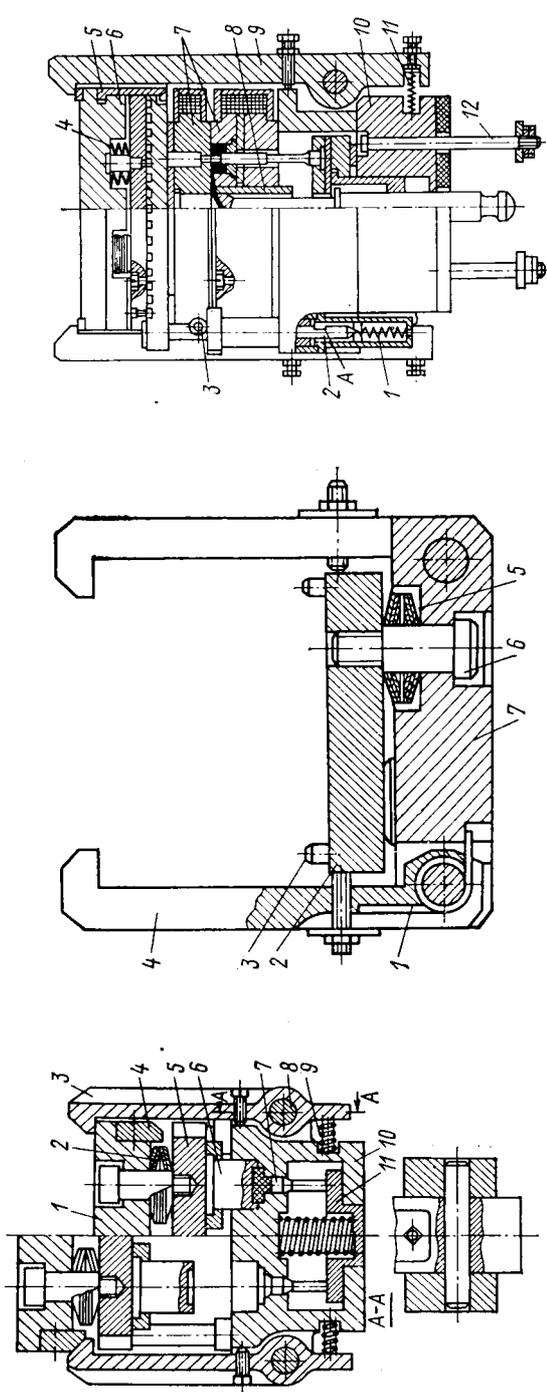


Рис. 10.16. Блок компрессионного прессования с замковым устройством:

1 — верхняя плита; 2 — тарельчатая пружина; 3 — захваты; 4 — упоры; 5 — подвижная плита; 6 — пуансон; 7 — выталкиватель; 8 — ось захватов; 9 — пружина; 10 — нижняя плита; 11 — плита выталкивателей.

Рис. 10.17. Блок для прессования в съёмных пресс-формах:

1 — пружина захватов; 2 — направляющая колонка; 3 — защелка; 4 — тарельчатая пружина; 5 — упоры; 6 — плита блока; 7 — нижняя плита.

Рис. 10.18. Универсальный блок для литейного прессования:

1 — пружинный демпфер; 2 — направляющая колонка; 3 — защелка; 4 — тарельчатая пружина; 5 — упоры; 6 — плита блока; 7 — плиты пресс-формы; 8 — загрузочная камера; 9 — захваты; 10 — основание блока; 11 — пружина; 12 — крепежные болты.

Для уменьшения потерь теплоты плита 10 установлена на теплоизоляционной прокладке. Технологические операции прессования и их последовательность описаны в разделе 10.3 (см. рис. 10.14).

Линии непрерывного прессования позволяют максимально повысить коэффициент использования машинного времени гидравлических прессов и сократить производственные площади. Применяются они при изготовлении изделий с большой толщиной стенок, требующих значительной выдержки при отверждении, а также изделий, насыщенных арматурой. В последнем случае имеется одна свободная пресс-форма, сборка которой проводится вне конвейера, когда происходит прессование на других пресс-формах; технологические операции осуществляются на съемных пресс-формах с использованием блока (см. рис. 10.17).

10.5. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ

Основными технологическими параметрами компрессионного и литевального прессования являются температура и время предварительного нагревания, температура прессования, время выдержки при отверждении и удельное давление. Технологические параметры выбирают по справочным данным или рассчитывают с учетом исходных свойств пресс-материалов, геометрии изделий, а также технологических особенностей методов прессования и конструкции формы.

10.5.1. Температура предварительного нагревания

Температуру нагревания пресс-материала определяют, исходя из времени пребывания его в вязкотекучем состоянии $t_{вт}$; это время должно быть больше, чем время, затрачиваемое на загрузку материала в пресс-форму t_3 и смыкание пресс-формы:

$$t_{вт} \geq H_1/v_1 + H_2/v_2 + t_3 \quad (10.11)$$

где H_1 и H_2 — высота спуска пуансона при холостом и рабочем ходе пресса; v_1 и v_2 — скорость спуска плиты пресса при холостом и рабочем ходе.

В случае использования пресс-форм с верхней загрузочной камерой значения H_2 и v_2 берут для верхнего цилиндра гидропресса, а для пресс-форм с нижней загрузочной камерой — для цилиндра выталкивателя.

Используя уравнение (10.1) и неравенство (10.11), рассчитывают температуру предварительного нагревания T_H :

$$T_H \leq U/R [\ln (H_1/v_1 + H_2/v_2 + t_3) - \ln A] \quad (10.12)$$

Значения коэффициента A и энергии активации поликонденсации U для некоторых марок пресс-материалов приведены ниже:

Марка пресс-материала	ОЗ-010-02	К-17-2	О1-040-02	ЭЗ-340-65	Э2-330-02
$A \cdot 10^7$	1,77	4,52	1,9	7,4	1760
U , кДж/моль	69,5	69,5	69,5	62,8	47,31

Определенное по уравнению (10.12) значение T_H не должно быть больше максимального значения температуры предварительного нагревания, указанного в табл. 10.1.

При высокочастотном диэлектрическом нагреве по значению T_H с использованием уравнения (4.9) определяют время нагревания.

10.5.2. Время отверждения при компрессионном прессовании

Зависимость времени отверждения от температуры пресс-материала при изотермических условиях описывается уравнением (10.3). Однако обычно температура загружаемого материала сильно отличается от температуры пресс-формы, поэтому общее время отверждения изделия в пресс-форме t_B можно условно разделить на время нагревания пресс-материала до температуры отверждения t_H и на время протекания реакции поликонденсации $Be^{-\beta T_{отв}} := t_{отв}$:

$$t_B = t_H + Be^{-\beta T_{отв}} \quad (10.13)$$

где B и β — постоянные; $T_{отв}$ — температура отверждения изделия в пресс-форме.

Подобное же уравнение можно записать для времени отверждения в пластометре Канавца $t_{п.п}$:

$$t_{п.п} = t_{н.п} + Be^{-\beta T_{отв.п}} \quad (10.14)$$

где $t_{н.п}$ — время нагревания материала в пластометре до температуры отверждения $T_{отв.п}$.

Если учесть, что отверждение материала происходит при температуре, близкой к температуре измерительной камеры пластометра $T_{п.п}$, то с учетом изменения ее от теплоты реакции поликонденсации можно принять:

$$T_{отв.п} = T_{п.п} \pm Q_p/2c_p \quad (10.15)$$

где Q_p — теплота реакции поликонденсации (32—48 кДж/кг).

ТАБЛИЦА 10.2. Значение коэффициентов уравнения (10.16)

Марка пресс-материала	$t_{н.п}$, п. с	β , 1/°C	$T_{п.п}$, °C	Время отверждения $t_{п.п}$, с	
				по ГОСТ 15882—70	по данным Канавца при 6 МПа
01-040-02	19	0,032	170	130	140
К-17-2	19	0,03	170	90	160
03-010-02	19	0,03	170	80	130—180
Э1-340-02	19	0,02	170	160	720
Сп2-342-02	19	0,02	170	150	—
Сп3-342-02	19	0,02	170	160	—
Э2-330-02	19	0,025	170	140	340
Аминопласт	10	0,028	140	130	160
К-79-79	100	0,032	140	210	—
АГ-4	19	0,035	170	125	—

Если принять такие же условия для отверждения изделия, тогда температура отверждения изделия будет равна:

$$T_{\text{отв}} = T_{\text{ф}} \pm Q_{\text{р}}/2c_{\text{р}}$$

Решая совместно уравнения (10.13) и (10.14) с учетом принятых условий и значения $t_{\text{в. п}}$, найденного экспериментально в пластометре Канавца, находим время отверждения изделия:

$$t_{\text{в}} \approx t_{\text{н}} + (t_{\text{в. п}} - t_{\text{н. п}}) e^{\beta (T_{\text{п}} - T_{\text{ф}})} \quad (10.16)$$

Значения коэффициентов, используемых в уравнении (10.16), приведены в табл. 10.2.

Для расчета времени нагревания материала до температуры отверждения используем уравнения нестационарной теплопроводности. Время нагревания определяем по формуле:

$$t_{\text{н}} = \delta^2 \text{Fo}/4a \quad (10.17)$$

где Fo — критерий Фурье; a — температуропроводность; δ — максимальная толщина изделия.

При изготовлении изделий сложной конфигурации точность расчета зависит от правильности определения наиболее утолщенного элемента изделия. Например, для изделия, показанного на рис. 4.19, *а*, когда $a > b$ за расчетное значение толщины берут размер b , а для изделия, изображенного на рис. 10.19, *б*, когда $b > c$ и $a < c$, в качестве максимальной толщины принимают размер c . Для коробчатых изделий за расчетную толщину принимают наибольший размер одной из боковых стенок (например, размер b на рис. 10.19, *в*) или толщину дна, если она больше, чем размер b . Таким образом, в качестве расчетного значения толщины выбирают наиболее утолщенную часть элемента изделия, через которую преимущественно происходит нагревание от двух теплопередающих поверхностей. Если изделие имеет форму полого цилиндра, то расчет ведут как для пластины, толщина которой $\delta = R_2 - R_1$. Также поступают при изготовлении армированных изделий, где за расчетную толщину принимают слой материала до арматуры. Если арматура имеет большие размеры, то перед установкой в пресс-форму ее следует подогреть до температуры формы $T_{\text{ф}}$.

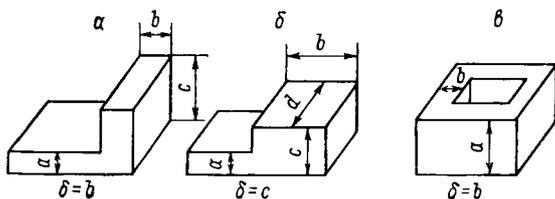
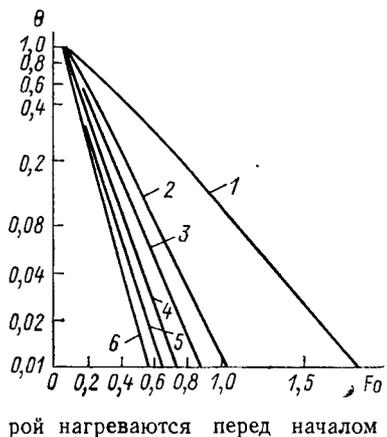


Рис. 10.19. Определение расчетной толщины стенки изделия.

Рис. 10.20. Зависимость критерия Фурье Fo от относительной температуры $\theta = (T_{\phi} - T_M)/(T_{\phi} - T_3)$ для различных изделий: 1 — пластина; 2 — брусок; 3 — цилиндр с $l > d$; 4 — куб; 5 — цилиндр с $l \leq d$; 6 — шар.



Критерий Фурье является функцией относительной температуры и зависит от формы изделия (пластина, цилиндр или шар):

$$Fo = \varphi(\theta) \quad \theta = (T_{\phi} - T_M)/(T_{\phi} - T_3)$$

где T_3 — температура загружаемого пресс-материала с учетом предварительного нагревания; T_M — температура, до которой нагреваются перед началом отверждения центральные слои изделия:

$$T_M = T_{\phi} - Q_p/2c_p \quad (10.18)$$

Расчет времени нагревания проводят в такой последовательности. Находят теплоту реакции отверждения, по справочным данным или из табл. 10.1 выбирают температуру пресс-формы и температуру предварительного нагревания пресс-материала. Рассчитывают T_M и относительную температуру θ , после этого по графику рис. 10.20 находят критерий Фурье. По табл. 10.2 определяют коэффициенты, а затем по уравнениям (10.16) и (10.17) рассчитывают время отверждения изделия.

Необходимо отметить, что данная методика расчета требует экспериментального уточнения времени отверждения перерабатываемой марки пресс-материала на пластометре (см. ГОСТ 15882—70), поскольку данные различных авторов по значению $t_{в.п}$ сильно различаются (см. табл. 10.2).

В тех случаях, когда перед прессованием материал нагревается до температуры, близкой к температуре отверждения $T_3 \approx T_{\phi} - 15^\circ\text{C}$, расчет времени нагревания t_H не проводят.

10.5.3. Время отверждения при литьевом прессовании

При литьевом прессовании материал загружается в отдельную загрузочную камеру и, пока происходит смыкание пресса, несколько нагревается. При течении через литники материал также соприкасается с горячими стенками формы, кроме того температура повышается вследствие диссипации энергии вязкого течения. Если пренебречь нагреванием материала от литниковых каналов, то повышение температуры от диссипации энергии вязкого течения составит $\Delta T = \Sigma \Delta p/c_v \rho$, а температуру материала после заполнения формирующей полости соответственно находят из уравнения:

$$T_B = T_3 + \Sigma \Delta p/c_p \rho \quad (10.19)$$

где $\Sigma \Delta p$ — суммарный перепад давления в литниковых каналах пресс-формы.

Перепад давления в литниковой системе рассчитывают следующим образом. Находят объемный расход расплава V через литниковую систему. Так как материал выдавливается из загрузочной камеры штоком, то:

$$V = F_{зк} v_2 \quad (10.20)$$

где $F_{зк}$ — площадь загрузочной камеры; v_2 — скорость опускания плиты пресса при рабочем ходе.

При расчете V для пресс-форм с нижней загрузочной камерой вместо v_2 подставляют скорость подъема поршня гидроцилиндра выталкивателя пресса.

Литниковую систему разбиваем на участки с постоянной геометрией (рис. 10.21) и находим размеры каналов. При расчете перепада давления для конкретной пресс-формы размеры литниковых каналов берут из чертежа, для проектируемой пресс-формы — определяют по графической зависимости (рис. 10.22). За навеску материала принимают массу полимера, проходящую через данный участок литниковой системы. Например, при использовании двухгнездовой пресс-формы для участка II (рис. 10.21) навеска материала равна массе изделия $G_m = G_{изд}$, а для участка I $G_m = 2G_{изд}$. Таким образом, навеску материала можно рассчитать по уравнению:

$$G_m = G_{изд} n / c$$

где n — гнездность пресс-формы; c — число параллельных литников на данном участке.

При определении размеров литников кривая 1 (рис. 10.22) используется для распределительных литников (например, участки I и II на рис. 10.21), а прямая 2 — для впускных. Для конических литников по рис. 10.22 определяют наименьший радиус, а затем по конусности и длине литника рассчитывают второй радиус R_2 . Ширину литника находят с учетом полученной глубины литника: для распределительных литников $b = 2h$, для впускных (щелевых) $b = 6h$.

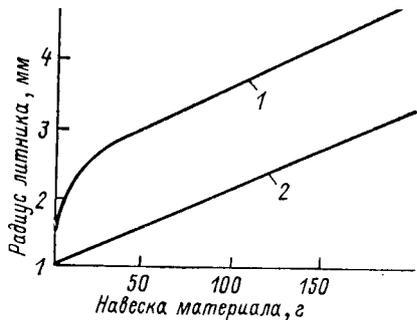
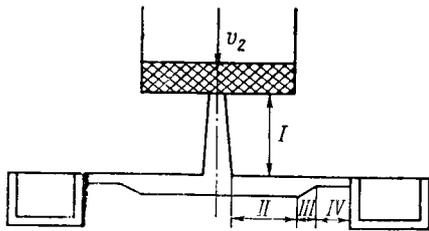


Рис. 10.21. Схема литниковой системы.

Рис. 10.22. Зависимость размеров литниковых каналов от навески пресс-материала, проходящего через данный участок:

1 — распределительные литники; 2 — впускные литники.

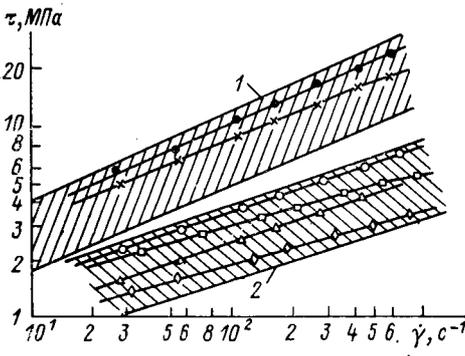


Рис. 10.23. Кривые течения термо-реактивных пресс-материалов:

1 — область кривых течения волокнистых материалов (· — ДСВ, 150 °С; × — АГ-4, 150 °С); 2 — область кривых течения для пресс-порошков (○ — К-114-35, 170 °С; □ — Э2-330-02, 160 °С; △ — К-214-3, 170 °С; ◇ — Сп 1-342-02, 170 °С).

Зная размеры литников и объемный расход расплава, рассчитывают скорость сдвига, а затем по кривой течения для каждого участка находят напряжение сдвига и определяют перепады давлений.

Для нахождения напряжения сдвига можно использовать реологические графики с выделенными областями усредненных кривых течения для различных пресс-материалов (рис. 10.23). Для расчета обычно используют верхнюю и нижнюю границы области, при этом находят минимальное и максимальное значения напряжения сдвига. Расчет можно вести также по среднему значению напряжения (средняя линия области).

Для расчета скорости и напряжения сдвига можно воспользоваться уравнениями, приведенными в табл. 5.1.

Входовой поправочный коэффициент m учитывается на тех участках литниковой системы, где наблюдается резкий переход от одного сечения канала к другому или поворот литника под углом примерно 90°. Для нашего примера (см. рис. 10.21) входовой коэффициент учитывается для участков I и II, а для участков III и IV $m = 0$. Значения входовых коэффициентов зависят от скорости сдвига и вида материала; они приведены на рис. 10.24. Показатель степени n находят по уравнению (2.23) из кривой течения для конкретного материала или по средней линии области реологического графика (см. рис. 10.23).

Общий перепад давления в литниковой системе определяют как сумму перепадов на всех участках одной парал-

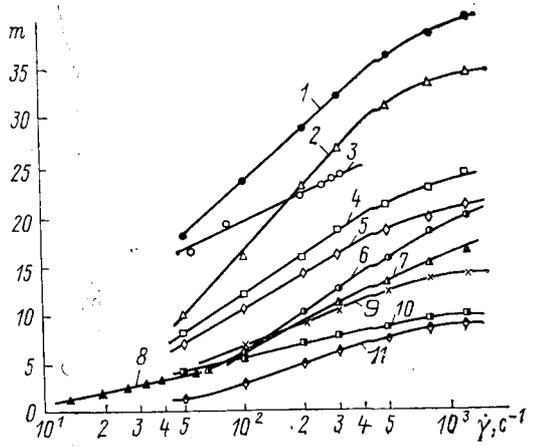
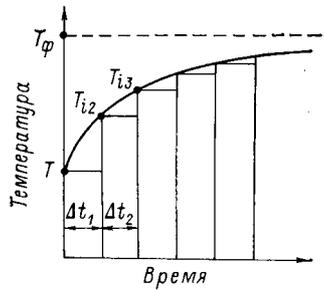


Рис. 10.24. Зависимость входового поправочного коэффициента m от скорости сдвига для термо-реактивных материалов:

1 — К-114-35, 170 °С, $d = 2$ мм; 2 — К-214-2, 170 °С, $d = 2$ мм; 3 — АГ-4, 140 °С, щель $b = 6$ мм, $h = 1,5$ мм; 4 — К-18-2, 170 °С, $d = 2$ мм; 5 — К-18-2шс-37, 170 °С, $d = 2$ мм; 6 — К-21-22, 140 °С, $d = 2$ мм; 7 — К-21-22, 160 °С, $d = 2$ мм; 8 — К-21-22, 160 °С, $d = 5$ мм; 9 — АГ-4, 140 °С, $d = 5$ мм; 10 — АГ-4, 150 °С, $d = 5$ мм; 11 — ДСВ, 150 °С, $d = 5$ мм.

Рис. 10.25. Зависимость температуры внутренних слоев пресс-материала от времени пребывания его в формирующей полости.



лельной ветви литниковой системы:

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_I + \Delta p_{II} + \Delta p_{III} + \Delta p_{IV} \quad (10.21)$$

При правильно выбранных размерах литниковых каналов суммарный перепад давления должен быть равен: $\Sigma \Delta p_i \leq 40-50$ МПа.

По найденному значению перепада давления рассчитывают температуру материала, см. уравнение (10.19). Если температура T_B будет намного меньше температуры отверждения $T_B < T_M$, то далее расчет следует проводить по уравнению (10.16) и (10.17). За относительную температуру при этом принимают следующую величину:

$$\Theta = (T_\phi - T_M) / (T_\phi - T_B) \quad (10.22)$$

В том случае, когда температура после заполнения пресс-формы высокая ($T_B \approx T_M$), сразу после заполнения формирующей полости начинается процесс отверждения. Одновременно с этим температура внутренних слоев пресс-материала будет изменяться во времени (рис. 10.25), приближаясь к температуре пресс-формы.

При загрузке материала с высокой температурой расчет можно проводить как для неизотермического процесса отверждения. Для вывода уравнения рассмотрим изменение температуры во времени и кинетику отверждения материала с изменяющейся температурой.

Используя уравнение нестационарной теплопроводности для пластины (5.119) при сохранении первого члена ряда этого уравнения, с учетом теплоты реакции отверждения находим изменение температуры внутренних слоев материала во времени:

$$T_i = T_\phi + \frac{Q_D}{c_p} \sum_{i=1}^{n-1} K_{i-1} - \frac{4}{\pi} (T_\phi - T_B) \bar{e}^{-\pi^2 a t_i / \delta^2} \quad (10.23)$$

где t_i — текущее значение времени; ΣK_{i-1} — доля отверждения пресс-материала за рассматриваемый интервал времени.

Если разбить весь интервал времени на отрезки $\Delta t = 10-20$ с, можно рассчитать время, необходимое для полного отверждения t_B при постоянной температуре T_i , отдельно для каждого отрезка:

$$t_B = (t_{B, II} - t_{B, I}) e^{\beta (T_{II} - T_I)} \quad (10.24)$$

Тогда, если рассматривать ступенчатое изменение температуры, доля отверждения пресс-материала K_i на каждом отрезке времени будет равна:

$$K_i = \Delta t / t_B \quad (10.25)$$

Полное отверждение материала произойдет тогда, когда сумма долей отверждения составит единицу:

$$\sum_{i=1}^{i=n} K_j = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta t/t_B) = 1 \quad (10.26)$$

Подставляя из (10.23) значение температуры в (10.24) и используя (10.26), находим:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{e^{\beta(T_{\Phi} + Q_p/2c_p - T_{\Pi})}}{(t_{B,\Pi} - t_{H,\Pi}) e^{4/\pi\beta(T_{\Phi} - T_B) \exp(-\pi^2 a^2 i/\delta^2)}} \Delta t = 1 \quad (10.27)$$

Полученное уравнение можно представить в виде определенного интеграла:

$$A \int_0^{t_B} e^{-H \exp(-Ct_B)} dt = 1 \quad (10.28)$$

где $A = \frac{e^{\beta(T_{\Phi} + Q_p/2c_p - T_{\Pi})}}{t_{B,\Pi} - t_{H,\Pi}}$; $H = 4\beta(T_{\Phi} - T_B)/\pi$; $C = \pi^2 a/\delta^2$.

Заменив переменные $He^{-Ct_B} = \tau$, получаем:

$$\int_H^{H \exp(-Ct_B)} e^{-\tau} \frac{d\tau}{\tau} = \frac{C}{A}$$

После повторной замены $e^{-\tau} = y$ в этом интеграле имеем:

$$\int_{-H}^{-H \exp(-Ct_B)} \frac{dy}{\ln y} = \frac{C}{A} + \int_0^{-H} \frac{dy}{\ln y}$$

Отсюда, учитывая, что $\int_0^x \frac{dy}{\ln y} = L_i x$, находим:

$$L_i e^{-H \exp(-Ct_B)} = L_i e^{-H} + C/A$$

где $L_i x$ — интегральный логарифм,

по известному значению H находим значение $L_i e^{-H}$, а затем по величине $L_i e^{-H} + C/A = \Phi$, используя интегральный логарифм для $L_i e^{-H \exp(-Ct_B)}$, находим $N = e^{-H \exp(-Ct_B)}$. Зная значения N , C и H , рассчитываем время отверждения изделия t_B :

$$t_B = \frac{1}{C} \ln \left(\frac{H}{\ln \frac{1}{N}} \right) \quad (10.29)$$

Данную задачу можно также решить приближенным методом. В уравнении (10.28) подынтегральное выражение разлагаем в ряд и ограничиваемся двумя первыми слагаемыми:

$$\int_0^{t_B} (e^{-H} + t H C e^{-H}) dt \approx 1/A$$

После интегрирования имеем:

$$t_{\text{в}} + H C t_{\text{в}}^2 / 2 \simeq 1 / A e^H \quad (10.30)$$

Из этого уравнения определяем $t_{\text{в}}$.

10.5.4. Удельное давление литьевого прессования

Удельное давление определяется с учетом потерь давления в литниках $\Sigma \Delta p$ и давления, которое необходимо создать в момент смыкания пресса непосредственно в формующей полости:

$$p_{\text{уд}} = \Sigma \Delta p + p_{\text{к}} \quad (10.31)$$

где $p_{\text{к}}$ — удельное давление в форме, равное удельному давлению для компрессионного прессования, $p_{\text{к}} = 25 \div 50$ МПа (см. табл. 10.1).

Расчетные значения $t_{\text{в}}$ и $p_{\text{уд}}$ требуют экспериментального уточнения для каждой партии пресс-материалов. При расчетах невозможно также учесть все конструктивные особенности пресс-форм и многообразие изделий, особенно сложной конфигурации.

10.5.5. Навеска пресс-материала

Навеска пресс-материала, т. е. количество материала, загружаемого в пресс-форму, зависит от вида прессования, текучести пресс-материала и массы изделия. При компрессионном прессовании в закрытые пресс-формы навеску $G_{\text{н}}$ (в г) определяют по формуле:

$$G_{\text{н}} = 1,05 (G_{\text{изд}}^n + K_1 + K_2) \quad (10.32)$$

где $G_{\text{изд}}$ — масса изделия, г; n — гнездность пресс-формы; K_1 — коэффициент, учитывающий текучесть по Рашигу пресс-материала; K_2 — коэффициент, учитывающий колебание массы таблетки, $K_2 = g\bar{f}/2$ (здесь g — отклонение массы таблетки от номинального значения, г; \bar{f} — число загружаемых таблеток).

Ниже указаны значения g :

Масса таблетки, г	2,0—6,0	6,1—20	20—40
g , г	0,1—0,2	0,2—0,3	0,3—0,4

Значение коэффициента K_1 для расчета навески:

Масса изделия, г	1—10	10—20	20—30	30—50	50—100	100—200	200—500	>500
K_1 , г, при текучести по Рашигу								
120—180 мм	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	2,5	4,0	8,0
100—120 мм	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,5	2,5	5,0
80—100 мм	—	—	—	0,2	0,3	0,5	0,8	2,0

При прессовании в полузакрытых пресс-формах навеска равна

$$G_{\text{н}} = 1,05 (G_{\text{изд}}^n + K_1 + K_2 + \rho \delta_0 F_{\text{зк}}) \quad (10.33)$$

где ρ — плотность материала; δ_0 — толщина облоя, $\delta_0 = 0,02—0,03$ см; $F_{\text{зк}}$ — площадь загрузочной камеры, см².

При литьевом прессовании навеску рассчитывают по уравнению:

$$G_{\text{н}} = 1,05 (G_{\text{изд}}^n + K_1 + K_2 + G_{\text{л}} + G_{\text{п}} + G_{\text{о}}) \quad (10.34)$$

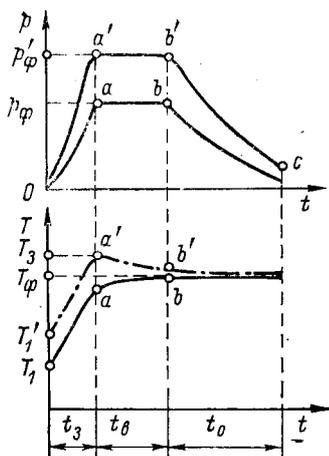
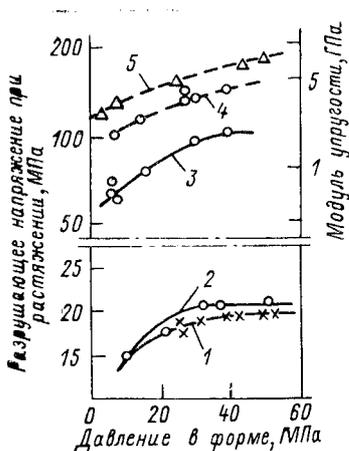


Рис. 10.28. Цикл-диаграмма литья под давлением реактопластов:

$0a$ — впрыск расплава; ab — выдержка под давлением; bc — выдержка при отверждении; цикл $0a'b'c$ — при высокой исходной температуре и давлении p_{ϕ} .

Рис. 10.29. Влияние давления в форме на прочность изделий:

1, 2 — разрушающее напряжение при растяжении для ФКПМ-15Т при диаметре литника 2 и 5 мм соответственно; 3 — разрушающее напряжение при растяжении для АГ-4В при диаметре литника 5 мм; 4 и 5 — модуль упругости для К-18-2 при диаметре литника 5 и 2 мм соответственно.



лости пресс-формы достигает максимального значения p_{ϕ} (отрезок $0a$ на рис. 10.28).

Поскольку часть давления теряется в литниковых каналах, удельное давление в цилиндре машины $p_{уд}$ должно быть больше, чем в форме:

$$p_{уд} = \Sigma \Delta p_{л} + \Sigma \Delta p_{с} + p_{к} \quad (10.35)$$

где $\Delta p_{л}$ и $\Delta p_{с}$ — перепады давлений в каналах литника и сопла; $p_{к}$ — давление, необходимое для уплотнения материала в форме, $p_{к} \approx 50$ МПа.

В момент впрыска в цилиндре создается высокое давление и, так как на хвостовике шнека отсутствует запорный клапан, как у термопластавтоматов, часть материала перетекает по винтовым каналам шнека назад. В некоторых случаях эти утечки достигают 30 % от объема дозирования. В конце впрыска давление в форме повышается и происходит адиабатическое сжатие материала, в результате чего его температура еще дополнительно повышается на 15—20 °С (см. рис. 10.28). При большом давлении отверждение ускоряется, так как температура пресс-материала после впрыска и сжатия может стать равной или больше температуры пресс-формы T_{ϕ} . Это хорошо видно из цикл-диаграммы литья под давлением p_{ϕ} (см. рис. 10.28, точка a'), когда температура изменяется от T_1 до T_3 .

Таким образом, пресс-материал начинает заполнять форму с температурой $T_1 = 130 \div 140$ °С, затем частично нагревается за счет диссипации энергии вязкого течения в литниках и адиа-

батического сжатия, т. е. после впрыска его температура повышается до 160—170 °С. Температуру можно рассчитать, используя уравнения (7.5) и (7.16). В связи с высокой температурой в момент заполнения формующей полости выделяются летучие соединения и пары воды. Для их удаления из формы в плоскости разреза на плитах необходимо предусматривать воздушные каналы. После заполнения формы материал затекает в воздушные каналы и перекрывает их, в формующей полости создается высокое давление.

При литье реактопластов не происходит ориентации макромолекул, как у термопластов. Возникающая анизотропия прочности и усадки изделий в основном объясняется ориентацией волокнистого наполнителя (древесной муки или стекловолокна). Направление ориентации во многом зависит от режима заполнения формы. Так, при струйном заполнении, как было показано на рис. 7.5, а, материал при движении укладывается спиральной струей и анизотропия практически отсутствует.

В отличие от литья термопластов, давление в форме выбирают из условия обеспечения прочности изделия. При увеличении давления разрушающее напряжение при растяжении повышается и при 40 МПа достигает постоянного значения (рис. 10.29). На прочность влияют также условия течения в литниках: чем тоньше литник, тем выше модуль упругости (кривые 4 и 5 на рис. 10.29), что объясняется, вероятно, более равномерным нагреванием пресс-материала.

От давления в форме зависит также усадка; чем выше давление, тем меньше усадка. Усадка повышается с ростом температуры формы, однако при литье реактопластов значительно меньше, чем при литье термопластов.

10.6.3. Выдержка под давлением

Данная операция необходима для отверждения пресс-материала в литниках формы, чтобы при отводе сопла не произошло вытекания материала из формующей полости. Выдержка под давлением осуществляется почти при постоянном давлении (см. отрезок *ab*, на рис. 10.28).

Время выдержки под давлением t_d зависит от температуры пресс-материала и формы, а так как при литье под давлением эти температуры почти равны, то расчет проводят по уравнению:

$$t_d = K_B (t_{в.п} - t_{н.п}) e^{\beta (T_{п} - T_3)} \quad (10.36)$$

где $t_{в.п}$, $t_{н.п}$, β , $T_{п}$ — см. обозначения к уравнениям (10.13) и (10.14); T_3 — температура материала после впрыска; K_B — коэффициент, учитывающий степень отверждения материала в литнике.

Поскольку вязкость материала очень высока, то выдержку можно прервать при достижении степени отверждения литника 50—60 %; поэтому можно ориентировочно принять $K_B \approx 0,5$.

По окончании выдержки под давлением механизм пластикации и впрыска отводится от формы, давление внутри цилиндра сбрасывается до $p_{п}$ (давление подпора) и начинается дозирование следующей порции. После отвода сопла часть материала может вытечь из формы, но при этом оставшееся давление не должно быть менее 40 МПа.

Во время выдержки под давлением происходит теплообмен между материалом и поверхностью формообразующей полости. При этом, если температура материала после впрыска и сжатия ниже $T_{ф}$, то материал нагревается (отрезок ab на рис. 10.28). Если же температура материала выше $T_{ф}$, во время выдержки она может понизиться до $T_{ф}$ (отрезок ab на рис. 10.28).

Таким образом, при выдержке под давлением происходит частичное отверждение, вследствие чего может изменяться плотность материала и его объем. Поскольку материал в литниковых каналах вначале выдержки не отвержден, то в формующую полость формы дополнительно нагнетается материал, который компенсирует изменение объема отливки.

10.6.4. Выдержка при отверждении

Выдержка при отверждении необходима для окончательного завершения реакции отверждения. Время отверждения зависит от температуры материала и формы, а также от технологических свойств пресс-материала.

Поскольку процесс отверждения начинается сразу после впрыска и происходит без значительного изменения температуры, то время отверждения $t_{в}$ можно рассчитать по уравнению:

$$t_{в} = [(t_{в.п} - t_{п.п}) e^{\beta(T_{пл} - T_{ср})}] - t_{д} \quad (10.37)$$

где $T_{ср}$ — средняя температура материала в процессе выдержки, $T_{ср} = (T_{з} + T_{ф})/2$.

В данном случае процесс не связан с теплопередачей, поэтому время отверждения не зависит от толщины изделия и его конфигурации. Однако, когда литье проводится при температурах,

сильно отличающихся от $T_{ф}$, то толщина изделия влияет на время отверждения и для расчета $t_{в}$ необходимо использовать уравнение (10.29) или (10.30).

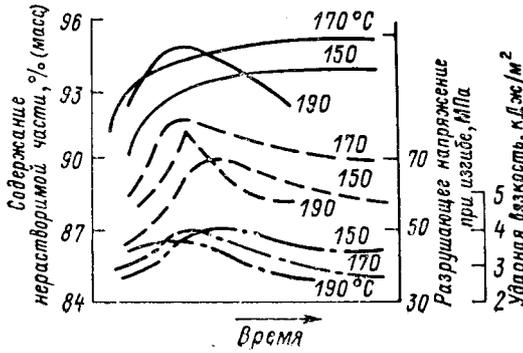


Рис. 10.30. Зависимость свойств изделия от времени отверждения и температуры формы при литье К-18-2:
 — содержание неразстворимой части; --- разрушающее напряжение при изгибе; - - - ударная вязкость.

Влияние температуры формы и времени отверждения на свойства изделий показаны на рис. 10.30. Из рисунка следует, что оптимальная выдержка, обеспечивающая наилучшие свойства, зависит от температуры формы. В начале с ростом температуры свойства повышаются, а затем начинают снижаться, особенно это характерно для разрушающего напряжения при изгибе.

После окончания выдержки и отверждения материала происходит раскрытие формы и удаление изделия. Изделия извлекаются из формы при высокой температуре, так как при отверждении связующее переходит в неплавкое и нерастворимое состояние. Вследствие полной изоляции оформляющей полости, оказывать влияние на характер протекающих процессов после выдержки под давлением практически невозможно. Эти процессы можно изменить только путем задания их начальных параметров: давления, степени нагрева материала. В зависимости от этих параметров изменяется время отверждения, однородность протекания реакции, плотность и прочность изделий. Давление, создаваемое в форме, влияет на усилие смыкания формы. Чтобы исключить раскрытие формы и вытекание материала, усилие смыкания $p_{см}$ должно быть больше произведения площади отливки $F_{плд}$ на давление в форме $p_{ф}$:

$$p_{см} \geq p_{ф} (F_{изд} + F_{пл}) \quad (10.38)$$

При низких усилиях смыкания в плоскость разъема пресс-формы затекает материал и на изделиях образуется толстый облой, меняются размеры изделий.

Основное преимущество литья под давлением по сравнению с литьевым прессованием заключается в возможности совмещения технологических операций, ускорении процесса отверждения. В данном случае отпадает необходимость в таблетировании, предварительном нагревании и ручной загрузке материала. При литье под давлением все операции могут быть автоматизированы, что позволяет повысить производительность машины и качество изделий. Однако для литья под давлением необходимо использовать гранулированные материалы, обладающие достаточным временем пребывания в вязкотекучем состоянии и сравнительно высокой скоростью отверждения.

Глава 11

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

11.1. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

Механическая обработка изделий, изготовленных различными методами, применяется преимущественно для удаления облоя, приливов, литников или снятия фаски по месту разъема формы. В некоторых случаях механическим способом выполняются отдельные элементы изделий, которые трудно оформить прессованием

или литьем под давлением непосредственно в форме (боковые пазы, отверстия и т. д.). Применяется механическая обработка также для повышения класса точности отдельных размеров, которые невозможно получить при изготовлении изделий, вследствие колебания усадки. Доработка изготовленных изделий обычно производится точением, фрезерованием, сверлением, шлифованием или вырубкой штампом.

Обработка пластмассовых изделий в отличие от обработки металлов имеет ряд особенностей, обусловленных строением полимеров и свойствами их композиций. В связи с тем, что полимеры обладают низкой теплопроводностью, теплота, которая выделяется при снятии стружки, концентрируется преимущественно в тонком слое. Это приводит к тому, что при точении происходит местный разогрев до 500—600 °С, в результате которого полимер в месте снятия стружки оплавляется или пригорает, стружка прилипает к режущему инструменту и затрудняется ее удаление. При этом увеличивается трение и может произойти вырыв полимера на обрабатываемой поверхности. При снятии стружки режущим инструментом возникают усилия резания, под действием которых полимер деформируется, в результате чего снижается точность обработки и поверхность становится волнистой.

Особые трудности возникают при изготовлении изделий из армированных пластмасс, обладающих анизотропией прочности (гетинакс, стеклотекстолит, стеклонаполненный полиамид). Поскольку полимеры обладают сравнительно низкой адгезией к наполнителю, особенно к стекловолокну, под действием усилия резания происходит расслоение материала, и чистота обработки снижается. При этом, как правило, образуется пыль, которую необходимо удалять, используя местную отсасывающую вентиляцию. Кроме того, при обработке пластмасс, наполненных стекловолокном или кварцевой мукой, происходит сильный абразивный износ режущей кромки инструмента даже из твердых сплавов, поэтому инструмент приходится затачивать через 5—18 мин. При обработке металлов для охлаждения изделия и инструмента очень широко применяют жидкости. Большинство же пластмасс обладает значительным водопоглощением, вследствие чего охлаждение жидкостью неприменимо. Для этого обычно используют охлажденный сжатый воздух.

При резании пластмасс иначе, чем у металлов, протекает и процесс стружкообразования. Так, при обработке хрупких пластмасс снятие стружки сопровождается отсутствием пластического течения полимера, и процесс резания происходит за счет скалывания материала в зоне образования стружки. При обработке изделий из термопластичных полимеров ввиду высокой скорости нагружения пластическая деформация, обусловленная местным нагревом полимера, проявляется только в очень тонком слое, остальная же часть стружки образуется в результате хрупкого разрушения. Таким образом, скорость резания влияет на про-

Рис. 11.1. Схема образования стружки и основные углы реза: 1 — изделие; 2 — стружка; 3 — режущий инструмент.

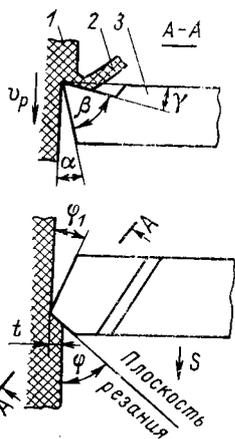
процесс образования стружки двойко. При повышении скорости растет тепловыделение и пластическая деформация увеличивается, но при этом возрастает скорость приложенная нагрузка и полимер начинает вести себя как хрупкое тело. Поэтому в зависимости от условий резания, вида полимера и конструкции режущего инструмента существует узкая область скоростей резания, обеспечивающая высокую точность и качество поверхности.

Прежде чем перейти к рассмотрению конкретных видов механической обработки, необходимо разобрать основные понятия и элементы процесса резания. При всех видах механической обработки процесс образования стружки происходит почти одинаково, поэтому для простоты рассмотрим его на примере однолезвийного инструмента (резца) (рис. 11.1).

Процесс механической обработки осуществляется за счет взаимного перемещения обрабатываемого изделия 1 и режущего инструмента 3 со скоростью v_p , в результате чего происходит снятие стружки 2. Режущая грань реза образована передней и задней поверхностями реза (см. сечение А—А на рис. 11.1). Передняя поверхность с основной (горизонтальной) плоскостью образует передний угол γ , а задняя и вертикальная плоскости образуют задний угол α , который определяет силу трения реза об обрабатываемую поверхность и обычно выбирается в пределах $10\text{--}20^\circ$.

Угол заострения реза β зависит от этих углов α и γ : $\beta = 90 - \alpha \pm \gamma$. Если посмотреть на резец в плане, то плоскость резания расположена к обрабатываемой поверхности под углом φ , а вспомогательная задняя поверхность под углом φ_1 . Скорость перемещения изделия относительно реза называется скоростью резания и обозначается v_r , а толщина срезаемого слоя с поверхности изделия t называется глубиной резания. Резец перемещается также относительно изделия в горизонтальной плоскости, т. е. происходит подача, которую обычно выражают в миллиметрах за один оборот или один проход реза и обозначают буквой S . Таким образом, условия резания задаются геометрией реза (углами γ , α , φ , φ_1) и режимом резания (скоростью резания, глубиной и подачей).

При снятии стружки образуются силы, под действием которых происходит деформация полимера. Резец при движении сжимает слой полимера и на передней поверхности возникает сила N , направление которой зависит от угла γ и силы трения стружки о резец. Если передний угол отрицательный ($\gamma < 0$), то полимер испытывает большие сжимающие силы, так как вектор N_y направлен в сторону обрабатываемого изделия (рис. 11.2). Под



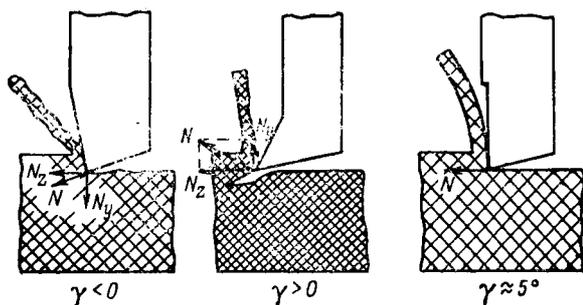


Рис. 11.2. Направление составляющих сил резания при различных значениях переднего угла γ .

действием сжимающих усилий полимер деформируется, а после прохода режущей кромки происходит упругое восстановление размеров, и поверхность изделия прижимается к плоскости резания. В связи с этим увеличиваются силы трения и происходит сильное разогревание изделия, нарушается точность обработки и чистота поверхности ухудшается. Если передний угол, наоборот, очень велик ($\gamma > 0$), то нормальная сила N_y направлена в противоположную сторону, обрабатываемая поверхность испытывает растягивающие напряжения, и происходит образование стружки с выкрошиванием, образуются вырывы на поверхности. Обычно передний угол γ выбирают таким, чтобы $N_y \approx 0$. Как видно из рис. 11.3, нормальная сила N_y достигает минимального значения $\gamma \approx 5^\circ$, однако оптимальное значение угла не постоянно, а изменяется в зависимости от вида полимера и скорости резания. Сила резания N_z увеличивается с ростом глубины резания и уменьшается при увеличении γ .

Качество обрабатываемой поверхности в основном зависит от подачи (рис. 11.4), поэтому для уменьшения шероховатости вершину реза делают с закруглением радиуса $r \approx 0,5$ мм. При обработке термопластичных полимеров шероховатость поверхности несколько снижается при увеличении скорости резания, однако определяющими факторами являются подача и радиус закругления.

От режимов резания зависит также стойкость (время работы до затупления) резцов. Так, износ задней поверхности возрастает

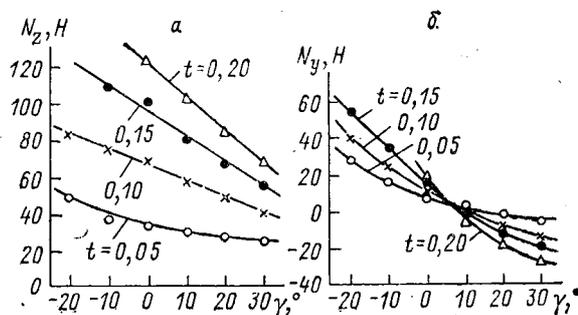


Рис. 11.3. Влияние переднего угла γ и глубины резания t на составляющие силы резания N_z (а) и N_y (б) при точении поливинилхлорида.

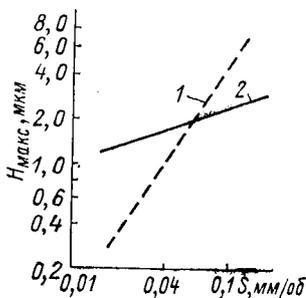


Рис. 11.4. Зависимость шероховатости поверхности H от подачи S при точении поливинилхлорида:

1 — алмазная режущая кромка; 2 — твердосплавные резцы.

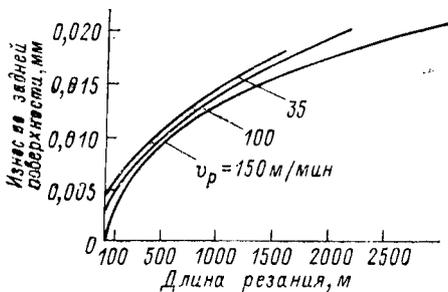


Рис. 11.5. Зависимость износа твердосплавного резца от длины и скорости резания.

с увеличением подачи, глубины и скорости резания (рис. 11.5). Однако основной износ инструмента зависит от длины резания (длины снятия стружки), вида обрабатываемого материала и материала режущей кромки инструмента.

Процесс обработки резанием может быть условно оценен по коэффициенту обрабатываемости K :

$$K = V_M / V_H H W_P \quad (11.1)$$

где V_H — износ режущего инструмента, $\text{м}^3/\text{с}$; V_M — объем срезаемого полимера, $\text{м}^3/\text{с}$; H — шероховатость поверхности; W_P — расход энергии на процесс резания.

$$W_P = N_z v_p \quad (11.2)$$

где N_z — сила резания; v_p — скорость резания.

При обработке шлифованием процесс резания практически сохраняется, но имеются некоторые особенности. Например, геометрия режущей кромки в данном случае зависит от формы абразивных зерен, которые запрессованы в шлифовальном круге или наклеены на бумагу. Размеры элементарных режущих поверхностей оцениваются по зернистости шлифовального круга. В зависимости от обрабатываемого материала шлифовальные круги выбирают с определенной твердостью, структурой (плотностью расположения зерен) и видом основы (керамическая, бакелитовая или вулканитовая). Твердость абразивного инструмента должна быть такой, чтобы по мере затупления зерен происходило их выкрошивание и обновление поверхности круга. При шлифовании пластмасс применяют круги с открытой структурой, чтобы поверхность круга не забивалась обрабатываемым полимером. В зависимости от обрабатываемой поверхности абразивные круги могут быть цилиндрические, конические, а также в виде дисков или конусов.

11.2. УДАЛЕНИЕ ОБЛОЯ И ЛИТНИКОВ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ РЕАКТОПЛАСТОВ

В зависимости от конструкции пресс-форм облой может быть расположен на торцевой и боковой поверхностях, в соответствии с этим выбирается схема доработки изделия.

Облой на изделиях из реактопластов удаляется преимущественно шлифованием с применением электрокорундовых и конокорундовых абразивных кругов. Изделия с прямыми гранями шлифуют на цилиндрических кругах с использованием приспособления, показанного на рис. 11.6. Изделие 3 устанавливают на стол 4 и в процессе снятия облоя и фаски по контуру прижимают к абразивному кругу 1. Размер снимаемой фаски задается установкой ограничителя 2, к которому изделие может плотно прижиматься пружиной или направляющей пленкой, закрепляемой на столе 4.

Угол наклона фаски задается перемещением стола 4 по вертикали. Круглые изделия также можно обрабатывать на подобном приспособлении, но при этом их следует приводить во вращение вокруг оси с помощью отдельного привода. Если доработка проводится с помощью наждачной бумаги (шкурки), то используется приспособление с металлическим диском 2, на который наклеена абразивная шкурка на бумажной или тканевой основе (рис. 11.7). Изделие 3 устанавливают на поворотном столе 4, угол наклона которого задается в зависимости от формы изделия. Данное приспособление применяется для удаления облоя преимущественно на торцевой поверхности изделия. Скорость шлифования обычно устанавливают 25—30 м/с. Для черновой обработки шлифованием используют абразивные круги или шкурки с зернистостью 50—100, а для чистовой обработки 16—25 и твердостью М1—СМ1. Охлаждение осуществляется обычно струей сжатого воздуха или водой.

Для шлифования пластмассовых изделий с абразивным наполнителем целесообразно использовать алмазный инструмент, при этом резко возрастает стойкость и производительность процесса.

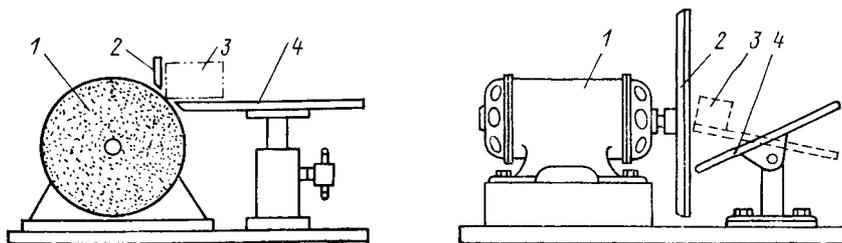


Рис. 11.6. Приспособление для снятия облоя с боковой поверхности: 1 — абразивный круг; 2 — ограничитель; 3 — изделие; 4 — стол.

Рис. 11.7. Приспособление для снятия облоя с торцевой поверхности изделия: 1 — электродвигатель; 2 — диск; 3 — изделие; 4 — стол.

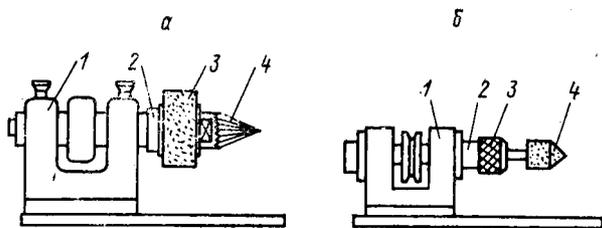


Рис. 11.8. Приспособления для удаления облоя в отверстиях:

1 — корпус; 2 — шпиндель; 3 — цилиндрическая оправка; 4 — коническая оправка.

Облой в отверстиях удаляют с помощью конических зенкоров с твердосплавными пластинками на режущей кромке (рис. 11.8, а) или конических шлифовальных кругов (рис. 11.8, б). Подобные устройства можно использовать также для снятия фаски по внутренней кромке изделия.

Для удаления облоя можно использовать галтовочные барабаны с перфорированной стенкой. Изделия загружают в восьмигранный или шестигранный барабан, внутренняя поверхность которого облицована листовым поливинилхлоридом или полиэтиленом высокой плотности (рис. 11.9). При вращении барабана изделия ударяются друг о друга или о стенки, вследствие чего происходит скалывание облоя. Частицы облоя удаляются через отверстия в стенках. Частоту вращения барабана рассчитывают с таким условием, чтобы изделия поднимались на определенную высоту, а затем падали, т. е. чтобы центробежная сила была меньше силы тяжести. В некоторых случаях вместе с изделиями в барабан загружают кленовые кубики или другие тела, форму и материал которых подбирают в зависимости от свойств материала изделия и его габаритов.

При крупносерийном производстве иногда используют дробеструйные установки (рис. 11.10), в которых вместо дроби применяют капроновые кубики или цилиндрики, приводимые в движение сжатым воздухом. Сжатый воздух захватывает полимерную «дробь» 2, подаваемую дозатором, и через сопло 1 с большой

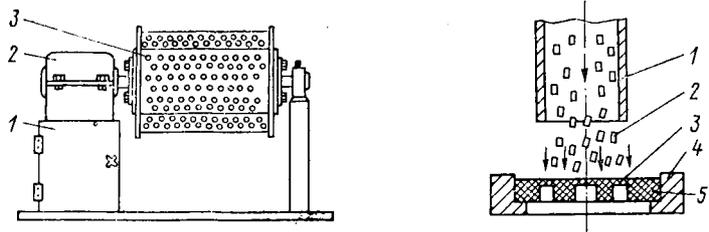


Рис. 11.9. Галтовочный барабан:

1 — станина; 2 — привод; 3 — барабан.

Рис. 11.10. Схема удаления облоя на дробеструйной установке:

1 — сопло; 2 — полимерная «дробь»; 3 — облой; 4 — оправка; 5 — изделие.

скоростью ударяет по изделию 5, которое закреплено в оправке 4. В результате происходит разрушение облоя 3.

Удаление литников производится преимущественно методом шлифования на цилиндрических или дисковых кругах. Широкое применение находят алмазные отрезные круги. Центральные пальцевые литники, имеющие большие размеры, обычно удаляют точением на фрезерных или токарных станках. Для обработки применяют режущий инструмент с пластинками из твердых сплавов ВК2, ВК3М, ВК6М, ВК6 (необходимо учитывать повышенную хрупкость сплавов ВК2 и ВК3М).

11.3. ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ

В отличие от реактопластов, при шлифовании изделий из термопластов трудно обеспечить высокую чистоту обработки. В особенности это относится к изделиям, изготовленным из полиэтилена, полипропилена и других эластичных материалов. При обработке их шлифованием происходит ориентация макромолекул в поверхностных слоях и частичное вырывание волокнистых частиц, вследствие чего образуется ворсистая поверхность, в особенности на краях изделия. Кроме того, при высоких скоростях шлифования может произойти оплавление поверхности и залипание абразивных зерен круга. Поэтому доработка изделий из термопластов производится преимущественно резанием однолезвийным или многолезвийным инструментом из быстрорежущей стали Р18.

Широкое применение для обработки изделий из нехрупких полимеров находит вырубка штампом (рис. 11.11). Изделие 1 закладывают в матрицу 2 штампа и прижимают резиновой плитой 3, после чего опускается пуансон 4, закрепленный в плитах 5 и 6, и происходит вырубка. Размеры пуансона и матрицы делают равными размерам изделия. При движении пуансона происходит обрубка облоя и литников одновременно. Облой на второй поверхности изделия (снизу) обрезается резцом 7, который движется вдоль матрицы 2.

Для снятия облоя можно использовать также галтовочные барабаны или дробеструйные установки, но они пригодны только для изделий, изготовленных из хрупких полимеров. Изделия из таких полимеров, как полиэтилен, полипропилен, пластифицированный поливинилхлорид, таким способом можно обрабатывать только при охлаждении ниже температуры морозостойкости, для чего используют жидкий азот или углекислый газ.

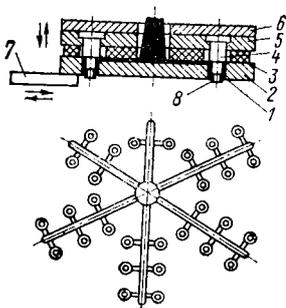


Рис. 11.11. Вырубной штамп для удаления облоя и литников:

1 — изделие; 2 — матрица; 3 — резиновая плита; 4 — пуансон; 5 и 6 — плиты; 7 — резец; 8 — облой.

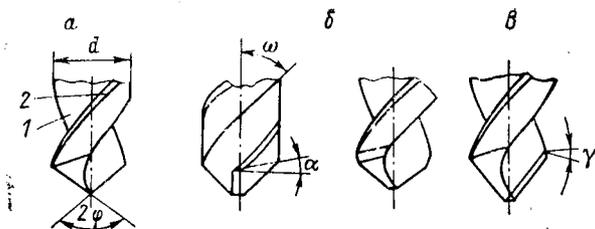


Рис. 11.12. Основные виды заточки сверл, применяемых при сверлении пластмасс: а — обычная заточка; б — с двойной заточкой; в — с заточкой режущих кромок. 1 — стружкоотводящая канавка; 2 — ленточка; d — диаметр сверла; φ — угол при вершине; ω — угол наклона винтовой канавки; α — задний угол; γ — передний угол.

Изделия из термопластов обрабатывают также в растворителе или парах растворителя. На непродолжительное время изделие погружается в пары растворителя, и тонкая перемычка облой быстро растворяется или притупляется. Однако пары воздействуют на всю поверхность изделия, что может отрицательно сказаться на его прочности и внешнем виде, поэтому данный метод применяется сравнительно редко.

Облой в отверстиях можно достаточно легко удалить сверлением с помощью сверл, показанных на рис. 11.12. Наиболее пригодны сверла со следующими параметрами заточки: $2\varphi = 70 \div 100^\circ$, $\omega = 12 \text{—} 17^\circ$, $\gamma = 0 \text{—} 3^\circ$, $\alpha = 10 \text{—} 20^\circ$. Для облегчения удаления стружки стружкоотводящая канавка 1 у сверла при обработке пластмасс делается полированной. Для повышения чистоты обработки применяют сверла с двойной заточкой угла при вершине (см. рис. 11.12, б). Толщина стружки, срезаемой второй режущей кромкой, при этом уменьшается и исключается образование трещин вокруг кромки отверстия.

Для уменьшения образования трещин применяются также сверла с подточкой режущих кромок, которая уменьшает передний угол (см. рис. 11.12, в). Как уже было показано в разделе 11.1, при уменьшении переднего угла γ снижается сила резания p_y , поэтому при сверлении исключаются вырывание и сколы обрабатываемой поверхности. Частоту вращения сверла выбирают в зависимости от его диаметра, вида полимера (теплостойкости), подачи и рассчитывают, исходя из скорости резания. Для большинства полимеров скорость резания при сверлении должна быть равна не менее 0,5—1,0 м/с, а подача 0,15—0,8 мм/об.

11.4. ПОЛИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ

Полирование проводится для повышения чистоты обработки поверхностей, на которых шлифованием удаляется облой или литники. Процесс обычно состоит из двух операций: предварительного полирования и притирки (глянцевания).

Предварительное полирование осуществляется на войлочных или миткалевых кругах, на поверхность которых наносят пасту,

состоящую из пемзы и воды. Поверхность изделия слегка поджимают к вращающемуся кругу и постепенно перемещают, чтобы обеспечить равномерность полирования и не допустить прижогов или оплавления поверхности. Частоту вращения круга выбирают с таким расчетом, чтобы под действием центробежной силы не происходило отделения пасты.

После мокрого полирования изделия тщательно промывают, а затем подвергают сухому полированию. Для этого применяют смеси абразивного порошка или окиси хрома с воском, парафином и минеральным маслом. Можно пользоваться готовыми пастами ГОИ или ВИАМ-2.

Для глянцеваания применяют очистной круг, который делается более мягким. На его поверхность наносят известковый или меловой состав, с помощью которого с поверхности удаляются следы жира и достигается необходимый глянец. При этом избегают больших усилий прижима круга, чтобы не повысилась температура выше температуры стеклования или теплостойкости по Вика. Для полирования изделий из реактопластов применяют полирующий состав, не содержащий масел.

Мелкогабаритные изделия можно полировать в галтовочных барабанах. В качестве полирующего состава применяют мел (или пемзу) и опилки в соотношении 1 : 1. Очищенные изделия загружают в барабан, не имеющий перфорации стенок вместе с полирующим составом. Для полирования можно использовать также полировальные пасты ГОИ или ВИАМ-2, которые наносят на деревянные кубики или шары, загружаемые вместе с изделиями в барабан. При вращении происходит трение изделий о пастоноситель и изделия полируются. Отполированные изделия очищают в другом барабане с опилками, а затем промывают и сушат.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

- Алфрей Т.* Механические свойства высокополимеров. М.: ИЛ, 1962.
- Андреанова Г. П.* Физико-химия полиолефинов. М.: Химия, 1974. 234 с.
- Аскадский А. А.* Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
- Басов Н. И., Ким В. С., Скуратов В. К.* Оборудование для производства объемных изделий из термопластов. М.: Машиностроение, 1972. 272 с.
- Бернхард Э.* Переработка термопластичных материалов. М.: Химия, 1965. 748 с.
- Богданов В. В.* Технологические свойства пластмасс. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 176 с.
- Богданов В. В., Торнер Р. В., Красовский В. Н., Регер Э. О.* Смещение полимеров. Л.: Химия, 1979. 192 с.
- Виноградов Г. В., Малкин А. Я.* Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.
- Говоров И. Д.* Механизация и автоматизация технологических операций обработки деталей из реактопластов. М.: Машиностроение, 1973. 190 с.
- Грифф А.* Технология экструзии пластмасс. М.: Мир, 1965. 308 с.
- Гуль В. Е., Кулезнев В. Н.* Структура и механические свойства полимеров. М.: Высшая школа, 1972. 320 с.
- Дедюхин В. Г., Ставров В. П.* Прессованные стеклопластики. М.: Химия, 1976. 272 с.
- Езжев А. С., Осипов А. В.* Механизация и автоматизация переработки пластмасс на принципе выносной пресс-формы. М.: Машиностроение, 1971. 157 с.
- Завгородний В. К.* Механизация и автоматизация переработки пластических масс. М.: Машиностроение, 1970. 596 с.
- Ким В. С., Скачков В. В.* Оборудование подготовительного производства заводов пластмасс. М.: Машиностроение, 1977. 183 с.
- Лапшин В. В.* Основы переработки термопластов литьем под давлением. М.: Химия, 1974. 270 с.
- Леонов А. И., Басов Н. И., Казанков Ю. В.* Основы переработки реактопластов и резин методом литья под давлением. М.: Химия, 1977. 216 с.
- Лукач Ю. Е., Рябинин Д. Д., Метлов Б. Н.* Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1967. 291 с.
- Мак-Келви Д. М.* Переработка полимеров. М.: Химия, 1965. 442 с.
- Практикум по технологии переработки пластических масс/Под ред. Виноградова В. М., Головкина Г. С. М.: Химия, 1980. 240 с.*
- Тагер А. А.* Физикохимия полимеров. М.: Химия, 1978. 544 с.
- Торнер Р. В.* Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1977. 464 с.
- Тябин Н. В.* Реологическая кибернетика. Волгоград, 1977. 112 с.
- Фридман М. Л.* Технология переработки кристаллических полиолефинов. М.: Химия, 1977. 398 с.
- Шенкель Г.* Шнековые прессы для пластмасс. Пер. с нем./Под ред. Шапиро А. Я. Л.: Госхимиздат, 1962. 467 с.
- Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия. Т. 1, 1972; т. 2, 1974; т. 3, 1977.*

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

К главе 1

- Акутин М. С., Афанасьев Н. В.* Теоретические основы переработки пластмасс. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1974. Ч. 1, 158 с.; ч. 2, 126 с.
- Бартенев Г. М., Зеленов Ю. В.* Курс физики полимеров. Л.: Химия, 1976. 288 с.
- Манделькern Л.* Кристаллизация полимеров. М., Л.: Химия, 1968. 336 с.

К главе 2

Белкин И. М., Виноградов Г. В., Леонов А. И. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. М.: Машиностроение, 1963. 272 с.

Малкин А. Я., Чалых А. Е. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М.: Химия, 1965. 304 с.

Мидлман С. Течение полимеров. М.: Мир, 1971. 263 с.

Рейнер М. Деформация и течение. М.: Гостоптехиздат, 1963. 382 с.

Хан Чанг Дей. Реология в процессах переработки полимеров: Пер. с англ./ Под ред. Виноградова Г. В. и Фридмана М. Л. М.: Химия, 1979. 368 с.

К главе 3

Григорьев А. П. Практикум по технологии полимеризационных пластмасс. М.: Высшая школа, 1977. 248 с.

Гурова Т. А. Технический анализ и контроль производства пластмасс. М.: Высшая школа, 1980. 200 с.

Соколов А. Д. Методы определения технологических свойств реактопластов. Л.: ЛДНТП, 1974.

Ставров В. П., Дедюхин В. Г., Соколов А. Д. Технологические испытания реактопластов. М.: Химия, 1981. 248 с.

К главе 4

Глуханов Н. Н., Федорова И. Г. Высоочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1972. 158 с.

Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

Кулезнев В. Н. Смеси полимеров. М.: Химия, 1980. 304 с.

Красовский В. Н. Переработка полимерных материалов на валковых машинах. Л.: Химия, 1979. 120 с. (Библиотечка рабочего по переработке полимерных материалов).

Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. М.: Машиностроение, 1973. 272 с.

К главе 5

Вопросы экструзии термопластов/Под ред. Левина А. Н. М.: ИЛ, 1963. 335 с.

Переработка пластмасс. Киев: Техника, 1969. 160 с.

Переработка полимерных материалов. Киев: Техника, 1971. 96 с.

Прокунин А. Н., Фридман М. Л., Виноградов Г. В. — Механика полимеров, 1977, № 3, с. 497—505.

Сагалаев В. Г., Гдалин С. И., Сагалаев Г. В. — Механика полимеров, 1977, № 1, с. 160.

Старков Е. А. Влияние технологических параметров процесса экструзии на качество изделий из полиолефинов. Л.: ЛДНТП, 1965. 35 с.

Тябин Н. В., Бортников В. Г., Цытовский Е. М., Вацагин К. Д. — Механика полимеров, 1968, № 3, с. 531—539.

К главе 6

Басов Н. И., Жаркова Л. К., Скуратов В. К. — Труды МИХМ. М.: Машиностроение, 1964. т. 27, с. 138—151.

Каплун Я. Б., Левин А. Н. — Пласт. массы, 1965, № 2, с. 46—51.

Самосатский Н. Н. Полиэтилен. Способы переработки. Киев: Техника, 1968. 234 с.

Шершнев П. Н., Тябин Н. В., Виноградов Н. Н. — Труды Волгоградск. политехн. ин-та, 1975, с. 140—146.

К главе 7

Басов Н. И., Филипчук И. И., Казанков Ю. В. — Труды МИХМ. М.: Машиностроение, 1964, т. 27, с. 98—104.

Брагинский В. А. Усадка и точность деталей из пластмасс. Л.: ЛДНТП, 1963. Ч. 1, с. 44.

Завгородний В. К., Калинин Э. Л., Марам Е. И. Литые машины для термопластов и реактопластов. М.: Машиностроение, 1968. 376 с.

К главе 8

Блюменталь М. Г., Пряников М. И., Эппель П. Я., Тарасов В. В. — Пласт. массы, 1971, № 5, с. 30—32.

Ивахненко П. Я., Лапшин В. В., Акутин М. С. — Пласт. массы, 1965, № 6, с. 31—35; 1967, № 12, с. 49—52.

Никитин Ю. В. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Сб. научн. тр. ЛТИ, Л., 1969, с. 30—35.

Салазкин К. А., Реутов С. В. — Труды МИХМ. М.: Машиностроение, 1964, т. 27, с. 158—166.

Стрельцов К. Н. Переработка термопластов методами механо пневмоформования. Л.: Химия, 1981. 232 с.

К главе 9

Бекин Н. Г., Торнер Р. В., Петрушанский В. Ю., Сахаев А. И. — Каучук и резина, 1971, № 6, с. 28.

Елизаров В. И., Сиразетдинов Т. К. — Авиационная техника, 1973, № 4, с. 10—16.

Красовский В. Н., Минишка В. И., Мирзоев Р. Г. — В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Сб. научн. трудов ЛТИ им. Ленсовета. Л., 1969, с. 42—49.

Ломов А. А., Гончаров Г. М., Бекин Н. Г. — В кн.: Реология, процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. сб. Волгоград, 1980, с. 102—105.

Скробин Ю. Б., Тябин Н. В. — Прикладная механика, 1969, т. 5, № 5, с. 130—133.

К главе 10

Бортников В. Г., Хайруллин И. Х. Тепло- и массообмен в химической технологии: Межвуз. сб. Казань, 1976, вып. 4, с. 65—68.

Бортников В. Г., Шамгунов Д. Р. Машины и технология переработки полимеров: Межвуз. сб. Л., 1970, № 2, с. 88—92.

Брагинский В. А. Технология прессования точных деталей из терморезистивных пластмасс. Л.: Химия, 1971. 356 с.

Соколов А. Д. — Пласт. массы, 1969, № 5, с. 41—43; № 6, с. 35—38.

Соколов А. Д., Швец М. М., Артемов В. С. Производство электрических деталей из реактопластов литьем под давлением. М.: Энергия, 1979. 184 с.

К главе 11

Казанский Ю. Н. — Пласт. массы, 1971, № 5, с. 73—79.

Кобяшши Акира. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974. 192 с.

Осиновский Э. И., Суворов В. Д. Механическая обработка и отделка изделий из пластмасс. Л.: Химия, 1976. 96 с. (Библиотечка рабочего по переработке пластмасс).

Штуцкий В. П. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974. 144 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Агрегат для производства труб 131
Агрегирование структуры 36
Алфрейя—Гарни модель 60
Аморфное фазовое состояние см. Жидкое фазовое состояние
Аморфные полимеры 5, 6, 9
нагревание при формовании 226
особенности строения 16—21
переработка формованием 223
термомеханическая кривая 11
Анизотропия свойств
литевых изделий 205, 206
пленки 239
труб 133, 134, 138
усадки 76—80, 138, 220
Аномалия вязкости 31, 36, 37, 39, 127, 128
Аномально вязкие жидкости 42—46
Армированные изделия 259, 263
Армированные пластмасы, механическая обработка 228
Ацетаты целлюлозы, переработка каландрованием 237
Ацетобутират целлюлозы, удельный объем 79
Барабанный смеситель 91
Барруса эффект 29, 61—67
Био критерий 154, 169
Блеск поверхности, зависимость от температуры расплава 191
Ближний порядок 19
Блоки прессования 262
Больцмана уравнение 57
Вайссенберга эффект 29, 61, 67, 68
Вайссенберга—Муни—Ривлинга формула 61, 62
Вакуумная насадка при получении труб 145, 146
Вакуумное калибрование труб 155
Вакуумформование 7, 224, 233—235
в матрицу 233
на пуансоне 233, 234
с предварительной вытяжкой сжатым воздухом 234
с вытяжкой
воздушной подушкой 234
толкателем 233
Валки для охлаждения пленки 172, 175
Вальцевание 92, 93
термопластов с повышенной влажностью 81
Ван-Кревелена классификация методов переработки 86, 87
Векторы сил трения в канале шнека 105, 106
Виноградова—Малкина уравнения 34, 35
Виктергерста уравнение 194
Влажность пресс-материалов 80—82, 248
влияние на таблетруемость 84
влияние на усадку 78
Водяное охлаждение пленки 176, 177
Впрыск расплава при литье реактопластов 273—275
термопластов 203—208
Время впрыска 204
Время выдержки
под давлением при литье 221, 222
при компрессионном прессовании 252
при охлаждении в процессе литья под давлением 222
при прессовании 73
Время вязкотекучего состояния пресс-материалов 246
Время нагревания при компрессионном прессовании 264, 265
Время отверждения пресс-материалов 72—74, 248, 276, 277
в пластометре 73
при компрессионном прессовании 264—266
при литьевом прессовании 266—271
стандартных образцов 74, 75
Время охлаждения изделий 147, 153, 193, 230
Время релаксации 57, 58
Входные потери давления 51—54
Входовой поправочный коэффициент 51, 52, 53, 268
Выдержка
под давлением 208—210, 275, 276
при отверждении 276, 277
Выдувание
из литевых заготовок 195—198
пустотелых изделий 180—198
свободное 232
Выдувной агрегат
производительность 182, 183
с копильником 183, 184
Выравнивание потоков расплава в коллекторной головке 172, 173
с помощью
регулируемого кольца 136, 137
симметричных распределительных каналов 136
Высокочастотная установка для нагревания полимеров 98

- Высокочастотное нагревание 225, 250
 Высокоэластическая деформация 7, 11, 29, 55
 Высокоэластическое состояние 5, 7, 8
 Вытяжка
 заготовки 186, 187
 пленки 162—165
 при формовании 229
 самопроизвольная 186, 187
 условия 20, 21
 Вязкие жидкости 29, 30
 Вязкопластичные жидкости 29, 30
 Вязкость
 наибольшая ньютоновская 31, 32
 полимеров, зависимость от молекулярной массы 8, 9
 расплава при растяжении 186
 эффективная 34, 40, 41, 73, 152, 153
 Вязкотекучее состояние полимеров 5, 8, 9, 28—68, 73
 Вязкотекучие свойства терморезактивных материалов 72—74
 Вязкоупругие жидкости 29
 Вязкоупругие свойства полимеров 56—61
 Галтовочный барабан 6, 283, 284, 286
 Гамильтона и Гроссера уравнение 111
 Гексагональная упаковка макромолекул 18, 28
 Германса функция 179
 Гетинакс, механическая обработка 278
 Гибкоцепные полимеры 19, 20
 Гидравлические прессы, коэффициент использования машинного времени 260, 263
 Глубина канала шнека, влияние на производительность 124
 Головка(и)
 коллекторные 172, 173
 многоручьевая 183, 184
 Z-образные 132
 с охлаждаемым дорном 147
 трубная 137, 147
 плоскощелевая с упругой губкой 173, 174
 прамоточные 132, 133, 135
 с винтовыми канавками 135
 с вращающимся дорном 140
 с цилиндрической решеткой дорнодержателя 135
 с изменяющейся глубиной формующего канала 188
 с радиальным распределением расплава на дорне 159, 160
 угловые 132
 с вращающимся дорном 184, 185
 с каплеобразным распределителем расплава 158, 159
 Головки
 угловые
 с охлаждаемым дорном 136, 147
 трубные 136, 137
 с закреплением формующего кольца в шаровом шарнире 137
 формующие 184—188
 формы канала 186
 щелевая с двумя коллекторами 174
 Горячая резка 94
 Горячеканальный литник 214, 215
 Градиент давления
 в зоне дозирования 120, 121
 в канале шнека 117
 Градиент скорости см. Скорость сдвига
 Гранулирование 94, 95
 Гранулометрический состав полимерных материалов 82, 83, 84
 Гука закон 58
 Давление
 в межвалковом зазоре каландра 241, 242
 в процессе отверждения пресс-материалов 249
 в форме 274
 в формующей головке 120, 121
 воздуха при калибровании труб 154, 155
 калибрования 144
 прессования 245
 Дальний порядок 16, 19
 Двухстороннее охлаждение пленки 164
 Двухсторонняя ориентация 179
 Дериватогрaф 14
 Дефектные области в полимере 17
 Дефекты кристаллической структуры полимера 17
 Деформация 28, 29
 высокоэластическая 7, 11, 29, 55
 пластическая 29
 упругая 7, 11, 28, 29, 37, 52, 58
 Диаграмма
 дифференциально-термического анализа 13
 скоростей в экструдере 109
 Дилатантные жидкости 29, 30, 34
 Дина и Старка метод определения влаги 81
 Дисперсность
 полимерных материалов 82
 пресс-материалов 80
 Диссипация энергии вязкого течения 29
 Дифлон, кривая течения 38
 Дифференциально-термический анализ 12—14
 Диффузионно-адгезионные процессы 86, 87

- Длина калибрующей насадки, расчет 147
- Дозирование
 пресс-материалов 251
 при литье
 реактопластов 272, 273
 термопластов 200—202
 таблетированных материалов 84
- Домены 16, 18, 19, 23, 24, 36
- Дополнительная усадка 76
- Доработка изделий 87, 88
- Дорн 133, 135, 136, 137, 143, 159, 164, 185
- Дробеструйная установка 283, 284
- Дросселирующий режим работы экструдера 121, 122
- Жесткоцепные полимеры 19, 21
- Жидкое фазовое состояние 16, 19—21
- Жидкокристаллическое фазовое состояние 16, 18, 19
- Жидкости
 дилатантные 29, 30, 34
 вязкие 29, 30
 вязкопластичные 29, 30
 вязкоупругие 29, 58—60
 неньютоновские 245
 ньютоновские 29, 30, 31, 46
 псевдопластичные 29, 31—35, 245
 тиксотропные 29
- Загрузка материала в пресс-форму 251
- Закалка 25
- Закрепление заготовки при формовании 225
- Закрытые пресс-формы 254, 255, 256
- Замороженная кристаллическая структура 8, 13, 25, 26
- Зона(ы)
 вытяжки пленки 162, 167, 168
 экструдера
 дозирования 119—130
 загрузки 104—112
 плавления 112—119
- Запаздывающая упругая деформация см. Высокоэластическая деформация
- Запорный клапан 201, 202
- Зародыши кристаллизации 26, 27
- Извлечение изделия из формы 194, 195, 212—214
- Изделия из
 реактопластов 245, 247
 стекловолокнистых материалов 247
- Изделия, изготавливаемые вакуумформованием 233, 235
 в закрытых пресс-формах 255
 в открытых пресс-формах 254
 в полузакрытых формах 255
 выдуванием 180, 181
 каландрованием 237, 239
 компрессионным прессованием 245
- Изделия, изготавливаемые литьевым прессованием 245
 литьем под давлением 213, 216, 245
 пневмоформованием 232
 формованием из листовых материалов 223
 штампованием 231
 экструзией 103
- Изотермическое течение 42—54
 в межвалковом зазоре 240—243
- Изотропность 20
- Индекс расплава см. Показатель текучести расплава
- Индукционный период термодеструкции 15
- Инжекционное прессование 216
- Инфракрасный нагрев 100, 225, 226
- Каландрование 236—244
 термопластов с повышенной влажностью 81
- Калибрование труб 135, 136, 142—148
 вакуумное 155
 по внутреннему диаметру 148
 по наружному диаметру 143, 145
 расчет параметров 150—156
 с плавающей пробкой 145
- Калибрующая гильза 146
- Калибрующие насадки 144—148
 вакуумные 146
 из пластин 146
 подачи воды через дренажные отверстия 144, 145
- Канавца метод 72
- Каргина и Слонимского модель 60
- Квазикристаллическое состояние 25
- Классификация методов переработки пластмасс 85—102
- Коллектор расплава 172, 173
- Компрессионное прессование 244, 245, 249—256
 текучесть по Рашигу перерабатываемых полимеров 72
 технологические параметры 263—272
 усадка изделий 76, 77
- Конформация макромолекул 23, 24, 56, 57, 60
- Коробление изделий 192, 210, 211
- Коэффициент
 анизотропии усадки 220
 вытяжки 160, 162, 163, 178—180, 229
 влияние на прочностные свойства 180
 использования машинного времени 260, 263
 неоднородности 92
 передачи давления 106
 Пуассона 65
 «разбухания» струи 63

- Коэффициент
раздува 160, 161, 162, 163, 191
теплопроводности гранул 111
трения полимеров 104, 105
зависимость от температуры
насадки 144
уплотнения 83, 84
эластического восстановления 62,
63, 65, 66
- Кремнийорганические связующие 244
- Кривые течения 38, 39, 40, 74, 150, 151
пресс-материалов 245, 246, 268
- Кристаллизация 162, 163, 168, 169
из расплава 16
на подложке 26
параметры 211, 212
полупериод 212, 213
при переработке полимеров 21—28
холодная 25
центры 16
- Кристаллизующиеся полимеры 7, 19, 25
особенности строения 16—21
переработка
каландрованием 239, 240
формованием 223, 224, 230
экструзией 113
усадка при литье под давлением
78, 79
- Кристаллиты 16, 17, 18, 19, 20, 21, 35
- Кристаллическая структура полимеров 18, 28
- Кристаллические полимеры 6, 9
диаграмма дифференциально-термического анализа 13
нагревание при формовании 226
строение ламели 17
структурные превращения 20
- Кристаллическое фазовое состояние 16—18
- Крутящий момент в каналах шнека 114, 117, 118
- Куэтта* поток 129
- Лавсан, кривая течения 38, 39
- Ламели 16, 17, 18, 20, 21, 22, 27
- Линия кристаллизации 162, 168, 169
- Линии непрерывного прессования 260—263
- Линолеум 237
- Листы, получение каландрованием 237—240
- Литники 214, 215, 216
- Литниковая система 267, 268
- Литниковые каналы 201—203, 211, 213, 167
- Литьевое прессование 244, 245, 246, 256—260
текучесть по *Рашигу* перерабатываемых полимеров 72
технологические параметры 263—272
- Литьевое прессование
технологические режимы 253
усадка изделий 76, 77
- Литье под давлением
влияние удельного объема материалов 83
показатель текучести расплавов перерабатываемых полимеров 70
расчет температуры расплава 151, 152
реактопластов 244, 245, 246, 272—277
структура полиамида 24
термопластов 198—223
с повышенной влажностью 81
усадка изделий 76, 77, 78, 80
- Лоджа* формула 62
- Мак-Келви* классификация методов переработки пластмасс 85, 86
- Максвелла* модель 58, 59, 60, 65
- Мамхегова* и *Гинзбурга* уравнение 107
- Матрицы 230, 231, 232, 233
- Мгновенная упругая деформация 28, 29
- Меламиноформальдегидные связующие 244
- Методы определения
влажности 81
времени отверждения реактопластов 72—75
гранулометрического состава 82, 83
насыпной плотности 83
размеров гранул 83
усадки 80
- Методы переработки пластмасс, классификации 85—89
- Методы формования 230—235
- Механическая обработка изделий из пластмасс 277—286
- Модели вязкоупругих жидкостей 58—60
- Молекулярно-массовое распределение 38
- Монолинная упаковка макромолекул 18, 19, 28
- Мочевиноформальдегидные связующие 244
- Мутность пленки, зависимость от условий формования 160, 161
- Нагревание
листовой заготовки при формовании 225—228
пленки перед ориентацией 178, 179
полимерных материалов 97—102
при нестационарной теплопередаче 102
- Надмолекулярные структуры 21
- Намотка
пленки 165, 166, 177—180
полотна при каландровании 240

- Наполнители пресс-материалов 99, 244
 Направление скоростей в канале шнека 122
 Напряжение сдвига 24, 29—31, 71, 73, 74, см. также Нормальные напряжения сдвига
 в канале шнека 117
 в пластометре 73
 в плоскощелевом канале 53
 в цилиндрическом канале 52
 критическое 55
 на поверхности цилиндра 48
 при каландровании 238, 239
 при течении пресс-материалов 246, 247
 эпюры 123
 Насосный режим работы зоны дозирования 120
 Насыпная плотность 83, 84, 110
 Ньютоновские жидкости 245
 Необратимая деформация см. Пластическая деформация
 Нестационарная теплопередача 154
 Неустойчившееся течение 51, 52
 Неустойчивое течение расплавов полимеров 54—56
 Номограмма для расчета времени охлаждения 154
 температуры расплава термопластов 150, 151, 239
 Нормальные напряжения сдвига 33, 61, 64, 65, 67, 184—186
 первая разность 66, 68
 при литье 206
 при экструзии 154, 155
Нуссельта критерий 169
Ньютона уравнение 33
 Ньютоновские жидкости 29, 30, 31, 46
 Ньютоновские области течения 31, 32, 34, 35
 Облой 255, 257, 282—284
 Объемные характеристики полимерных материалов 83, 84
 Объемный расход расплава 204
 Однородность полимерных материалов 82
 Оправка для литья под давлением 195—197
 Оптимальная температура шнека 105
 Органическое стекло см. Полиметилметакрилат
 Ориентация
 макромолекул 20, 21, 141, 142, 205, 227, 229, 239
 пленки 162—165, 177—180
 Орторомбическая упаковка макромолекул 17
Отвальда уравнение 34
 Отжиг 26, 27
 Относительное удлинение 138, 139, 140, 176
 Отверждение термореактивных материалов 99, 100, 252, 264, 265
 Охлаждение
 изделий 192—194, 210—212, 230
 пленки 162—165
 полотна при формовании 240
 расплава 175—177
 труб 149
 Пакетные кристаллы 23, 25
 Параметры кристаллизации 211, 212
Пауэлла—Эйринга уравнение 35
 Пачки 19
 Перепад давления
 в литниковой системе 268, 269
 в формирующей головке 155, 156
 Петлеобразные участки макромолекул 17
 Пистолет для очистки пресс-форм 254
 Плавление полимеров 112—119, 200—202
 Пластическая деформация 29
 Пластометр 72—74
 Канавца 72, 264, 265
 Пленки, получение
 каландрованием 237—240
 рукавным методом (раздувом) 156—180
 щелевым методом 170—180
 Плоскощелевая головка 172—175
 Плотность
 изделий из пресс-материалов 247
 полимеров 27, 78, 79
 пресс-порошка 84
 расплава полимера 217, 218
 теплового потока трения 107, 108
 флуктуационной сетки 57
 Пневматический смеситель 91, 92
 Пневмоформование 224, 232, 233
 в матрицу 232
 в матрицу с вытяжкой заготовки толкателем 232, 233
 Подготовительные операции к переработке полимеров 85—102
 Подпрессовка 248, 249, 251, 252, 257
 Показатель текучести расплава 69, 706, 199, 223
 Полиамид(ы)
 кривые течения 38, 39
 кристаллизация 27
 параметры 212
 стеклонаполненные 278
 структура 18, 24
 температура плавления 212
 температура стеклования 212
 удельный объем 79
 экструзия 151
 Поливинилиденфторид, структура 18
 Поливинилфторид, структура 18

- Поливинилхлорид
аномалия вязкости расплава 39
выдувание изделий 181
высокочастотный нагрев 98
каландрование 237
коэффициент трения 144
кривые течения 38, 40, 150, 151
обработка резанием 280, 281
структура 18
экструзия 112
энергия активации течения 41
- Полидисперсность см. Однородность полимерных материалов
- Поликарбонат
аномалия вязкости расплава 39
кривая течения 38
кристаллизация 27
кристаллическая структура 17
влияние влажности при переработке 83
выдувание изделий 181
вязкость расплава 39
экструзия 150, 151
- Поликонденсация
при отверждении пресс-материалов 248, 249, 251
энергия активации 263
- Полимеризация в формах 86, 87
- Полиметилметакрилат
литье под давлением 205, 217
нагревание 100, 101
заготовки перед формованием 225
удельный объем 79
экструзия 150, 151
- Полиморфизм 18
- Полипропилен
аномалия вязкости 39
выдувание изделий 181
каландрование 240
кривые течения 39, 150, 151
коэффициент эластического восстановления 66
параметры кристаллизации 212
предел текучести 27, 28
степень кристалличности 27, 28
структура 18
температура плавления 212
температура стеклования 212
формование 223
экструзия 112
энергия активации течения 41
- Полпирование изделий из пластмасс 285, 286
- Полистирол
аномалия вязкости расплава 39
влияние давления на вязкость расплава 42
изменение плотности с температурой 78
изотактический
- параметры кристаллизации 212
температура плавления 212
температура стеклования 212
коэффициент трения 144
кривые течения 38, 39
литье под давлением 205
охлаждение под давлением 6, 7
структура 18
ударопрочный 287
удельный объем 79
энергия активации течения 41
- Полиформальдегид
аномалия вязкости расплава 39
кривые течения 38, 150, 151
- Полиэтилен
аномалия вязкости расплава 39
влияние давления на вязкость расплава 42
входовой поправочный коэффициент 53
выдувание изделий 181
гранулированный, насыпная плотность 110
зависимость усадки от давления и температуры 220
каландрование 237, 240
кривые течения 38, 39, 150, 151
коэффициент передачи давления 106
трения 105, 144
эластического восстановления 66
кристаллизация 24, 25
на подложке 26
параметры 212
получение пленки 161
труб 138, 141
прочностные свойства пленки 180
разбухание экструдата 185
степень кристалличности 17
степень ориентации 179, 180
структура 17
сферолиты 22
температура плавления 212
температура стеклования 212
удельный объем 25, 79
упаковка макромолекул 18, 19
формование 223, 230
экструзия 112, 138
энергия активации течения 41
- Полиэтилентерефталат (см. также Лавсан)
влияние влажности при переработке 83
вязкость расплава 39
кристаллизация 25, 26, 27
нагревание 100, 101
параметры кристаллизации 212
плотность 27

- Полиэтилентерефталат (см. также Лавсан)
 степень кристалличности 26
 температура плавления 212
 температура стеклования 212
 формование 223
 экструзия 151
- Полиэфирные связующие 244, 249, 252
- Полузакрытые пресс-формы 254, 255
- Полупериод кристаллизации 212, 213
- Полустационарный литьевой блок 257, 258
- Пористость полимерных материалов, влияние на экструзию 110, 111
- Поток *Куэтта* см. *Куэтта* поток
- Поток утечек в процессе экструзии 123, 124, 128, 129
- Прандтля—Эйринга* уравнение 34, 35
- Предварительная вытяжка листов при формовании 228
- Предварительное нагревание при компрессионном прессовании 250
- Предельное напряжение текучести 29, 30¹
- Пресс-кант 189, 190, 191
- Пресс-материалы
 влажность 80, 81, 82
 марки 253, 263, 264
 оптимальная влажность 82³
 отверждение 10
 прессование 253
 содержание летучих веществ 80—82, 248
 состав 244
 таблетирование 95—97
- Прессование
 инжекционное 216
 компрессионное см. Компрессионное прессование
 пресс-материалов, технологические режимы 253
 реактопластов с повышенной влажностью 81
 термопластов с повышенной влажностью 81¹
- Пресс-порошки¹
 кривые течения 268
 однородность 82¹
- Пресс-форма(ы)
 выносные с замковыми зажимами 260, 262
 для измерения текучести по *Рашигу* 71
 закрытые 254, 255, 256
 конструкции 254—256
 литьевые 257—259
 открытые 254, 255
 многогнездные 213, 215, 235, 236, 251
 очистка 252—254, 257, 258
 полузакрытые 254, 255
- Пресс-форма (ы)
 размыкание 252
 с верхней загрузочной камерой 257, 258, 263
 с инжекционным прессованием 216
 с нижней загрузочной камерой 258, 259, 261, 263
 стационарные 252, 253
 съёмные 252, 254, 257, 259, 261, 262
- Прессы-автоматы 251
- Прибор(ы)
Дина и *Старка* 81
 для дифференциально-термического анализа 12
 для измерения показателя текучести расплава 69, 70
 для определения гранулометрического состава 82, 83
 для термомеханических испытаний 10, 11
- Приливы 194, 195
- Провисание листа при формовании 226, 227
- Продолжительность вязкотекучего состояния 73
- Производительность агрегата для получения труб 132
 выдувного агрегата 182, 183
 зла пластикации 202
 экструдера¹
 в зоне загрузки 108, 109, 110
 влияние на мутность пленки 161
 зависимость от давления
 в головке 124
 в зоне загрузки 128
 при получении пленки 169
 расчет 128, 129
- Пространственная структура 30
- Проходные участки макромолекул 16, 17, 20, 23, 27, 35, 36
- Прочность изделий
 влияние давления при кристаллизации 25
 зависимость от температуры расплава 205
 из пресс-материалов 247
 из реактопластов 82, 274
 пленки 176
 труб, зависимость от скорости вращения дорна 140, 141
- Псевдопластичные жидкости 29, 31—35, 245
- Пуансон 254, 255
- Пуассона* коэффициент 65
- Пульсация расплава 55, 56
- Разбухание экструдата 185
- Размеры гранул 83

- Разнотолщинность изделий при формировании 227, 228, 229
 пленки 158, 159, 239
 регулирование 188
- Разрушающее напряжение
 зависимость
 от давления в форме 217
 от коэффициента раздува 162, 163
 от степени вытяжки 139, 140
 от температуры охлаждения 176
 изделий из полиметилметакрилата 217
 стеклопластиков 97
- Раскрытие формы 194, 195
- Расплавы полимеров
 движение в межвалковом зазоре 240—244
 основы реологии 28—68
- Распределение давления
 в зоне дозирования 120
 между валками 93
 напряжений
 по толщине трубы 148
 при течении 43, 44
 скорости по глубине формирующего зазора 142
 температуры в расплаве 113, 114, 115
- Распределитель расплава 159
- Распределительные каналы 136
- Растяжение рукава пленки, расчет параметров 167—170
- Расход расплава, уравнение 45, 46
- Расчетное давление шнека 107
- Рашига* метод 69, 71
- Реактопласты см. Термореактивные полимеры
- Регулировочные вкладыши 172
- Резание пластмасс 278, 279, 280, 281
- Резиты 247
- Релаксационные процессы 56—61
- Реогониметр 68
- Реологическая номограмма см. Номограмма для расчета температуры расплава термопластов
- Реологические уравнения 32—35, 39, 40, 47, 49
- Реология расплавов полимеров 28—68
- Ротационные вискозиметры 15
- Самозапирающееся сопло 201, 202, 203
- Самопроизвольная вытяжка 186, 187
- Сверление пластмасс 285
- Свободное выдувание 232
- Свойства полимеров 21—28
- Ситовый анализ 82, 83
- Скорость деформации при ориентации 179
 каландрования 238, 239
 кристаллизации 211
 отверждения пресс-материалов 248
 отвода труб 153, 154
 охлаждения полимеров при переработке 25
 расплава в межвалковом зазоре каландра 239, 242
 роста кристаллов 213
 сдвига 29—31, 45, 46, 70
 влияние на разбухание экструдата 185
 критическая 55
 при вальцевании 92
 расчет 156
 реактопластов 268
 уравнение 47, 48
- течения
 в зависимости от градиента давления 121
 эпюры 123
- Смещение 90—93
- Смыкание формы 188—191, 202, 203, 251
- Сопло с подпружиненным клапаном 215
- Сополимеры стирола, литье под давлением 205
- Стекловолокнит 251
- Стеклообразное состояние 5, 6, 8
- Степень вытяжки
 зависимость от температуры 227
 расплава 138, 139
 кристалличности 13, 17, 26, 27, 28
 ориентации 179, 180
 отверждения 248
- Стефана—Больцмана* постоянная 100
- Структура кристаллитов 16
 полимеров 21—28
- Структурные превращения 20
- Структурообразователи см. Зародыши кристаллизации
- Съемный пакет пресс-формы 257, 258
- Сухое смещение 90—92
- Сферолиты 21, 22, 23, 28
- Сыпучие материалы 83
- Таблетирование 95—97
- Таблетированные пресс-материалы 251
- Таблетиреуемость 84
- Таблетмашины 95—97
- Текучесть 69—72
 термопластов 69—71
 по *Рашигу* 69, 71, 72, 271
 пресс-материалов 71, 72, 251

- Температура
 головки 138
 каландрования 239
 нагрева пресс-материалов 73, 74
 насадки 144
 отверждения пресс-материалов 249
 охлаждающего вала 176
 переработки полимеров 13, 14, 15, 153
 плавления 7, 9, 21, 212
 предварительного нагревания при прессовании 263, 264
 прессования 252
 пресс-формы при литьевом прессовании 253, 256
 расплава 150—153, 205
 стеклования 5, 6, 13, 21, 212
 текучести 13, 14
 термодеструкции 13, 14
 формования 226—228
 формы 192, 217, 221, 236
 хрупкости 6
- Тензор скорости деформации 32, 33, 34
- Теплопроводность полимеров 101, 102
- Термическая усадка
 по толщине трубы 138, 142
 при формовании 227, 228
- Термомеханические кривые 5, 6, 9, 10, 11
- Термомеханический анализ полимеров 9—12
- Термообработка
 влияние на свойства полимеров 27, 28
 при формовании 76
- Термопластичные полимеры 10
 вырубка 284
 кривые течения 151
 литье под давлением 198—223
 методы переработки 87
 оптимальная влажность 82
 переработка в пленку 156—180
- Термопласты см. Термопластичные полимеры
- Терморезактивные полимеры
 влияние различных факторов на процессы переработки 21
 вязкотекучие свойства 72—74
 кривые течения 268
 литье под давлением 272—277
 методы переработки 89
 нагревание 98, 99
 отверждение 72—75
 реологические свойства 10, 245
 тангенс угла диэлектрических потерь 75
 теплостойкость 75
- Терморезактивные пресс-материалы 244—277
- Терморезактопласты см. Терморезактивные полимеры
- Термостойкость полимеров длительная 14, 15
- Технологические свойства пластмасс 68—85
- Технологичность 68, 69
- Течение
 полимеров 8, 9, 28—68
 пресс-материалов 245
 расплава
 в зоне дозирования экструдера 119—130
 в изотермических условиях 116
 в цилиндрическом канале 42—46
 круговое 64—68
 между валами 93
 между вращающимися цилиндрами 46—48
 между пластинами 48—51
 установившееся 35—42, 51, 52
 суспензии 30
 энергии 41, 42, 152
 эффекты 61—68
- Тиксотропные жидкости 29
- Точечное литье 214, 215, 216
- Точечные литники 209, 214, 215
- Триклинная упаковка макромолекул 18, 19
- Трубы
 двухслойные 137
 из полиэтилена 147
 калибрование 142—148
 маркировка 149
 получаемые экструзией 130—156
 упаковка 150
- Туннельный литник 214, 216
- Угловая скорость шнека, влияние на производительность 111
- Угловые формующие головки 132, 135, 136, 147, 158, 159, 184, 185
- Удаление литников 282—284
- Удаление облоя 282—284
- Ударная вязкость 97, 217
- Ударопрочный полистирол, переработка каландрованием 237
- Удельная мощность экструдера 105
- Удельное давление
 прессования 251, 252
 при литье под давлением 223, 246
 при литьевом прессовании 253, 256, 260, 271
- Удельный объем 6, 7, 25, 79, 83
- Узел пластикации 202
- Упаковка макромолекул 17, 18, 19, 28
- Упаковка
 пленки 165, 166, 177—180
 труб 149, 150
- Упругая деформация 7, 11, 28, 29, 37, 52, 58

Уплотнение пресс-материалов 95—97
Усадка
изделий из пластмасс 76—80, 191,
192, 217—220, 227, 228, 230
наполненных пресс-материалов 77,
78
пленки при каландровании 239
полимера при охлаждении 146
реактопластов, влияние дисперс-
ности 82
труб 133, 134, 138, 141, 142
Усилие
прессования 255, 256, 258, 259
смыкания 203, 259, 261
Установившееся течение расплава 35—
42, 51, 52

Фазовые состояния полимеров 16—21
Фибриллы 16, 20, 21, 22, 23
Фибриллярное строение полимеров 20
Физические состояния полимеров 5
Физические характеристики полиме-
ров 5—28
Фильтрация 245
Фильтрующий пакет 160, 161
Флуктуационная структура 36, 37
Фойхтга—Кельвина модель 58, 59, 60
Форма для выдувания 181
Формование 188—191, 229
комбинированное 235
листовых материалов 223—236
на поточных линиях 235, 236
пленки 172—175
полотна 238, 239
профиля трубы 132—142
рукава при получении пленки
158—161
с предварительной вытяжкой 228
технология 224—230
толкателем 230—232
физико-химические основы 223, 224
Формующие головки 132—142, 158—
160, 237
Френкеля и Эйринга теория 36
Фторопласт, инфракрасный нагрев 100
Фурье критерий 102, 115, 153, 154,
169, 222, 265, 266

Целлюлоза, фазовые состояния 21
Центры кристаллизации 16
Цикл-диаграмма литья под давлением
203, 204, 209, 274

Шведова—Бенгама тело см. Вязко-
пластичные жидкости
Шероховатость поверхности труб 144
«Шип-кебаб» 23
Шлифование пластмасс 281, 282
Шнековые смесители 238, 239
Шнековый экструдер 104—130
Шприцевание 96, 97, 245
Штампование 7, 224, 230—232

Экструдер(ы)
дисковый 68, 104
рабочие зоны 103—130
с винтовыми канавками на поверх-
ности цилиндра 111, 112
характеристика в различных ре-
жимах 122, 123
шнековый 104—130
Экструзия 103—180
влияние удельного объема мате-
риалов 83
показатель текучести расплава пе-
рерабатываемых полимеров 70
структура пленок 18
термопластов с повышенной влаж-
ностью 81
технология производства
пленки 156—180
труб 130—156
Эластическая турбулентность см. Не-
устойчивое течение расплавов по-
лимеров
Эластическое восстановление струи
62—67, 185, 186
Энергия активации 41, 42, 152, 263
Эпоксидные связующие 244, 249, 252
Эпюры
напряжений сдвига 123
скоростей течения расплава 123
Эффективная вязкость 34, 40, 41, 73,
152, 153
Эффекты при течении расплавов поли-
меров 61—68

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Часть первая. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРОВ	5
Глава 1. РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ	5
1.1. Использование термомеханического и дифференциально-термического анализа для оценки перерабатываемости полимеров	5
1.1.1. Термомеханический анализ полимеров	9
1.1.2. Дифференциально-термический анализ полимеров	12
1.1.3. Длительная термостойкость полимеров	14
1.2. Особенности строения кристаллизующихся и аморфных полимеров	16
1.3. Влияние условий переработки на структуру и свойства полимеров	21
Глава 2. ОСНОВЫ РЕОЛОГИИ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ	28
2.1. Вязкие жидкости	29
2.2. Закономерности сдвигового установившегося течения расплавов полимеров	35
2.3. Изотермическое установившееся течение аномально вязких жидкостей в цилиндрическом канале	42
2.4. Изотермическое установившееся течение расплава полимера между вращающимися цилиндрами	44
2.5. Изотермическое установившееся течение расплава полимера между пластинами	48
2.6. Изотермическое течение расплава полимера в каналах при наличии входных потерь давления	51
2.7. Неустойчивое течение расплавов полимеров (эластическая турбулентность)	54
2.8. Вязкоупругие свойства и релаксационные процессы в полимерах	56
2.9. Эффекты, возникающие при течении расплавов полимеров	61
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС	68
3.1. Текучесть и ее использование в технологии переработки пластмасс	69
3.1.1. Текучесть термопластичных полимеров	69
3.1.2. Текучесть терморепрессивных пресс-материалов	71
3.2. Определение вязкотекучих свойств и времени отверждения терморепрессивных материалов по методу Канавца	72
3.3. Определение времени отверждения при прессовании стандартных образцов терморепрессивных материалов	74
3.4. Усадка изделий из пластмасс	76
3.4.1. Усадка изделий из реактопластов	76
3.4.2. Усадка изделий из термопластов	78
3.4.3. Методы определения усадки	80
3.5. Содержание влаги и летучих веществ	80
3.6. Гранулометрический состав	82
3.7. Объемные характеристики	83
3.8. Таблетированность	84

Часть вторая. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС 85

Глава 4. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС 85

- 4.1. Классификация методов переработки пластмасс 85
- 4.2. Смешение 90
- 4.3. Гранулирование полимерных композиций 94
- 4.4. Таблетирование 95
- 4.5. Методы нагревания полимерных материалов 97

Глава 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ 103

- 5.1. Закономерности движения полимера в шнековом экструдере 104
 - 5.1.1. Движение полимера в зоне загрузки 104
 - 5.1.2. Движение полимера в зоне плавления 112
 - 5.1.3. Закономерности течения расплава в зоне дозирования 119
- 5.2. Технология производства труб методом экструзии 130
 - 5.2.1. Плавление полимера и гомогенизация расплава 131
 - 5.2.2. Формование профиля трубы 132
 - 5.2.3. Калибрование труб 142
 - 5.2.4. Охлаждение труб 149
 - 5.2.5. Маркировка и упаковка труб 149
 - 5.2.6. Расчет технологических параметров процесса 150
- 5.3. Технология производства пленки рукавным методом 156
 - 5.3.1. Подготовка сырья, плавление гранул и гомогенизация расплава 157
 - 5.3.2. Формование рукава 158
 - 5.3.3. Ориентация и охлаждение пленки 162
 - 5.3.4. Намотка, упаковка и контроль качества пленки 165
 - 5.3.5. Расчет параметров процесса 167
 - 5.4. Технология производства пленки щелевым методом 170
 - 5.4.1. Плавление гранул и гомогенизация расплава 171
 - 5.4.2. Формование полотна 172
 - 5.4.3. Охлаждение пленки 175
 - 5.4.4. Ориентация, намотка и упаковка пленки 177

Глава 6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПУСТОТЕЛЫХ ИЗДЕЛИЙ ВЫДУВАНИЕМ 180

- 6.1. Изготовление изделий выдуванием из трубчатых заготовок 181
 - 6.1.1. Плавление гранул и гомогенизация расплава 182
 - 6.1.2. Выдавливание трубчатой заготовки 184
 - 6.1.3. Смыкание формы и формование изделия 188
 - 6.1.4. Охлаждение изделия 192
 - 6.1.5. Раскрытие формы и извлечение изделия 194
- 6.2. Изготовление изделий выдуванием из литевых заготовок 195
 - 6.2.1. Гомогенизация и дозирование расплава 196
 - 6.2.2. Впрыск расплава и выдувание изделия 196

Глава 7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ 198

- 7.1. Технология литья под давлением 199
 - 7.1.1. Плавление, гомогенизация и дозирование расплава 200
 - 7.1.2. Смыкание формы и подвод узла впрыска 202

7.1.3.	Впрыск расплава	203
7.1.4.	Выдержка под давлением	208
7.1.5.	Охлаждение изделия	210
7.1.6.	Раскрытие формы и извлечение изделия	212
7.1.7.	Особенности технологического процесса, обусловленные конструкцией формы	214
7.2.	Влияние технологических параметров на качество изделий	217
7.3.	Расчет технологических параметров процесса литья под давлением	220
Глава 8.	ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	223
8.1.	Технология формования	224
8.1.1.	Закрепление заготовки	225
8.1.2.	Нагревание листовой заготовки	225
8.1.3.	Предварительная вытяжка листов	228
8.1.4.	Формование изделия	229
8.1.5.	Охлаждение изделия	229
8.2.	Методы формования	230
8.2.1.	Штампование	230
8.2.2.	Пневмоформование	232
8.2.3.	Вакуумформование	233
8.3.	Формование на поточных линиях	235
Глава 9.	ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ КАЛАНДРОВАНИЕМ	236
9.1.	Технология каландрования	237
9.1.1.	Смешение компонентов и нагревание композиции	237
9.1.2.	Формование полотна	238
9.1.3.	Охлаждение и намотка полотна	240
9.2.	Закономерности движения расплава полимера в зазоре между валками	240
Глава 10.	ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПРЕСС-МАТЕРИАЛОВ	244
10.1.	Роль различных факторов в процессах переработки термореактивных материалов	245
10.2.	Компрессионное прессование	249
10.2.1.	Предварительное нагревание материала	250
10.2.2.	Загрузка материала и смыкание пресс-формы	251
10.2.3.	Подпрессовка, выдержка под давлением, отверждение	251
10.2.4.	Размыкание и очистка пресс-форм	252
10.2.5.	Особенности прессования в пресс-формах различной конструкции	254
10.3.	Литьевое прессование	256
10.4.	Прессование изделий на линиях непрерывного прессования	260
10.5.	Расчет технологических параметров процесса прессования	263
10.5.1.	Температура предварительного нагревания	263
10.5.2.	Время отверждения при компрессионном прессовании	264
10.5.3.	Время отверждения при литьевом прессовании	266
10.5.4.	Удельное давление литьевого прессования	271
10.5.5.	Навеска пресс-материала	271
10.6.	Литье под давлением	272
10.6.1.	Дозирование и нагревание материала	272

10.6.2. Впрыск материала	273
10.6.3. Выдержка под давлением	275
10.6.4. Выдержка при отверждении	276
<i>Глава 11. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТ-</i> <i>МАСС</i>	277
11.1. Особенности обработки пластмасс	277
11.2. Удаление облоя и литников на изделиях из реактопластов	282
11.3. Обработка изделий из термопластов	284
11.4. Полирование изделий	285
Рекомендуемая литература	287

Владимир Герасимович Бортников

**ОСНОВЫ
ТЕХНОЛОГИИ
ПЕРЕРАБОТКИ
ПЛАСТИЧЕСКИХ
МАСС**

Редактор *А. Е. Пинчук*
Художник *Ю. И. Дышленко*
Техн. редактор *З. Е. Маркова*
Корректор *А. В. Воробей*

ИБ № 891

Сдано в набор 14.12.82. Подписано в печать
28.04.83. М-42214. Формат бумаги 60×90^{1/16}.
Бумага тип. № 2. Литературная гарнитура.
Высокая печать. Усл. печ. л. 19,0. Усл.
кр.-отт. 19,19. Уч.-изд. л. 21,81. Тираж
110 00 экз. Зак. 326. Цена 85 коп. Изд. № 1593.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия».
Ленинградское отделение. 191186, г. Ленин-
град, Д-186, Невский пр., 28.

Ленинградская типография № 6 ордена Тру-
дового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгении
Соколовой Союзполиграфпрома при Государ-
ственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.