

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Ю.Т. ПАНОВ, Л.А. ЧИЖОВА, Е.В. ЕРМОЛАЕВА

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Экструзия. Литье под давлением

Учебное пособие



Владимир 2013

УДК 678.06
ББК 35.710
С56

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой химической технологии стекла
и керамики Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
А.И. Христофоров

Кандидат химических наук, доцент зав. кафедрой
химии и технологии высокомолекулярных соединений
Ивановского государственного химико-технологического университета
Т.А. Агеева

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Современные методы переработки полимерных материала-
С56 лов. Экструзия. Литье под давлением : учеб. пособие / Ю. Т. Пано-
нов, Л. А. Чиждова, Е.В. Ермолаева; Владим. гос. ун-т имени Алек-
сандра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Вла-
димир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 128 с.
ISBN 978-5-9984-0315-6

Содержит необходимый материал для глубокого усвоения курсов специ-
альных дисциплин магистров и дисциплин профессионального цикла бакалавров
направления 240100 «Химическая технология». Рассмотрены основные совре-
менные методы переработки полимерных материалов, представлены методики
проведения лабораторных работ. Материал сопровождается тематически подо-
бранными тестами и вопросами для самоконтроля усвоения материала.

Предназначено для бакалавров и магистров направления 240100 «Химиче-
ская технология» всех форм обучения.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в со-
ответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 51. Табл. 6. Библиогр.: 14 назв.

УДК 678.06
ББК 35.710

ISBN 978-5-9984-0315-6

© ВлГУ, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. ЭКСТРУЗИЯ	5
1.1. Принцип работы экструзионных агрегатов	5
1.1.1. Закономерности движения полимера в шнековом экструдере.....	7
1.1.2. Качественный анализ работы экструдера.....	27
1.2. Технология изготовления изделий методом экструзии	28
1.2.1. Производство однослойных труб.....	28
1.2.2. Технология изготовления гофрированных труб.....	39
1.2.3. Технология производства пленки рукавным методом.....	41
1.2.4. Технология производства пленки щелевым методом.....	56
1.2.5. Технологические процессы изготовления многослойных пленок.....	65
1.2.6. Основные тенденции развития экструзионных методов.....	70
1.3. Материал для самоконтроля	70
2. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТЕРМОПЛАСТОВ	78
2.1. Изготовление изделий из термопластов литьем под давлением	78
2.1.1. Технология литья под давлением.....	80
2.1.2. Влияние технологических параметров на качество изделий.....	99
2.1.3. Технологические параметры процесса литья под давлением.....	104
2.1.4. Виды брака и способы их устранения.....	109
2.2. Материал для самоконтроля	113
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО МЕТОДАМ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОПЛАСТОВ	117
3.1. Лабораторная работа «Получение изделий методом экструзии»	117
3.2. Лабораторная работа «Получение изделий из термопластов методом литья под давлением»	123
Приложение.....	126
Список рекомендуемой литературы.....	127

ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI века уже невозможно представить нашу жизнь без полимерных материалов. Благодаря комплексу уникальных эксплуатационных свойств полимеры проникли во все отрасли народного хозяйства. Кроме того, получение изделий из пластмасс отличается:

- *высокой технологичностью*, благодаря которой из производственного цикла можно исключить трудоемкие и дорогостоящие операции механической обработки изделий;
- *минимальной энергоемкостью*, обусловленной тем, что температуры переработки этих материалов составляют, как правило, 150 – 250 °С, что существенно ниже, чем у металлов и керамики;
- *возможностью получения за один цикл формования сразу нескольких изделий*, в том числе сложной конфигурации, а при производстве погонажных изделий вести процесс на высоких скоростях;
- *высокой степенью автоматизации* практически всех процессов переработки полимерных материалов, что позволяет существенно сократить затраты и повысить качество изделий.

Сочетание высоких эксплуатационных свойств и простоты получения обеспечили быстрый рост производства изделий из полимерных материалов и, как следствие, обусловили необходимость выпуска значительного количества специалистов по переработке пластмасс. Для них и предназначено данное учебное пособие.

В настоящее время известно несколько десятков методов переработки пластмасс, сотни видов полимеров и тысячи марок пластмасс на их основе. Несмотря на это примерно 90 % всего производства изделий из пластмасс приходится на полиэтилен низкого и высокого давлений, полипропилен, полистирол и поливинилхлорид. В основном, названные материалы перерабатываются экструзией, литьем под давлением.

В связи с этим в данном учебном пособии рассматриваются самые распространенные методы – экструзия и литье под давлением, изучение которых будет полезно как бакалаврам, так и магистрам.

1. ЭКСТРУЗИЯ

1.1. Принцип работы экструзионных агрегатов

Экструзия – непрерывный технологический процесс получения изделий определенной формы путем продавливания расплава полимерного материала через формующее отверстие.

В 1870 году впервые получили стержни из нитрата целлюлозы путем продавливания его расплава плунжером через формующую головку. В 1930-х годах появились червячные шприцмашины (сейчас экструдеры), которые до сих пор являются основным оборудованием при производстве профильных изделий. 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 полимера 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 головки. При обеспечении определенных технологических параметров эти химические процессы могут быть сведены к минимуму или полностью исключены.

Основным элементом шнекового экструдера является шнек (червяк), общий вид которого изображен на рис. 1.1.

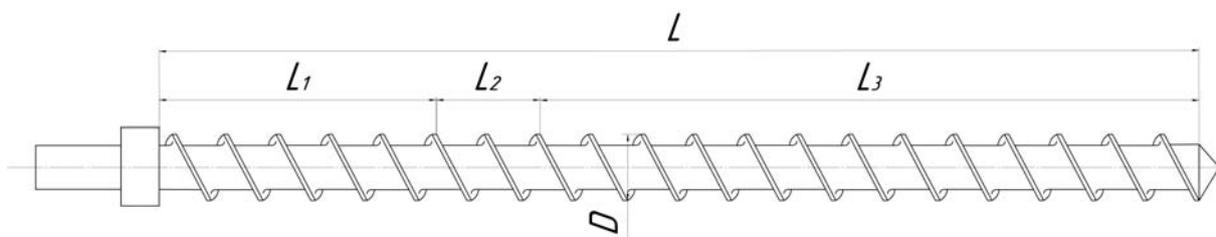


Рис. 1.1. Схема общего вида шнека: L_1 – зона загрузки; L_2 – зона плавления; L_3 – зона дозирования

В 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 и его геометрией. 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 появления расплава до полного плавления слоя гранул или неполного плавления, но разрушения оставшегося твердого слоя гранул на части, распределения его в расплаве и перехода на движение расплава за счет 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.

Кроме трех основных зон по длине шнека могут присутствовать дополнительные зоны, назначение которых определяется конкретным технологическим процессом. Наиболее часто встречается зона **дегазации**, в которой на расстоянии 1 – 3 витков происходит резкое увеличение объема винтовых каналов, что способствует удалению из расплава газообразных включений.

Шнек характеризуется тремя **основными** параметрами: диаметр D , длина L , которая обычно характеризуется отношением L/D (у современных экструдеров L/D от 16:1 до 40:1) и степень сжатия – отношение объемов винтового канала в зоне загрузки и зоне дозирования (обычно от 1,5 до 5,0).

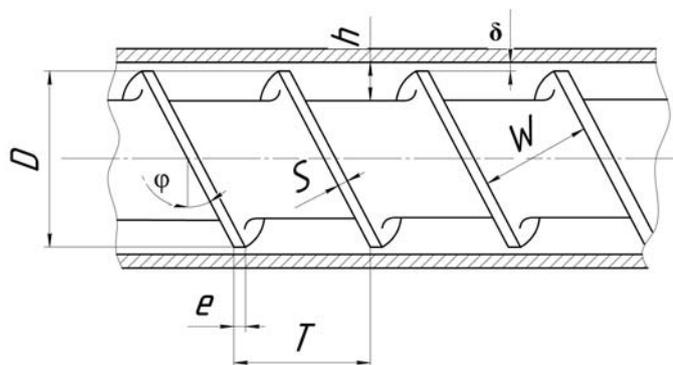


Рис. 1.2. Геометрические параметры шнека: D – диаметр шнека; T – шаг нарезки; W – расстояние между витками; S – толщина гребня; e – ширина гребня; h – глубина нарезки; δ – высота зазора между гребнем и материальным цилиндром; ϕ – угол наклона нарезки

В зависимости от способа изменения объема витков шнеки бывают:

- а) с постоянным шагом и переменной глубиной нарезки;
- б) постоянной глубиной нарезки и переменным шагом.

Обычно шнеки, изготовленные целиком, имеют постоянный шаг, а шнеки диаметром более 120 мм изготавливаются сборными, и они имеют постоянную глубину нарезки.

Кроме основных параметров, шнек характеризуется геометрическими параметрами (рис. 1.2).

1.1.1. Закономерности движения полимера в шнековом экструдере

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 изменением температуры цилиндра и шнека, в результате чего меняются коэффициенты трения. Как видно из рис. 1.3, вначале с ростом температуры коэффициент трения

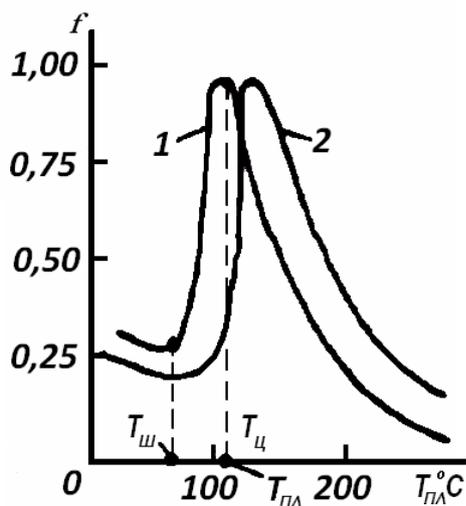


Рис.1.3. Зависимость изменения коэффициента трения f от температуры поверхности в зоне загрузки полиэтилена низкой (1) и высокой (2) плотности

повышается, а выше температуры плавления полимера понижается, что можно объяснить появлением пристенного вязкого течения расплава, уменьшением сил и крутящих моментов. Поэтому для достижения максимальной разности крутящих моментов от сил трения температура поверхности цилиндра должна быть близкой к температуре плавления полимера, а температура шнека $T_{ш}$ на 30 – 40 °C ниже температуры поверхности цилиндра $T_{ц}$.

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 в последующем 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. Казалось бы, что чем сильнее охлажден шнек, тем ниже коэффициент трения полимера на его поверхности, тем выше разность крутящих моментов и тем лучше происходит движение полимера. Однако при очень сильном охлаждении шнека замедляются процесс плавления и гомогенизация полимера в последующих зонах, а это вызывает снижение производительности и повышение удельной мощности.

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 внут-

ренной поверхности цилиндра делают продольные или винтовые канавки. Это способствует увеличению производительности машины и улучшает стабильность ее работы.

Размеры канавок выполняют таким образом, чтобы в них входила примерно половина гранулы. Втулка около бункера охлаждается водой. Охлаждение производится для того, чтобы исключить оплавление гранул и их прилипание к поверхности загрузочного отверстия. В противном случае нарушается равномерная подача материала в каналы шнека. При переработке порошкообразного полимера или дробленых отходов в бункере экструдера устанавливают ворошитель, чтобы исключить зависание материала на входе в зону загрузки.

Производительность экструдера для зоны загрузки может быть найдена с учетом скорости движения полимера относительно цилиндра v_M и площади сечения винтового канала. По мере движения гранул 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 w (рис. 1.4).

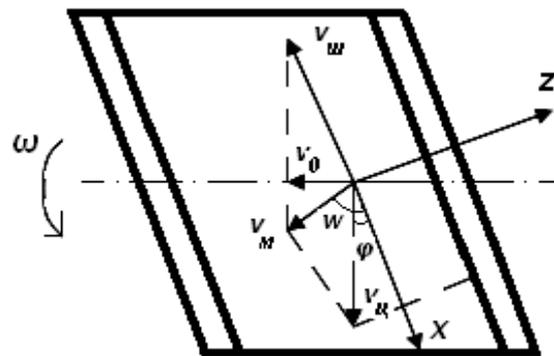


Рис. 1.4. Векторная диаграмма скоростей в зоне загрузки (пояснения в тексте)

При вращении шнека с угловой скоростью ω , он также перемещается относительно цилиндра с окружной скоростью, равной:

$$v_{\omega} = \omega R_{cp}, \quad (1.1)$$

где R_{cp} – средний радиус выступов нарезки шнека.

При этом гранулы проскальзывают по винтовой нарезке шнека со скоростью v_{ω} , поэтому движение гранул по окружности можно описать через геометрическую сумму двух векторов:

$$\vec{v}_M = \vec{v}_{\omega} + \vec{v}_{\text{пр}}. \quad (1.2)$$

Как видно на рис. 1.4, если полимер не проскальзывает по поверхности шнека $v_{\omega} = 0$, то он вращается вместе со шнеком и поступа-

тельное движение его вдоль оси отсутствует. При отсутствии вращательного движения полимера относительно цилиндра, например при наличии продольных канавок на цилиндре, вектор скорости движения гранул v_M направлен вдоль оси, т.е. $w = 90 + \varphi$; при этом достигается максимальная производительность.

Поскольку векторы скоростей v_M и $v_{ц}$, вписываются в один параллелограмм, приравняв проекции их на ось z , получаем:

$$v_M = v_{ц} \frac{\sin \varphi}{\sin w}. \quad (1.3)$$

В этом случае, используя выражение (1.1), имеем

$$v_M = \frac{\omega R_{cp} \sin \varphi}{\sin w}. \quad (1.4)$$

Скорость движения полимера относительно поверхности шнека:

$$v_{ш} = \omega R_1 \cos \varphi - v_M \cos w. \quad (1.5)$$

Для расчета производительности используем скорость v_0 , направленную по оси цилиндра:

$$v_0 = \omega R_{cp} (1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} w) \sin \varphi \cos \varphi. \quad (1.6)$$

Производительность экструдера в зоне загрузки равна произведению площади сечения канала шнека, скорости v_0 и насыпной плотности гранулированного полимера ρ_n ;

$$Q_d = \Delta S_{сеч} v_0 \rho_n. \quad (1.7)$$

Площадь сечения канала шнека:

$$\Delta S_{сеч} = \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{2\pi r - s}{\operatorname{tg} \varphi} \right) dr. \quad (1.8)$$

Подставляя значение v_0 из (1.6) и $\Delta S_{сеч}$ из (1.8) и интегрируя, получим:

$$Q_d = \rho_n \left[\pi \left(R_2^2 - R_1^2 - \frac{s h_2}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \right] \omega R_{cp} (1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} w) \sin \varphi \cos \varphi. \quad (1.9)$$

В уравнение (1.9) входит угол w , который зависит как от условий экструзии, так и от насыпной плотности полимера.

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. 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. Уплотнение гранул способствует удалению воздуха (отжатию его к загрузочному бункеру), что исключает попадание пузырьков его в изделие.

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_M , т.е. конструктивно обеспечивают строгую винтовую траекторию движения полимера. Угол нарезки канавок должен быть равен

$$\alpha = \omega - \varphi . \quad (1.10)$$

Для достижения лучшего сцепления гранул с поверхностью цилиндра и обеспечения заданного угла движения гранул канавки нарезают многозаходными. Профиль канавки делают прямоугольным, трапецеидальным 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 $l = 4 - 5 D$ (диаметра шнека) от бункера поверхность цилиндра становится гладкой.

Экструзионные машины с винтовыми канавками на поверхности цилиндра характеризуются высокой производительностью и малым колебанием ее в зависимости от различных факторов. Например, производительность таких экструдеров при переработке полиэтилена, поливинилхлорида и полипропилена в 1,5 – 2 раза выше, чем у экс-

тродеров с гладким цилиндром. При этом в зоне дозирования нарушается процесс гомогенизации. Поэтому в таких экструдерах необходимо применять специальные шнеки с уменьшенной глубиной нарезки в зоне загрузки, а также предусматривать смесительные устройства в зоне дозирования. Для повышения эффективности работы зоны загрузки в экструдерах с продольными или винтовыми канавками необходимо уменьшить угол нарезки шнека до величины $\varphi = 10 - 12^\circ$.

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 возникающего давления.

В данном случае нагревание зависит от тепловых потоков, обусловленных теплопроводностью и диссипацией энергии трения. Обычно температура цилиндра поддерживается выше, чем температура шнека, поэтому пленка расплава вначале появляется на поверхности цилиндра. На входе в зону плавления пленка расплава имеет незначительную толщину и не срезается нарезкой шнека. В этом случае движение материала происходит за счет течения вязкой жидкости по поверхности цилиндра и скольжения твердого слоя гранул по поверхности шнека. Нерасплавившиеся гранулы, частично уплотненные под действием давления, движутся так же, как в зоне загрузки со скоростью v_m (рис. 1.5).

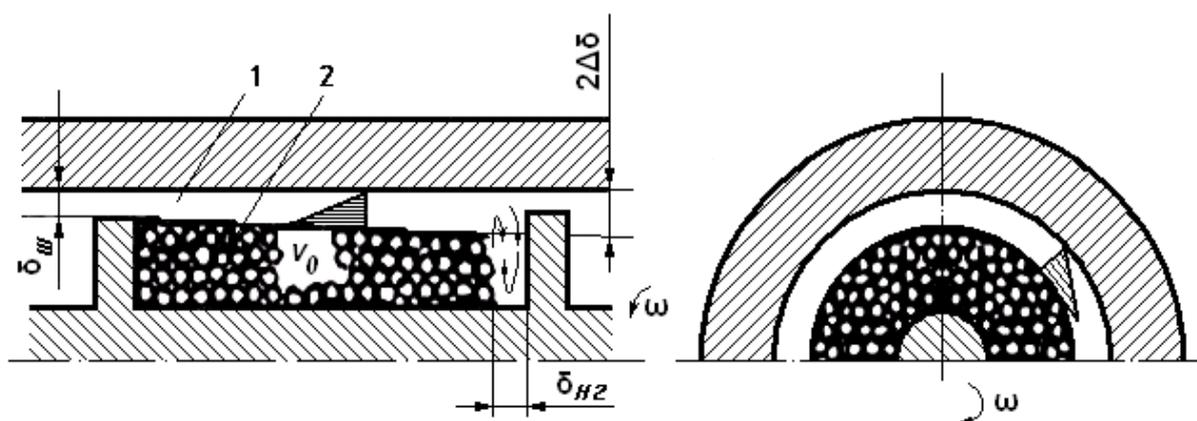


Рис. 1.5. Схема движения гранул и пленки расплава полимера в зоне плавления:
1 - расплав полимера; 2 - гранулы полимера

В зависимости от этой скорости развивается профиль скорости вязкого течения в пленке расплава на поверхности цилиндра. 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 заполняет воздушные полости между гранулами, что увеличивает коэффициент теплопроводности и повышает скорость плавления полимера. Изменение давления по длине канала шнека зависит от соотношения крутящих моментов, возникающих на поверхностях шнека и цилиндра.

Скорость роста пленки расплава зависит от температуры цилиндра, напряжения сдвига (вязкости полимера), скорости движения и теплофизических характеристик полимера.

На участке, где толщина слоя расплава превышает радиальный зазор между нарезкой шнека и цилиндром δ_n , происходят срезание расплава и накопление его у напорной грани шнека. Расплав у напорной грани движется вокруг оси шнека и, кроме того, в нем за счет избыточного давления возникают циркуляционные потоки, как показано стрелками на рис. 1.5. Циркуляция расплава возникает за счет градиента давления dp/dr , появляющегося при срезании расплава с поверхности цилиндра.

Поскольку глубина канала нарезки значительно меньше ширины, циркуляционные вихри распространяются не по всей ширине канала, а примерно на расстояние $l = \delta_{нт} = 2h$. При этом пленка расплава, находящаяся между цилиндром и слоем гранул, движется со скоростью v_m . Однако в результате действия градиента давления dp/dz , возникающего по длине шнека при срезании расплава, происходит дополнительный сдвиг и эпюра скорости становится выпуклой.

Одним из основных параметров, влияющих на скорость плавления, является температура, поэтому ее значение выбирается с таким расчетом, чтобы выполнялось условие: изменение толщины пленки расплава должно равняться изменению глубины нарезки шнека, $\Delta\delta \approx \Delta h$, где Δh – изменение глубины канала нарезки шнека на длине l . Это означает, что уменьшение толщины твердого слоя гранул должно несколько опережать уменьшение глубины канала. В противном случае может произойти заклинивание слоя гранул и производительность экструдера понизится.

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 твердого слоя, крайние гранулы захватываются расплавом и плавятся, вследствие чего ширина твердой частицы полимера уменьшается, а толщина слоя расплава у напорной грани возрастает.

От скорости плавления гранул в зоне сжатия в значительной степени зависят гомогенизация расплава в последующей зоне дозирования и соответственно качество изделий. Чем раньше заканчивается плавление, тем лучше происходит смешение расплава и выше его однородность.

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 обладают 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. В данном случае слой расплава, прилегающий к цилиндру, остается неподвижным, а расплав, находящийся около шнека, вращается вместе с ним со скоростью $v_0 = \omega R_1$. Часть расплава, которая остается неподвижной, срезается с поверхности цилиндра винтовым выступом нарезки шнека, вследствие чего по ширине канала возникает перепад давления.

Поскольку у набегающей грани выступа шнека давление наиболее высокое, 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 ($b/h \approx 15 - 20$), циркуляционные вихри образуются

на сравнительно небольшом участке канала шнека, примерно на ширине $b_{ц} = 2h_i$. В остальной части канала расплав течет вдоль оси z под действием градиента давления.

Схема течения расплава показана на рис. 1.6. Как видно из рисунка, 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 давления, возникающего у напорной грани, часть расплава перетекает через радиальный зазор между выступом нарезки шнека и цилиндром, т.е. возникает поток утечек.

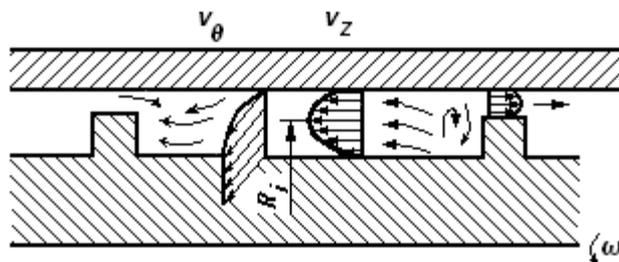


Рис. 1.6. Схема течения расплава полимера в канале шнека зоны дозирования (разрез вдоль оси цилиндра)

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 экструдера может работать в трех 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. 1.7, а).

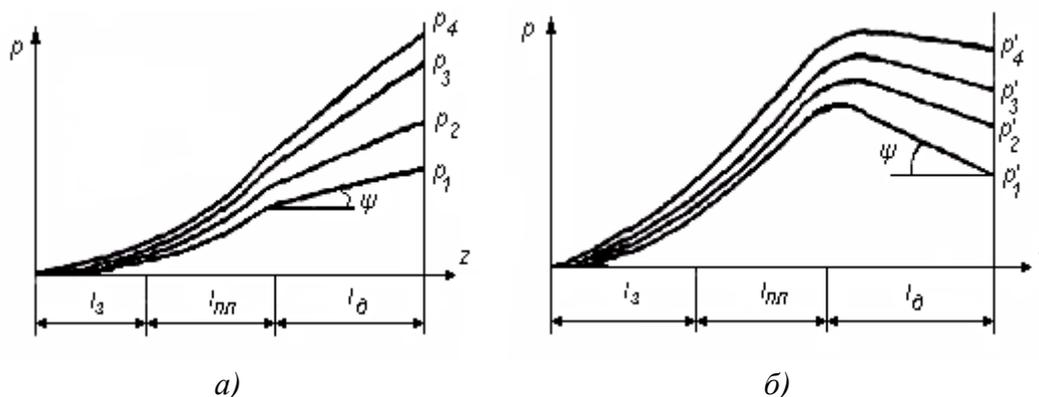


Рис. 1.7. Распределение давления вдоль оси цилиндра при насосном режиме работы зоны дозирования (p_1, p_2, p_3, p_4) (а) и в дросселирующем режиме (p'_1, p'_2, p'_3, p'_4) (б) при различных давлениях на выходе из экструдера (угол ψ зависит от градиента давления): $p_1 < p_2 < p_3 < p_4$; $p'_1 < p'_2 < p'_3 < p'_4$

В результате часть расплава течет по винтовым каналам шнека к зоне плавления со скоростью $v_{\Delta p}$, которая совпадает по направлению со скоростью v_{θ} , возникающей от вращения шнека. Поток, обусловленный скоростью $v_{\Delta p}$ при отрицательном градиенте давления, называют обратным потоком.

По мере увеличения давления в головке перепад давления вдоль винтового канала возрастает, поэтому скорость $v_{\Delta p}$ также повышается. При геометрическом сложении векторов скорости $v_{\Delta p}$ и v_{θ} , изменяется эпюра скорости течения расплава в тангенциальном направлении.

Таким образом, чем больше перепад давления, тем 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 производительности экструдера. 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 в каналах шнека, что способствует лучшей гомогенизации расплава и, следовательно, повышению качества изделий, получаемых методом экструзии.

Соппротивление 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 головки.

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 $p_2 - p_3$, тем меньше градиент давления, и при высоком давлении в головке режим работы может смениться на дозирующий $dp/d\theta = 0$, а затем перейти в насосный. Градиент давления зависит от перепада давления в зоне дозирования и характеризуется тангенсом угла наклона кривой $tg\psi$ (рис. 1.7, б).

Поскольку градиент давления $dp/d\theta$ меняет знак, вектор скорости $v_{\Delta p}$ также изменяет направление и становится по направлению противоположным вектору скорости v_{θ} , (рис. 1.8). При работе в дрос-

селирующем режиме из вектора скорости v_θ вычитается вектор скорости $v_{\Delta p}$, поэтому уменьшается поток расплава вращающийся вместе со шнеком, скорость v_z становится больше, чем при работе в насосном режиме. Однако в данном случае, чем меньше давление на входе в формующую головку, тем больше составляющая скорости $v_{\Delta p}$. При этом одновременно с понижением давления в головке уменьшается поток расплава, вращающийся вокруг шнека, так как из вектора скорости v_θ вычитается скорость $v_{\Delta p}$, (рис. 1.8, б). Производительность агрегата при этом возрастает. При работе экструдера как в насосном, так и в дросселирующем режиме увеличение давления в формующей головке снижает производительность и повышает гомогенизацию расплава.

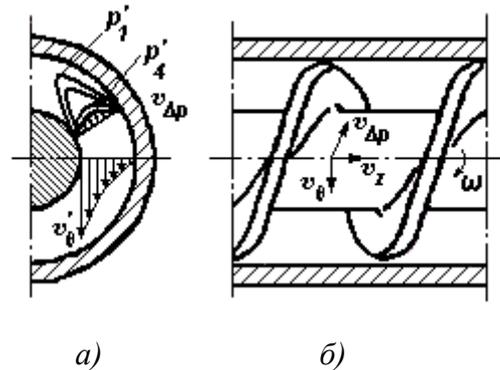


Рис. 1.8. Схема направлений скоростей в канале шнека: а – эпюры тангенциальной скорости v_θ от вращения шнека и скорости экструдера $v_{\Delta p}$ от градиента давления; б – направление векторов скоростей относительно

С учетом всего сказанного, расплав при движении совершает сложную траекторию, т.е. перемещается по спирали вокруг оси шнека с шагом, зависящим от скорости v_z . В момент входа расплава полимера в зону циркуляционного потока у напорной грани шнека он одновременно совершает вращательное движение в поперечном сечении канала.

Дросселирующий режим может быть обеспечен тогда, когда создается высокое давление в зоне загрузки и плавления, особенно в экструдерах с продольным или винтовыми канавками на внутренней поверхности цилиндра в зоне загрузки. Часть этого давления расходуется на развитие осевого потока в винтовых каналах шнека, а остальная – на течение расплава в формующей головке. Проследить изменение производительности весьма легко на рабочей характеристике экструдера $Q = \psi(p)$. При любом давлении p_1' или p_4' дросселирующего режима производительность агрегата становится выше, чем при работе в насосном режиме при давлении p_1 и p_4 .

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 ω . Если рассмотреть эпюры скоростей с неподвижным шнеком в сечении, пер-

пендикулярном винтовому каналу, можно заметить, что часть потока движется вместе с цилиндром, а другая часть под действием градиента давления – в противоположную сторону.

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. 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 у напорной грани нарезки шнека. Интенсивность таких местных вихрей зависит от глубины нарезки шнека, а также от характера распределения давления по зонам цилиндра. Если сравнить эпюры напряжений сдвига τ_{rz} , то при вращении шнека или цилиндра картина получается одинаковой, следовательно, с точки зрения механики процесс не меняется. Однако физические основы процесса течения различны, поэтому, если 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 движения с вращающимся цилиндром в том случае, когда математическое описание процесса выполняется в цилиндрических координатах, так как при этом расчеты количественно отличаются.

Гомогенизация расплава в зоне дозирования значительно возрастает при использовании шнеков со специальными смесительными насадками на конце (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Различные варианты конструкций шнеков: а – с гладким наконечником; б – наконечник оснащен смесительным узлом с выступающими шипами; в – шнек снабжен улучшенным смесительным узлом; г – смесительный узел с поперечными отверстиями на витках нарезки шнека

Обычно для переработки полиэтилена, полистирола и полипропилена применяют конструкцию с выступающими профильными шипами, которые разбивают поток, обеспечивают интенсивное перемешивание расплава и одновременно выравнивают температуру по сечению. При изготовлении пленок, когда нужна высокая степень гомогенизации, применяют шнеки, на конце которых кроме выступающих шипов имеется зона с продольными пазами, (рис. 1.9, в). Пазы на конце шнека выполнены не сквозными, поэтому расплав из питающих пазов через узкий радиальный зазор перетекает в рядом расположенные, таким образом все нерасплавившиеся частички в узком зазоре за счет высокой скорости и напряжений сдвига разрушаются и плавятся. Для исключения разложения полимера, оставшегося при остановке экструдера, продольные пазы желательно выполнять винтовыми или наклонными, расположенными под углом около 45° , чтобы в конце работы почти весь расплав из канавок выдавливался. Необходимо заметить, что для обеспечения течения расплава в продольных пазах затрачивается давление и это приводит к снижению производительности экструдера.

Весьма эффективно обеспечивает гомогенизацию конструкция, шнек которой имеет поперечные фигурные отверстия в выступах нарезки. За счет многократного перетекания расплава из одного витка в соседний расплав интенсивно перемешивается (рис. 1.9, з). Конструкции с продольными пазами и с выступающими шипами не целесообразно использовать при переработке нетермостойких полимеров. В этих случаях применяется шнек с гладким коническим наконечником (рис. 1.9, а).

На производительность экструдера и степень гомогенизации расплава большое влияние оказывает также **поток утечек**. Как уже было рассмотрено ранее, при движении выступов винтовой нарезки шнека по ширине канала создается осевой перепад давления. Между напорной и противоположной гранями выступа нарезки шнека появляется градиент давления dp'/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.

Поскольку поток утечек имеет место в узком зазоре, в нем возникают большие скорости сдвига, обусловленные как градиентом давления dp'/dz , так и угловой скоростью вращения шнека, что приводит 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 (ограничивать) снижать частоту вращения шнека. Значительное влияние оказывает поток утечек при переработке полимеров, расплавы которых обладают сильной аномалией вязкости. Вязкость расплава в радиальном зазоре за счет большой скорости сдвига понижается, и поток утечек возрастает, уменьшая производительность экструдера.

Количественные закономерности движения расплава для зоны дозирования и производительности экструдера рассмотрены в [1]. Здесь же коснемся качественной картины работы экструдера.

1.1.2. Качественный анализ работы экструдера

В обычном пластицирующем экструдере полимер проходит через три состояния: вначале это твердый материал, затем смесь расплава и твердого материала и, наконец, расплав.

Зона дозирования играет очень большую роль в экструдере, так как обычно именно она определяет производительность машины и качество выходящего расплава. В то же время ее проще всего анализировать, потому что к течению расплава в этой зоне полностью применимы законы течения вязких жидкостей.

В дозирующей зоне существуют три основных потока. Вынужденный поток (прямой поток) представляет собой поступательное течение расплава, которое возникает как следствие относительного движения корпуса и цилиндра; противоток, который можно рассматривать как течение расплава в обратном направлении, возникающее под действием развивающегося в головке машины давления. Третья разновидность потоков – это утечка. Перепад давлений, возникающий вследствие существования повышенного давления в головке, между двумя боковыми поверхностями стенки канала вызывает появление

утечки через кольцевой зазор между гребнем стенки канала червяка и внутренней поверхностью корпуса. Обычно утечка, по сравнению с двумя другими разновидностями течения, очень незначительна, и ею можно пренебречь.

Производительность дозирующей зоны равна, таким образом, разности между расходом вынужденного потока и расходом противотока и течения утечки.

Вынужденный поток представляет собой поступательное течение расплава, возникающее вследствие существования относительно движения корпуса и цилиндра. Если представить себе экструдер, на выходе из червяка которого расплав не встречает никакого сопротивления, так как и пакет сит, и мундштук отсутствуют, то в такой машине давление в головке будет равно нулю. Поэтому в канале червяка противотока не будет. Материал, находящийся в кольцевом пространстве между вращающейся наружной поверхностью сердечника червяка и внутренней поверхностью корпуса, подвергается деформации сдвига, которая в результате воздействия стенок винтового канала превращается в поступательное движение материала по каналу, т.е. в вынужденный поток. Основными параметрами, определяющими величину объемного расхода вынужденного потока, являются: глубина канала, ширина канала, диаметр червяка и скорость его вращения.

Противоток возникает в результате существования избыточного давления расплава в головке экструдера. Чтобы лучше понять причину появления противотока, представим, что червяк неподвижен, а в головке машины имеется избыточное давление. В этих воображаемых условиях винтовой канал червяка уподобится длинной насадке прямоугольного сечения.

Вследствие существования давления в головке расплав потечет вдоль винтового канала в обратном направлении. В действительности противоток представляет собой своеобразное ограничение вынужденного потока, возникающее вследствие существования повышенного давления в головке. Практически в канале червяка никогда не возникает потока материала в обратном направлении. На величину противотока влияют в основном следующие факторы: глубина канала, диаметр червяка, длина зоны давления, вязкость расплава и величина давления в головке.

Рабочие характеристики экструдера

Познакомившись с основными видами потоков, существующих в канале червяка, можно попытаться предсказать, каким образом будет зависеть производительность экструдера от условий переработки при использовании червяков различных конструкций.

В первом приближении 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. 1.8, б).

Течение считаем установившимся, гравитационными силами и силами инерции пренебрегаем, скольжение расплава по поверхности шнека и цилиндра отсутствует, размеры канала шнека по длине постоянные. Тогда производительность экструдера (зоны дозирования) и головки, равны:

$$q_z = \alpha n - \beta \frac{\Delta p}{\mu_k} - \gamma \frac{\Delta p}{\mu_s}, \quad (1.11)$$

$$q_H = K \frac{\Delta p_H}{\mu_H}, \quad (1.12)$$

где Δp – изменение давления в зоне дозирования; Δp_H – изменение давления в головке; n – скорость вращения шнека; μ_k , μ_s и μ_H – эффективная вязкость расплава в зоне винтового канала, пристенном зазоре и головке соответственно; α , β и γ – геометрические коэффициенты прямого и обратного потоков и потока утечек; K – коэффициент геометрической формы головки/

При расчете производительности головки ее условно разбивают на участки с постоянной геометрией. В этом случае уравнение 1.12 преобразуется:

$$q_H = \Delta p_H \sum \frac{K_i}{\mu_{H_i}}, \quad (1.13)$$

где μ_{H_i} – эффективная вязкость расплава в i -м участке головки; K_i – коэффициент геометрической формы i -й части головки (см. лабораторную работу «Получение изделий методом экструзии»)

Рассмотренные выше характеристики шнека и головки могут быть изображены графически в координатах $q—\Delta p$. На графике «*рабочая точка*» определяется пересечением этих двух линий. В качестве примера на рис. 1.10 приведены графики зависимости производительности от давления в головке для шнеков, отличающихся друг от друга длиной дозирующей зоны. Предполагается, что расплав представляет собой ньютоновскую жидкость, и все три шнека испытываются в одинаковых условиях: одинаковая скорость вращения, одинаковая вязкость расплава. Процесс проводят изотермически. На приведенном графике представлены характеристики головок с матрицами малого сечения и большого сечения.

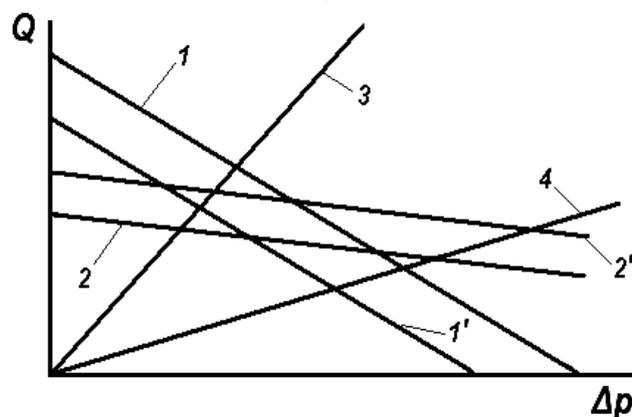


Рис. 1.10. Характеристика червяка и головки: 1, 1' — червяк с длинной и глубокой дозирующей зоной со скоростью вращения $n < n'$; 2, 2' — червяк с мелкой дозирующей зоной со скоростью вращения $n < n'$; 3 — головка с матрицей большого сечения (малое сопротивление); 4 — головка с матрицей малого сечения (большое сопротивление)

Характеристика шнека с глубоким каналом на участке дозирующей зоны представлена на графике прямой 1. Производительность такого червяка при «свободном выходе» (нулевое давление) очень велика, так как расход вынужденного потока при глубоких каналах весьма значителен. В то же время производительность экструдера со шнеком такого типа оказывается очень чувствительной к величине давления в головке, так как глубокий канал представляет собой по существу насадку с большой площадью поперечного сечения, в котором легко возникает противоток. Этим объясняется быстрое уменьшение производительности с увеличением противодействия в головке.

Характеристика шнека с постоянной глубиной канала, но с большей длиной дозирующей зоны по сравнению с червяком, соответствующим кривой 1, представлена прямой 2. Расход вынужденного потока при нулевом давлении в головке («открытый выход») у обоих червяков одинаков, однако благодаря увеличению длины канала, влияние противодействия на производительность существенно уменьшается.

Если глубина винтового канала в дозирующей зоне невелика (мелкий канал), то производительность червяка при режиме «открытого выхода» уменьшится (прямая 3), так как величина возможного объемного расхода вынужденного потока пропорциональна глубине канала. В то же время производительность этого червяка гораздо меньше чувствительна к изменениям величины противодействия, так как сопротивление противотоку у мелкого канала намного больше.

При экструзии расплавов, обладающих свойствами ньютоновских жидкостей, всякое изменение скорости вращения червяка приводит к параллельному смещению прямых, изображенных на рис. 1.10. (1', 2' и 3' соответственно).

На том же графике прямыми линиями 4 и 3 представлены характеристики головок с матрицами малого (прямая 3) и большого (прямая 4) поперечного сечения. При нулевом давлении в головке течение через матрицу отсутствует. По мере увеличения давления, создаваемого червяком в головке, расход протекающего через головку материала увеличивается. При этом расход материала через головку, в которой установлена матрица большего поперечного сечения, увеличивается быстрее, чем расход через головку, в которой установлена матрица с меньшим поперечным сечением.

Точка пересечения соответствующих характеристик головки и шнека (**рабочая точка**) определяет объемную производительность, которую обеспечивает данное сочетание шнека и головки.

Расчет производительности экструдера

Производительность экструдера почти не зависит от температуры, так как, несмотря на то что значения вязкости материала в шнеке и головке вследствие различия в величине градиентов скорости неодинаковы, их отношение с изменением температуры остается почти постоянным. Это происходит потому, что значения вязкости в червяке и головке при изменении температуры изменяются примерно одинаково.

В определенных пределах можно влиять на производительность машины, изменяя температуру головки. При увеличении температуры головки средняя вязкость расплава в головке μ_L понижается, а это приводит к увеличению производительности машины. При этом величина давления в головке будет уменьшаться. Характер этих изме-

нений зависит от отношения коэффициента сопротивления головки k к геометрическому коэффициенту противотока β . Например, если величина β мала по сравнению с величиной k (как это наблюдалось бы для мелкого червяка при большой площади поперечного сечения канала в мундштуке), то изменение вязкости материала в головке заметно не влияет на величину производительности, которая, по существу, определяется червяком, но вызывает значительные изменения давления в головке. Поэтому производительность мелких червяков гораздо меньше зависит от колебаний температуры головки, которые могут быть следствием периодического включения и отключения нагревательных элементов с обычной системой автоматического регулирования температуры.

Рассмотренные выше характеристики червяка и головки изображены графически в координатах $q-\Delta p$. (рис. 1.11). На графике «*рабочая точка*» экструдера определяется пересечением этих двух линий. Такой метод позволяет изобразить на одной диаграмме все многообразие возможных режимов экструзии. Рис. 1.11 наглядно демонстрирует целесообразность применения этого метода.

На рис. 1.11 изображены характеристики двух червяков (отличающихся друг от друга только глубиной винтового канала) и характеристики двух головок с большой и малой площадью поперечного сечения. При установке головки с большим поперечным сечением (меньший коэффициент сопротивления) точка A определяет режим работы червяка с мелким каналом, а точка B – червяка с глубоким каналом. В данном случае червяк с более глубоким каналом обеспечивает более высокую производительность. Если установлена головка с большим сопротивлением (меньшая площадь поперечного сечения), то точка C будет определять режим работы червяка с мелким каналом, а точка D – червяка с глубоким каналом. В этом случае лучшие результаты дает червяк с мелким каналом, который создает более вы-

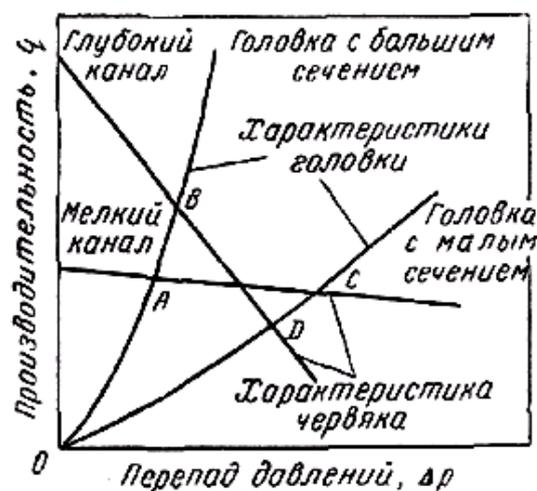


Рис. 1.11. Характеристика червяка и головки

сокое давление и одновременно обеспечивает большую производительность. Очевидно, что каждой головке соответствует некоторая оптимальная геометрия канала червяка, обеспечивающая максимальную производительность (этот наивыгоднейший канал будет рассмотрен ниже).

На рис. 1.12 представлено влияние изменений температуры материала в головке и червяке на давление в головке и производительность машины. На графике изображены характеристики червяка и головки при температурах T_1 и T_2 ($T_2 > T_1$). Если температуры расплава в червяке и головке одинаковы и равны T_2 , режим работы машины определяется точкой A . Если одновременно уменьшить температуры расплава в червяке и головке до температуры T_1 , то давление в головке

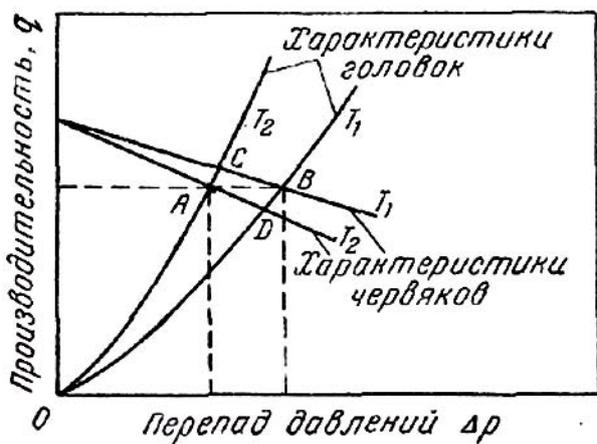


Рис. 1.12. Влияние температуры червяка и головки на производительность экструдера (пояснения в тексте)

высокой температуры T_2 , производительность машины, определяемая точкой C , окажется несколько большей.

Диаграммы такого типа показывают, что производительность мелких и длинных червяков в значительно меньшей мере зависит от температуры расплава, чем производительность более глубоких и коротких червяков.

В настоящее время существует значительное количество компьютерных программ, позволяющих моделировать поведение полимера в экструдере, и рассчитывать оптимальные параметры процесса экструзии. Для получения достоверных данных необходимо знать величину вязкости расплава в червяке и в головке. В том случае если

увеличится до значения, определяемого точкой B . Величина же производительности при этом останется практически неизменной. Однако, если температура расплава в червяке по-прежнему равна T_2 , а температура расплава в головке уменьшена до T_1 , то производительность экструдера понизится до значения, определяемого точкой D . Напротив, если температура расплава в червяке равна T_1 , а головка нагрета до более

расплав обладает свойствами неньютоновской жидкости, величины вязкостей должны быть определены соответственно при значениях градиента скорости, существующих в канале червяка и в головке экструдера. Чтобы оценить величину эффективной вязкости расплава, находящегося в канале червяка при различных температурах и скоростях вращения червяка, необходимо экспериментально определить производительность и перепад давлений на данном участке червяка в этих условиях.

Реологические характеристики неньютоновских жидкостей при течении через каналы простой геометрической формы можно достаточно строго рассчитывать. В большинстве случаев для определения вязкости расплава в головке можно пользоваться кривой течения, полученной на капиллярном вискозиметре. При этом величина градиента скорости в головках с профилирующим отверстием круглой формы определяется из выражения $\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3}$ в головках щелевого типа $\gamma = \frac{6\tau}{wh^2}$ (в последнем случае h – минимальная высота щели, w – ширина щели, замеренная перпендикулярно направлению потока).

При использовании достоверных реологических данных расчетные данные практически на 100 % совпадают с экспериментальными, что позволяет быстро и точно найти основные технологические параметры.

1.2. Технология изготовления изделий методом экструзии

Для производства погонажных изделий любого типа применяют экструзионные линии, которые обычно классифицируют по виду получаемых изделий: 1) линии для производства гладких труб и шлангов, гофрированных и перфорированных шлангов и труб, оболочковых труб, а также труб сложного профиля (овальных, квадратных, прямоугольных); 2) пленочные агрегаты для производства пленки рукавной, плоской, одно- и многослойной, термоусадочной и способной к растягиванию (стрейч); 3) листовальные агрегаты; 4) агрегаты для экструзии профилей; 5) кабельные линии; 6) линии гранулирования пластмасс; 7) линии переработки вторичного полимерного сырья.

1.2.1. Производство однослойных труб

Процесс изготовления труб основан на непрерывном выдавливании расплава через кольцевую щель формующей головки с последующим калиброванием и охлаждением.

Экструзией 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 их сополимеров.

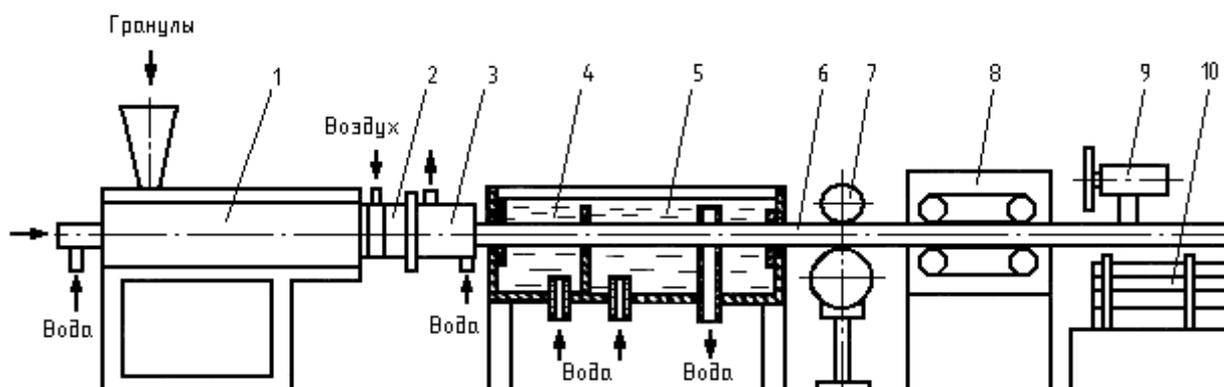


Рис. 1.13. Схема агрегата для производства труб методом экструзии: 1 – экструдер; 2 – формующая головка; 3 – калибрующая насадка; 4, 5 – первая и вторая зоны охлаждения; 6 – трубочатый профиль; 7 – измерительно-маркирующее устройство; 8 – тянущее устройство; 9 – отрезающее устройство; 10 – приемный стол (штабелирующее устройство)

Процесс производства труб состоит: 1) из подготовки сырья; 2) плавления и гомогенизации расплава; 3) формования профиля трубы из расплава; 4) калибрования трубы; 5) охлаждения трубы; 6) намотки или резки; 7) маркировки.

Схема экструзионной линии для производства труб показана на рис. 1.13. Гранулы полимера загружают в бункер экструдера 1, где они расплавляются и выдавливаются через формующую трубную головку 2. Трубочатый профиль 6 поступает внутрь калибровочной насадки (гильзы) 3, где частично охлаждается и приобретает необходимые размеры. Для прижатия расплава к стенкам калибрующей

насадки внутрь трубы подводится сжатый воздух 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.

Плавление полимера и гомогенизация расплава

Подготовка расплава к формованию обычно проводится на шнековых экструдерах с длиной червяка (25 – 30) D (D – диаметр шнека).

При плавлении полимера и гомогенизации расплава требуется обеспечить хорошую однородность расплава по температуре, а также полное плавление гранул, чтобы исключить попадание в изделие нерасплавленных частиц полимера. В противном случае качество изделий понижается. Кроме того, чтобы происходило качественное формование расплава и последующее сохранение заданной формы, полимер должен быть нагрет до определенной температуры. Экструзионный агрегат должен работать при частоте вращения шнека, обеспечивающей заданную скорость выхода расплава и определенное избыточное давление на входе в формующую головку. Марка экструдера выбирается в зависимости от размеров (площади сечения F_3) изготавливаемой трубы, плотности полимера ρ_0 и скорости отвода трубы v_3 . Расчетная производительность должна составлять примерно 60 % максимальной производительности агрегата по паспортным данным.

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 из условия исключения эластической турбулентности (дробления расплава и появления шероховатости) или в зависимости от скорости охлаждения трубы с учетом длины охлаждающей ванны.

Формование профиля трубы

Формование осуществляется за счет течения расплава полимера через кольцевую щель головки. Для этого обычно используют прямые, угловые формующие головки.

Прямоточная головка (рис. 1.14) состоит из левого 3 и правого 6 частей корпуса, между которыми закреплена радиальная решетка дорнодержателя 11. В переднюю часть корпуса 6

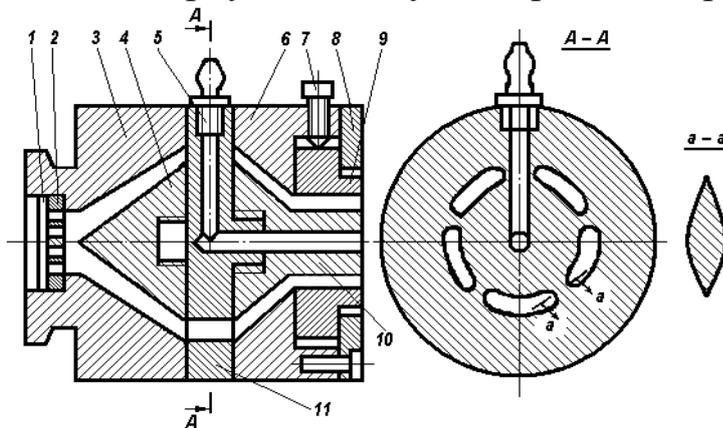


Рис.1.14. Прямоточная трубная головка: 1 – пакет сеток; 2 – решетка; 3 и 6 – корпус головки; 4 – рассекающий; 5 – штуцер; 7 – винт регулировочный; 8 – фланец; 9 – формующее кольцо (мундштук); 10 – дорн; 11 – решетка дорнодержателя. В сечении *a – a* показан обтекаемый профиль ребра дорнодержателя

вставляется формующее кольцо (мундштук) 9, которое крепится к корпусу фланцем 8.

На входе в головку вставляются решетка 2 и пакет фильтрующих сеток 1. На решетке дорнодержателя 11 закреплены рассекающий 4 и дорн 10. Решетка дорнодержателя имеет штуцер 5 для подвода сжатого воздуха внутрь трубы.

Расплав полимера из цилиндра экструдера проходит через пакет фильтрующих сеток 1, решетку 2, а затем течет в кольцевом зазоре между патрубком 3 и рассекающим дорна 4 и входит в отверстия решетки дорнодержателя 11, где ребрами разделяется на несколько параллельных потоков. Чтобы не было застойных зон, ребра решетки дорнодержателя имеют обтекаемые формы (см. сечение А-А).

После решетки дорнодержателя расплав вновь поступает в кольцевой канал, образованный второй частью корпуса 6 и дорном 10. Окончательные размеры расплав принимает в формующем канале, при этом для обеспечения равной толщины трубы по периметру формующее кольцо (мундштук) 9 может перемещаться винтами 7 в радиальных направлениях относительно дорна. Например, вывинчивая нижние и вворачивая верхние винты 7, уменьшаем толщину трубы сверху, а снизу она увеличивается.

Длина формующего канала обычно принимается кратной глубине канала h и должна быть равна $l/h = 15 - 30$. При проектировании головок необходимо учитывать, что в зависимости от длины канала изменяется анизотропия свойств трубы в осевом и тангенциальном направлениях. При этом анизотропия возрастает с увеличением скорости сдвига и уменьшается с увеличением длины канала (рис. 1.15).

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. Анизотропия механических свойств в зависимости от действия напряжений сдвига изменяется неоднозначно. Так, при переработке аморфных полимеров ориентация и прочность всегда больше в направлении экструзии. То же самое наблюдается и для полимеров с небольшой степенью кристалличности, например для полиэтилена высокого давления (низкой плотности).

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 на рис. 1.15, при достижении определенной температуры расплава прочность изделий в продольном и поперечном направлениях становится равной.

При формировании профиля трубы расплав из головки выходит не свободно, а отводится с помощью тянущего устройства. Если расплав отводится со скоростью большей, чем скорость выхода расплава, происходит уменьшение толщины стенки трубы и повыша-

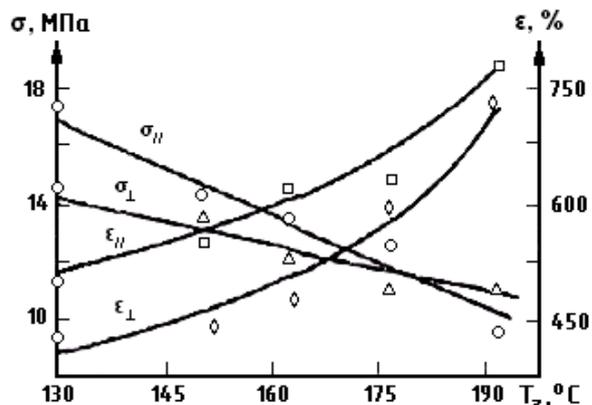


Рис. 1.15. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении σ и относительного удлинения ϵ от температуры головки T для полиэтилена низкой плотности: $\sigma_{\parallel}, \epsilon_{\parallel}$ – разрушающее напряжение и относительное удлинение вдоль направления экструзии; $\sigma_{\perp}, \epsilon_{\perp}$ – то же в направлении, перпендикулярном экструзии (в тангенциальном направлении)

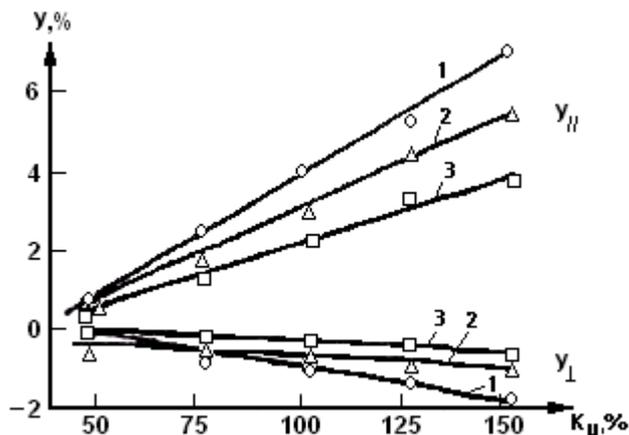


Рис. 1.16. Зависимость термической усадки вдоль направления экструзии Y_{\parallel} и в тангенциальном направлении Y_{\perp} от степени вытяжки расплава, %; 1 – полиэтилен низкой плотности; 2 – полиэтилен высокой плотности; 3 – полипропилен

ется 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. 1.16).

Под степенью вытяжки ε_B понимается отношение площади формирующего зазора в головке к площади сечения трубы, выраженное в процентах.

В зависимости от степени вытяжки изменяются физико-механические свойства труб, так, разрушающее напряжение вдоль тру-

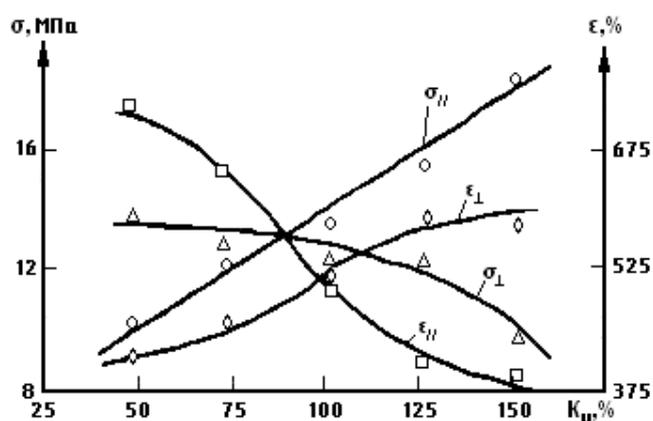


Рис. 1.17. Зависимость разрушающего напряжения σ и относительного удлинения экструзионных изделий от степени вытяжки расплава K_u на выходе из головки

бы возрастает, а в поперечном направлении уменьшается (рис. 1.17). 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, формирование труб из ПЭВД следует проводить при наложении на осевой поток расплава тангенциальных напряжении сдвига. С этой целью применяют головки с вращающимся дорном или кольцом (мундштуком).

Калибрование труб

Для придания профилю экструдата заданных размеров и исключения его деформации в охлаждающем устройстве трубы калибруют, т.е. предварительно охлаждают с обеспечением 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. 1.18.

Трубчатая заготовка расплава выдавливается из головки и поступает внутрь металлической гильзы калибратора. При подаче сжатого воздуха внутрь трубы происходит частичное раздувание ее по диаметру, вследствие чего труба на выходе из головки плотно прилегает к охлаждаемым стенкам калибрующей гильзы.

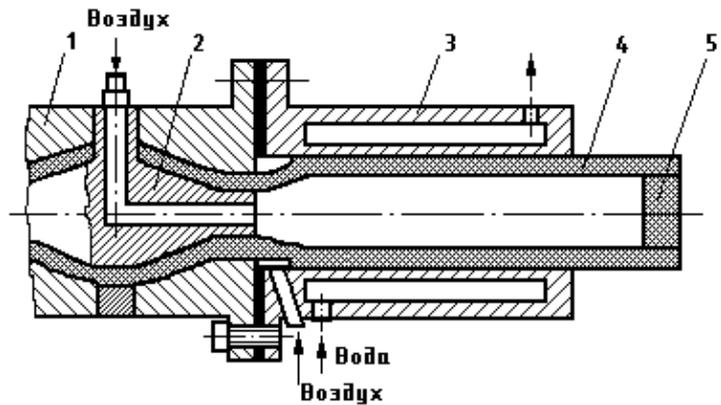


Рис. 1.18. Калибровка трубы по наружному диаметру: 1 – корпус головки; 2 – дорн; 3 – калибрующая насадка; 4 – труба; 5 – пробка

Чтобы не произошло разрушения (раздувания) экструдата, насадка в данном случае крепится вплотную к головке, а в рубашку калибрующей насадки подается охлаждающая жидкость. Для исключения прилипания 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.

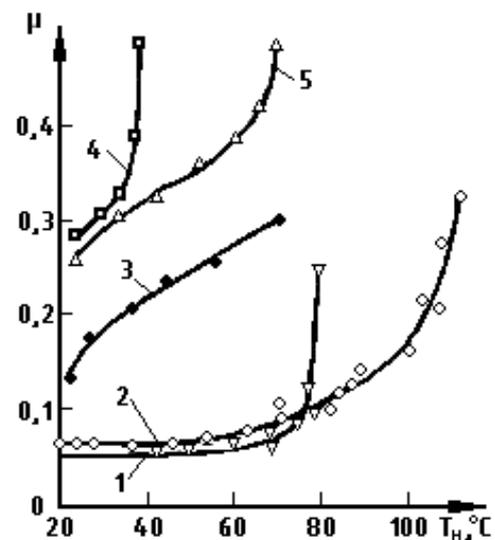


Рис. 1.19. Зависимость коэффициента трения μ от температуры насадки T_n : 1 – жесткий поливинилхлорид; 2 – полиэтилен высокой плотности; 3 – полистирол; 4 – поливинилхлоридный пластикат; 5 – полиэтилен низкой плотности

При переработке полимеров с небольшой степенью кристалличности максимальное значение прочности проявляется вдоль направления экструзии.

Зависимость коэффициента трения от температуры насадки показана на рис. 1.19, 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. При калибровании труб из аморфных полимеров в зависимости от скорости охлаждения могут изменяться остаточные напряжения и степень ориентации макромолекул. Чем ниже температура калибрования, тем они выше. Особенно это характерно для жестких полимеров, таких как блочный полистирол.

От температуры охлаждающей воды в насадке зависит также шероховатость поверхности, что проявляется при переработке только кристаллических полимеров. С повышением температуры шероховатость труб понижается, так как в поверхностном слое степень кристалличности повышается.

Давление калибрования выбирается в зависимости от диаметра трубы, толщины ее стенки, а также от 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 из-за возрастания коэффициента трения и появления микротрещин.

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, который образует как бы воздушную смазку, однако при этом ухудшается охлаждение расплава. Поэтому целесообразнее использовать калибрующие насадки с дренажным кольцом, 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 заполнения водой зазоров и образования плотного контакта между расплавом и гильзой резко повышается скорость охлаждения трубы. Такие калибрующие насадки можно использовать при изготовлении труб из поливинилхлоридного пластика, который обладает большим коэффициентом трения. В этом случае без слоя жидкости технологический процесс калибрования практически невозможен. Для того чтобы в момент запуска агрегата вода не попадала на головку, охлаждение перед пуском

агрегата временно отключают или перекрывают дренажные отверстия.

Для создания внутри трубы давления конец ее закрывают пробкой (для жестких полимеров) или несколько раз перегибают под углом 180° (для эластичных полимеров).

Недостаток калибровки сжатым воздухом — отсутствие возможности наблюдать за качеством расплава, выходящего из головки.

Этот недостаток можно устранить, если использовать вакуумную насадку (рис. 1.20). Для создания вакуума необходимо обеспечить герметичность между экструдатом и гильзой на входе, поэтому диаметр формующего 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 калибровке толстостенных труб.

При калибровке 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 (рис. 1.21).

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

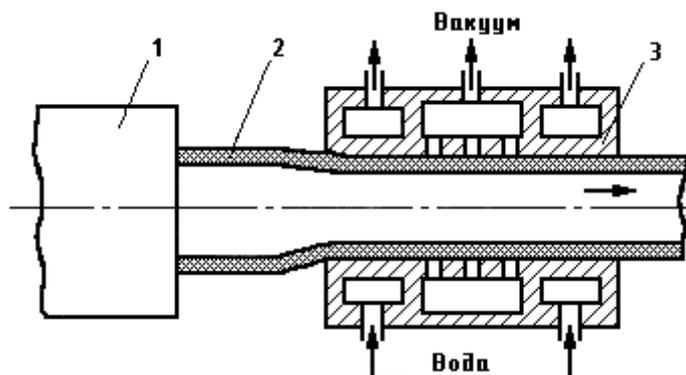


Рис. 1.20. Вакуумная калибрующая насадка: 1 — головка; 2 — труба; 3 — насадка

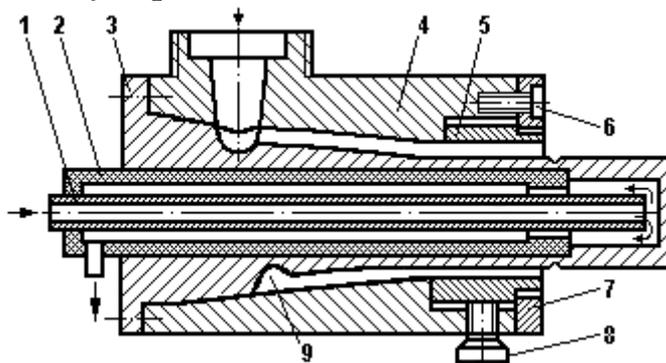


Рис. 1.21. Угловая трубная головка с охлаждаемым дорном: 1 — труба; 2 — теплоизоляционная втулка; 3 — дорн; 4 — корпус; 5 — формующее кольцо; 6 — болт; 7 — фланец; 8 — регулировочный винт; 9 — коллекторный распределитель

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 поверхность трубы получается шероховатой.

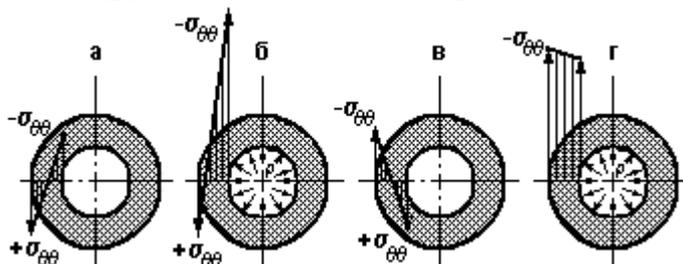


Рис. 1.22. Распределение напряжений по толщине трубы: а — при калибровании по наружному диаметру; б — то же, но при наличии давления внутри трубы; в — при калибровании на дорне; г — то же, но при наличии внутри трубы давления

В зависимости от метода калибрования изменяется картина распределения внутренних напряжений в трубе после охлаждения. Так, при калибровании по наружному диаметру верхние слои трубы в процессе усадки сжимаются, а внутренние растягиваются (рис. 1.22). Вверх направлены растягивающие напряжения.

При эксплуатации напорных 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, под действием которых может произойти ее разрушение.

При калибровании по внутреннему диаметру вначале охлаждаются внутренние слои. При последующем охлаждении расплава происходит усадка наружных слоев, за счет чего внутренние слои сжимаются и в них возникают положительные тангенциальные напряжения. При создании внутри трубы давления возникающие напряжения частично компенсируются положительными остаточными напряжениями, поэтому на стенку трубы действуют меньшие растягивающие напряжения, 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 также 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, образуемая по толщине трубы, становится более однородной.

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, 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 воды 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.

Дефекты экструдированных труб и способы их устранения

При производстве труб и шлангов возможны различные отклонения от технологических параметров, приводящие к ухудшению качества изделий и их отбраковке. Наиболее распространенные виды дефектов и способы их устранения приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Дефекты экструдированных труб и способы их устранения

Дефект	Причины возникновения	Способы устранения
Шероховатость внутренней поверхности	Высокая температура расплава или близкое расположение запорной пробки от головки (при калибровании избыточным давлением)	Снизить температуру формующей головки и последней зоны цилиндра или удлинить трос запорной пробки; снизить скорость процесса
Наружный диаметр больше допускаемого	Недостаточное охлаждение в калибрующей насадке; чрезмерное давление воздуха во внутренней полости трубы; увеличенный внутренний диаметр калибрующей насадки, не соответствующий режиму и материалу	Увеличить поступление охлаждающей воды или снизить ее температуру; снизить давление сжатого воздуха; поставить калибрующую насадку с меньшим внутренним диаметром
Наружный диаметр меньше допускаемого	Недостаточное давление воздуха на внутренней поверхности трубы; недостаточное охлаждение в калибрующей насадке при одновременно увеличенной скорости отвода трубы; уменьшенный внутренний диаметр калибрующей насадки, не соответствующий режиму и материалу	Увеличить давление сжатого воздуха; уменьшить скорость отвода и увеличить поступление охлаждающей воды в насадку; поставить калибрующую насадку с большим внутренним диаметром
Продольные утолщения, симметрично расположенные по внутренней окружности трубы	Недостаточное сжатие и выравнивание скоростей отдельных потоков расплава	Установить головку с проходным сечением (меньшим сопротивлением) в дорнодержателе или с большим сопротивлением формующего инструмента
Концентрические волнообразные утолщения, периодически повторяющиеся вдоль трубы	Пропускание сжатого воздуха через запорную пробку	Снизить давление сжатого воздуха, сменить запорную пробку или резиновые прокладки
Овальность трубы	Деформация трубы гидростатическим давлением в охлаждающей ванне; деформация трубы из-за сжимающего усилия тянущего устройства	Усилить охлаждение в калибрующей насадке, понизить температуру расплава, увеличить давление сжатого воздуха; ослабить сжатие транспортирующих органов тянущего устройства, усилить охлаждение трубы или снизить скорость процесса

Дефект	Причины возникновения	Способы устранения
Низкое относительное удлинение при разрыве	Слишком резкое охлаждение расплава в калибрующей насадке; недостаточное перемешивание (гомогенизация) расплава в цилиндре или недостаточное выравнивание скоростей потока расплава в головке	Снизить скорость или температуру воды, поступающей в калибрующую насадку; установить формирующий инструмент с более длинной цилиндрической частью и увеличенным сопротивлением после дорнодержателя
Не выдерживает испытания внутренним гидростатическим давлением	Плохая спайка отдельных потоков расплава	Повысить температуру расплава, уменьшить скорость процесса, установить формирующий инструмент с более длинной цилиндрической частью

1.2.2. Технология изготовления гофрированных труб

Для повышения поперечной жесткости трубы и сохранения ее гибкости все чаще применяют гофрированные (профилированные) трубы.

Установка для получения гофрированных труб состоит из экструдера с формирующей головкой и специального устройства – гофратора. Головка имеет удлиненные дорн и мундштук, которые вводятся внутрь тракового устройства гофратора. Гофрированная труба получается за счет раздувания трубчатого экструдата под действием сжатого воздуха после охвата его полуформами гофратора. Полуформы (матрицы) закреплены на двух движущихся цепях и за счет приводных звездочек перемещаются как непрерывный конвейер внутри гофратора.

На матрицах жестко закреплены пальцы с роликами, которые катятся по направляющим пазам. Принципиальная

схема установки представлена на рис. 1.23. Видно, что удлиненная часть дона 5 и мундштука 4 входит в зону гофратора, где полуформы

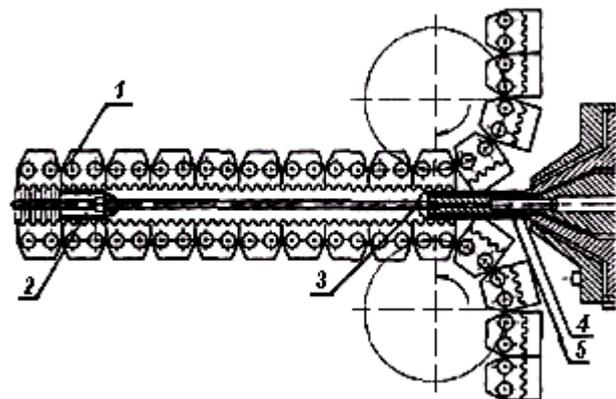


Рис. 1.23. Схема формования гофрированной трубы: 1 – полуформы (матрицы); 2 – манжетная пробка; 3 – пустотелая тяга пробки; 4 – мундштук; 5 – обогреваемый дорн

1 уже находятся в сомкнутом состоянии. Сжатый воздух внутрь трубы подается через отверстие в дорне, а избыточное давление создается за счет установки внутри трубы манжетной пробки 2, закрепленной пустотелой тягой к дорну. Через отверстия этой тяги внутрь трубы подается сжатый воздух, под действием которого расплав раздувается и плотно прижимается к поверхности гофрированных полуформ, полностью копируя их конфигурацию и размеры.

Так как в гофрообразующем устройстве происходят и формирование гофров, и калибровка по наружному диаметру трубы, материал должен поступить в него в достаточно вязком состоянии. При низкой температуре расплава затрудняется процесс течения, а при высокой может произойти разрыв экструдата при раздувании. Поэтому температура задается в зависимости от марки полимера и его вязкоупругих свойств. Расплав должен подаваться внутрь гофратора, поэтому дорн и мундштук имеют удлиненную часть. Известные цилиндрические головки не могут подать в таком виде материал в гофрообразующее устройство, может произойти охлаждение, поэтому применяют специальные головки с электрообогревом внутри дорна. Наружный диаметр мундштука должен соответствовать диаметру сомкнутых гофрообразующих полуформ (матриц). По выходе вязкого материала из головки он немедленно попадает в замкнутый объем, образованный гофрообразующими матрицами, где под действием сжатого воздуха и формуется собственно гофрированная труба, происходит раздувание. Давление воздуха должно быть достаточным для раздувания расплава, чтобы полностью обеспечить заданный профиль и гладкость поверхности. При низком давлении поверхность трубы становится неровной, особенно при переработке кристаллических полимеров. При недостаточном прижатии расплава процесс кристаллизации происходит неравномерно, что приводит к появлению поверхностных дефектов. При очень высоком давлении может произойти разрыв расплава за счет большой скорости деформации растяжения.

Полуформы внутри гофратора охлаждаются за счет обдува холодным воздухом или орошаются водой. Если охлаждение трубы недостаточно, то она затем поступает в водяную ванну.

Конфигурация гофрированной поверхности в зависимости от назначения труб, может иметь различную форму. При изготовлении дренажных или канализационных труб полуматрицы имеют цилиндри-

дрическую форму, а для сборки теплообменных блоков градирни – шестигранную. Шестигранные трубы при сборке разбрызгивающих теплообменных блоков образуют более прочный сварной шов, и, следовательно, повышается прочность блоков. Гофрированные трубы, применяемые как дренажные системы для откачки грунтовой воды, в углублениях гофра имеют отверстия.

1.2.3. Технология производства пленки рукавным методом

Процесс изготовления пленки рукавным методом (раздувом) основан на непрерывном выдавливании расплава полимера через узкую кольцевую щель формующей головки с последующей вытяжкой рукава в продольном и поперечном направлениях и его охлаждением. При данном методе формования расплав выдавливается в виде тонкостенного цилиндра (рукава), который после раздувания, 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, способных создать высокое давление, необходимое для выдавливания (течения) расплава с большой скоростью через узкую кольцевую щель. В последнее время используют также пленочные агрегаты с отводом 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.

Технологическая схема и основные стадии процесса

Процесс производства пленки рукавным методом состоит из следующих технологических операций: 1) подготовка сырья; 2) плав-

ление гранул и гомогенизация расплава; 3) формирование пленочного рукава; 4) ориентация и охлаждение пленки; 5) намотка и упаковка пленки; 6) контроль качества пленки.

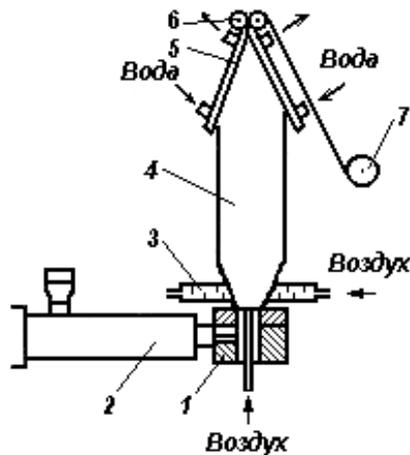


Рис. 1.24. Технологическая схема производства пленки рукавным методом: 1 – формующая головка; 2 – экструдер; 3 – кольцо; 4 – рукав; 5 – направляющие пластины; 6 – тянущие валки; 7 – приемное устройство

Технологическая схема процесса показана на рис. 1.24. Гранулы полимера загружаются в бункер экструдера 2. Загрузка обычно осуществляется с помощью пневмо- или вакуумного устройства, которым оборудуется бункер или транспортная тара для сырья. Для загрузки гранул, опудренных порошкообразным 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 обдувается струей воздуха из кольца 3. Охлаждаемый рукав складывается в виде сдвоенного полотна направляющими пластинами 5 и попадает в тянущие валки 6, один из которых для исключения утечки воздуха из рукава имеет эластичное покрытие. Пленка наматывается

на бобины с помощью приемного устройства 7.

Подготовка сырья, плавление гранул и гомогенизация расплава. Подготовительные операции включают сушку полимера, окрашивание и смешение гранул.

Основные физические закономерности, характеризующие процесс плавления гранул полимера и гомогенизацию расплава, подробно рассмотрены в подп. 1.1.1, 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 4 – 5. Общая длина шнека увеличивается до $30 D$ (D – диаметр шнека), а на

конце шнека устанавливают смесительные устройства. 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 не менее $8 - 10 D$, чтобы обеспечить высокое давление и выравнивание температуры расплава по сечению. Увеличение длины шнека также улучшает перемешивание расплава и повышает гомогенизацию. Температура выходящего расплава задается несколько выше, чем при производстве труб, так как течение расплава происходит через узкий формующий канал. Температура зависит от способа приема пленки, а также от марки полимера.

Частоту вращения шнека и его геометрические размеры выбирают в зависимости от ширины и толщины пленки и максимально допустимой скорости отвода пленки.

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 к выбору технологического режима работы экструдера и точности регулирования параметров при изготовлении пленок предъявляются более высокие требования, чем при производстве труб.

Формование рукава. Придание расплаву полимера конфигурации цилиндра (рукава) осуществляется в формующих кольцевых проточных или угловых головках.

Обязательные требования к головкам – отсутствие застойных зон, равномерное и одинаковое по длине каналов движение расплава, равномерный без пульсаций выход рукава с равной по периметру толщиной стенки. Конструкция головки должна обеспечивать необходимое гидравлическое сопротивление (давление до 20 – 30 МПа), а ее устройство – легкую установку и разборку. Материал рабочих поверхностей головки должен быть коррозионностойким.

Независимо от вида головки между нею и цилиндром обязательно устанавливаются фильтрующие элементы, которые служат для задерживания непроплавленных частиц, загрязнений и посторонних примесей. Применяются пробковые, шиберные, кассетные и иные системы фильтров. В современных экструзионных агрегатах управление фильтрами автоматизировано. В фильтре шиберного типа (рис. 1.25, а) замена пакета фильтрующих сеток 2 производится движением шибера 3 вручную или механическим приводом. В кассетном фильтре (рис. 1.25, б) используется перфорированная гильза 4 с сеткой 2. Подобная конструкция позволяет использовать один, два или три телескопически установленных цилиндра с сетками.

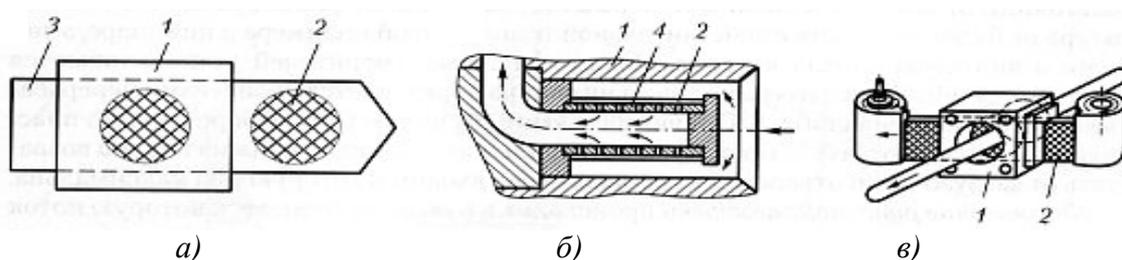


Рис. 1.25. Схемы устройства фильтров: а – шиберный; б – кассетный; в – с самоперемещающейся сеткой; 1 – корпус; 2 – сетка; 3 – шибер; 4 – перфорированная гильза

В зависимости от чистоты перерабатываемого материала время действия одного фильтра может составлять от 100 до 500 ч. Для увеличения ресурса фильтров используют устройство с непрерывно движущейся сетчатой лентой (рис. 1.25, в). Сигналом, указывающим на необходимость замены фильтра, является повышение давления расплава перед фильтром.

Фильтры специального назначения (для сверхтонких пленок) позволяют задерживать частицы размерами до 5 мкм.

Движение расплава в головке определяется ее конструкцией. Наибольшее распространение получили головки с центральным входом и винтовым распределительным каналом (рис. 1.26). Основными элементами таких головок являются корпус 1, дорн 2 с дорнодержателем 5, регулирующее кольцо (мундштук) 4 и фильтр-сетка 3. Расплав из материального цилиндра экструдера через фильтр 3 поступает в головку снизу по угловому цилиндрическому каналу, обтекает дорн, приобретая кольцевое сечение, а затем выдавливается через формирующий зазор между дорном и мундштуком. Протекая через отверстия в дорнодержателе, расплав рассекается на отдельные потоки, которые

затем слипаются. В местах соединения потоков образуются стыковые полосы, снижающие прочность пленки. Для ликвидации этого эффекта на дорне предусматривают спиральные распределительные каналы, турбулизирующие потоки расплава и гомогенизирующие его.

Повышению качества пленки (равнотолщинность, отсутствие сварочных полос) способствует применение головок с вращающимися элементами. Известны конструкции с поворотным относительно неподвижного дорна мундштуком и головки с вращающимся дорном. Угол поворота при осциллирующем вращении может составлять от 90 до 360°. Вращающиеся головки, как правило, применяют при производстве пленок шириной 5 м и более.

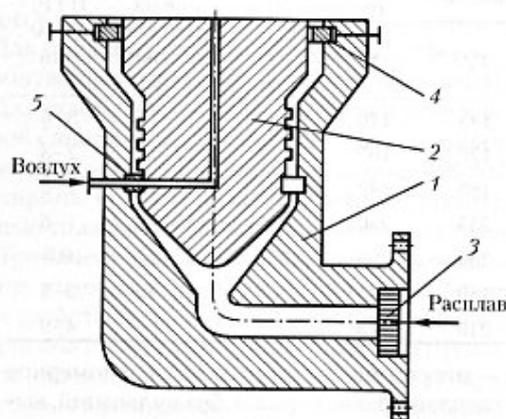


Рис. 1.26. Схема угловой рукавной головки с центральной подачей расплава (пояснения в тексте)

Температура головки оказывает существенное влияние на такие эксплуатационные свойства пленки, как мутность, выражаемую в процентах, и гляцевитость, оцениваемую в условных единицах. Чем больше перепад между температурой головки, равной температуре экструдированной рукавной заготовки, и температурой окружающего пространства, тем больше в полимере раздуваемого рукава содержится аморфной фазы и соответственно тем прозрачнее пленка.

Следовательно, уменьшение мутности при антибатном возрастании гляцевитости у пленок из кристаллизующегося полипропилена (ПП) вызвано повышением температуры головки.

Раздув заготовки и образование пузыря является важнейшей технологической операцией, формирующей физико-механические и эксплуатационные свойства изделия. Параметры этой операции – степень раздува заготовки, продольная вытяжка рукава и его конфигурация в зоне раздувания.

Степень раздува ϵ_p при прочих равных условиях также оказывает существенное влияние на равномерность пленки по толщине в поперечном направлении. Она определяется из соотношения

$$\varepsilon_p = \frac{D}{d_k} 100 \%, \quad (1.14)$$

где D – диаметр рукава, d_k – диаметр рукавной заготовки, равный диаметру кольцевой формующей щели (без учета высокоэластического разбухания потока экструдата).

Обычно ε не превышает 300 %, составляя 200 – 250 %. С увеличением степени раздува повышается прочность рукава в поперечном направлении и снижается в продольном.

Прочность в продольном направлении зависит от долевого вытяжки $\varepsilon_{\text{п}}$, которая определяется соотношением скоростей отвода рукава $V_{\text{отв}}$ и выдавливания $V_{\text{в}}$:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{V_{\text{отв}}}{V_{\text{в}}} 100 \%, \quad (1.15)$$

$$V_{\text{в}} = \frac{Q}{\rho_T \pi d_k \delta_k}, \quad (1.16)$$

где Q – производительность экструдера; ρ_T – плотность полимера при температуре выдавливания; d_k – диаметр формующего кольца; δ_k – ширина формующего зазора.

Для получения рукава, равнопрочного в продольном и поперечном направлении, должно соблюдаться соотношение $\varepsilon_p \approx \varepsilon_{\text{п}}$.

Конфигурация рукава в зоне раздувания зависит от давления воздуха в рукаве, скорости его отвода от головки и интенсивности охлаждения воздухом, поступающим из наружной охлаждающей системы. Выдавливаемый из головки прозрачный рукав на некотором расстоянии от нее мутнеет. Этот эффект наблюдается у кристаллизующихся термопластов. Условную линию, разделяющую прозрачную и непрозрачную части рукава, принято (в значительной мере условно) называть «линией кристаллизации», выше которой дальнейший раздув рукава не происходит, и он, рукав (пузырь), сохраняет свою цилиндрическую форму с достигнутым диаметром D . Таким образом, рукав на участке длиной H (рис. 1.27) переходит из состояния вязкого расплава в состояние квазитвердое, и на «линии кристаллизации» температура полимера равна температуре размягчения или близка к

ней. Из этого следует вывод, что в процессе раздува и охлаждения рукавной заготовки полимер на участке H испытывает как необратимые пластические деформации, так и обратимые, медленно развивающиеся высокоэластические. При быстром охлаждении и медленном отводе рукава его раздув происходит за счет преобладания пластической составляющей

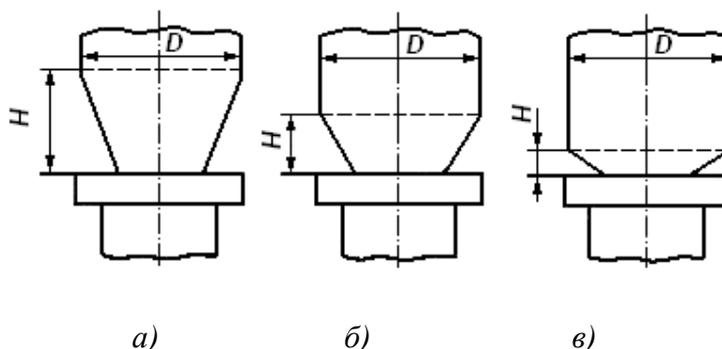


Рис. 1.27. Конфигурация рукава в зоне раздувания: а – вытянутая; б – нормальная; в – сильно раздутая

(рис. 1.27, в), при медленном охлаждении раздуваемой заготовки в рукаве преобладают обратимые высокоэластические деформации и «линия кристаллизации» удалена от головки на наибольшее расстояние (рис. 1.27, а). При согласованных параметрах раздува, скорости отвода и темпа охлаждения рукав принимает «нормальную» конфигурацию: $H \approx (0,3 - 0,4) D$ (рис. 1.27, б).

Из приведенных соображений следует, что во всех раздувных рукавных пленках в той или иной степени наличествуют высокоэластические деформации, размораживаемые при нагревании выше температуры размягчения и вызывающие эффект термоусадки, проявление которого зависит, в частности, от режимов формирования рукава.

Высота «линии кристаллизации» влияет также на мутность пленки, ее глянецвитость и светопропускание.

Охлаждение принимаемого вверх пузыря и его складывание в двухслойное полотно происходит в не слишком благоприятных условиях. Дело в том, что поднимающееся также вверх тепло от остывающего рукава затрудняет его охлаждение и переход полимера в твердое состояние. Для предотвращения слипания пленки в двухслойном полотне в зазоре между тянущими валками отводящего устройства она должна быть охлаждена на $25 - 30$ °С ниже температуры размягчения перерабатываемого полимера.

Для отвода тепла от рукава используют воздушные, водяные и смешанные системы охлаждения. Воздушное охлаждение применяет-

ся для производства пленки с шириной полотна до 6000 мм. Воздух из охлаждающего кольца через дюзы направляется навстречу движению рукава. Заслонки в дюзах позволяют регулировать темп охлаждения рукава воздухом по его периметру и предотвращать как образование боковых пузырей на рукаве, так и отклонение его сечения от кругового. В отдельных конструкциях охлаждающих колец имеются устройства, направляющие воздушный поток вдоль по поверхности раздуваемого рукава.

Весьма эффективны системы с внешним и внутренним охлаждением рукава, особенно система внутреннего охлаждения, в которой реализуется полный обмен воздуха, находящегося внутри рукава. В этом случае воздух от вентилятора подается в раздуваемый рукав традиционно – через отверстие в дорне, а отводится через выступающую также из дорна трубку, высота которой может достигать половины высоты раздутого пузыря.

Для предотвращения самопроизвольных колебательных движений пузыря в касательном направлении применяют стабилизаторы различной конструкции, в том числе и охлаждающие в виде бандажей, концентричных геометрической оси формующего зазора головки.

Конструкция складывающих щек должна обеспечивать теплоотвод с поверхности рукава и минимальную силу трения при скольжении складываемой в полотно пленки. Щеки с деревянными поперечными планками и роликами, иногда охлаждаемыми, используют при производстве пленок шириной более 1 м, в некоторых случаях применяют перфорированные алюминиевые листы.

Тянущее (отводящее) устройство состоит из пары валков – приводного и прижимного. Первый вращается от электромеханического привода с бесступенчатым регулированием надежно контролируемой частоты оборотов. Для прижима используют пружинные или пневматические устройства. Движение тянущих валков определяет скорость откола пленочного рукава от головки экструдера, от чего зависят продольные вытяжка и ориентация пленки.

В зависимости от вида выпускаемой продукции сложенное двухслойное полотно после тянущих валков поступает либо на обрезку кромок и перемотку в виде двух рулонов, либо на обрезку одного края, либо просто сматывается в бобины. В специальных агрегатах

для выпуска пакетов, мешков и прочего пленка сматывается с бобины и попадает на узел сварки и обрезки, откуда выходят уже готовые изделия.

Перспективным является применение фильтров, рабочие элементы которых представляют собой пластины или диски (шайбы), выполненные из металлокерамических материалов. Такие "ситы" обладают большой рабочей поверхностью и длительным сроком службы.

В зависимости от чистоты исходного полимера и необходимого сопротивления можно использовать металлокерамические элементы с различной пористостью, а также соответствующее число фильтрующих дисков (шайб).

Ориентация и охлаждение пленки. При одностороннем охлаждении рукава получается структура неоднородная по толщине пленки, так как кристаллизация протекает в различных условиях. Чтобы этого не происходило и для ускорения охлаждения, применяют двухсторонний обдув рукава или охлаждают воздух, находящийся внутри рукава. Рукав обдувается снаружи через кольцо 2, а внутри охлаждается воздухом, который циркулирует через теплообменник. Через дорн головки 3 вводят две трубки, в одну из них подается холодный воздух, а через вторую он отводится в охлаждающее устройство (рис. 1.28). Для улучшения теплообмена внутренний обдув можно осуществлять через распределительные кольца или специальную решетку, которые устанавливают над дорном головки 3 внутри рукава (на рис. 1.28 не показаны).

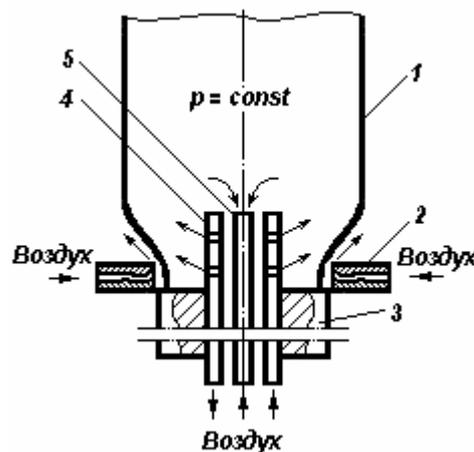


Рис. 1.28. Схема двухстороннего охлаждения при циркуляции воздуха внутри рукава: 1 – рукав пленки; 2 – обдувочное кольцо; 3 – головка; 4 – перфорированная трубка подачи холодного воздуха; 5 – трубка для отвода воздуха

Сложность данного метода заключается в том, что необходимо обеспечить постоянство давления внутри рукава.

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. Поэтому все рассмотренные устройства во время запуска агрегата в работу должны убираться внутрь дорна специальным механизмом.

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 калибровке труб. Вначале пленка обдувается воздушной струей, а затем рукав раздувается и прижимается к охлаждаемой металлической гильзе или охлаждаемым трубкам, расположенным вокруг рукава. 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. 1.24).

Можно использовать для охлаждения рукава жидкостную пленку. Обычно для этого применяют воду, которая вытекает из специального кольца тонким слоем. 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.

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. 1.24). При складывании пленки пластинами на рукаве могут образоваться складки, так как длина образующей на фронтальной l_{ϕ} и профильной l_{π} ее проекциях различна. Для исключения образования складок направляющие обычно изготавливают двояковыпуклыми в направлении к рукаву, при этом дуга подбирается таким образом, чтобы $l_{\pi}' = l_{\phi}$. Для исключения трения и образования

статического электричества направляющие пластины обтягивают ворсистой тканью или применяют воздушную подушку. В тех случаях когда применяют охлаждение направляющих пластин водой, поверхность их должна быть покрыта материалом, уменьшающим трение и с хорошей теплопроводностью.

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 сваривания пленки можно использовать повторное раздувание рукава после тянущих валков. Перед намоткой пленки в рулоны она 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. Для уменьшения трения пленки в валках имеются отверстия, через которые нагнетается воздух.

Готовая пленка наматывается в виде рулонов на специальные трубчатые оправки (бобины), изготовленные из бумаги или пластмассы. При намотке необходимо обеспечить определенное усилие натяжения и исключить складки, которые образуются обычно из-за разнотолщинности пленки. При наматывании на бобину в месте утолщения пленки получается валик и плоскостность намотки нарушается. Для предотвращения образования складок нужно постепенно утолщенное место перераспределять по ширине бобины, что достигается вращением формирующей головки вместе с рукавом вокруг подводящего патрубка, вращением приемного устройства или 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 пленки наклонными 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 вклю-

чений, 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 нормативными документами.

Термоусадочная пленка

К производству термоусадочной пленки проявляется все возрастающий интерес, связанный с расширением области ее применения. Если в первое время подобные пленки использовались в качестве упаковочного материала, то в настоящее время эффект термоусадочности применяется в электротехнических устройствах, трубопроводной технологии, транспортном машиностроении для создания эффективных герметизирующих, изолирующих и иных защитных соединений. Известны примеры использования подобных изделий в медицине.

Эффект, как уже рассматривалось выше, состоит в формировании изделия в таких температурных условиях и, следовательно, в таком физическом состоянии полимера, когда в нем «замораживается» несвойственная ему и соответственно являющаяся временной, условно говоря, вынужденная надмолекулярная организация. Например, в кристаллическом полимере, для которого в равновесном состоянии характерна пачечно-фибрилярная физическая организация, сформирована и «заморожена» структура макроцепей с вытянутыми сегментами при сохранении ими, цепями, неизменными положений их концов.

Подобная несвойственная данному полимеру физическая структура преобразуется в структуру кристаллическую, например в пачечную или пачечно-фибрилярную; как только изменяются внешние условия, «замороженность» прекратится, а макромолекулярная или сегментальная подвижность восстановится. Нагрев таких изделий до температуры «размораживания» приводит к их геометрическому изменению, называемому термоусадкой.

Вытягивание фрагментов макромолекул по вектору деформирования, т. е. их ориентация, сопровождается повышением прочности полимера в направлении вектора ориентации. Для пленок эта ориентация может достигаться в продольном, осевом, или в радиальном,

поперечном, направлении, или одновременно в продольном и поперечном направлениях, как это происходит с пленками, получаемыми по описанной ранее технологии раздува с одновременным отводом рукава.

Варьируя температуру, при которой в полимере развиваются ориентационные процессы, можно получать пленки ориентированные, но практически не термоусаживаемые. Чем ближе температура процесса ориентации к температуре плавления полимера, тем меньше эффект термоусадочности.

Практический опыт специалистов НПО «Арсенал Индустрии» и теоретическое обоснование, выполненное учеными НПО «Пластполимер», показали, что при степени раздува рукава $i_p = 3,5 - 4,3$ термоусадка в окружном направлении равна усадке в осевом направлении.

С возрастанием степени раздува значения продольной и поперечной термоусадки сближаются. Из рабочих параметров на процесс продольной и поперечной вытяжки и соответственно термоусадки влияют зазор формующей щели, температура переработки и толщина пленки.

Увеличение зазора формующей щели вызывает увеличение степени вытяжки и тем самым степени продольной усадки. При этом уменьшается ориентация макромолекулярных цепей в самом канале формующего инструмента, что приводит к незначительному снижению продольной усадки и увеличению усадки в поперечном направлении.

Повышение температуры переработки приводит к снижению показателей усадки в обоих направлениях. Это связано с увеличением подвижности макромолекул полимера, и, как следствие, уменьшением времени релаксации (перестройки структуры ориентированной пленки). Ориентированные макромолекулярные цепи или их фрагменты успевают принять свою исходную структуру до того, как температура пленки станет ниже температуры размягчения T_p полимера.

Толщина пленки на степень вытяжки влияет отрицательно. Поэтому степень вытяжки с увеличением толщины падает (при прочих равных условиях), как следствие, уменьшается и продольная усадка.

Форма раздуваемого рукава также оказывает существенное влияние на термоусадку, причем в большей степени на ее поперечную составляющую. Возможны две крайние формы рукава (рис. 1.29) –

плавная и грибовидная. Последняя является предпочтительной, так как позволяет разделить процессы продольной и поперечной вытяжки, а значит, позволяет их регулировать.

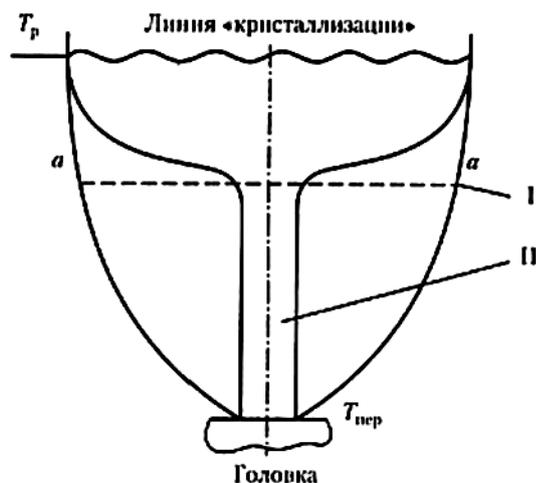


Рис. 1.29. Схема двух крайних форм рукава: I – плавное расширение; II – грибовидное расширение

До линии *a-a* осуществляется продольное ориентирование макромолекулярной организации, выше – ориентирование поперечное.

Соотношение длин «ножки» и «шляпки» (авторы решились допустить такое наглядное сравнение) регулируется скоростью отвода рукава, высотой линии кристаллизации, количеством и направлением потоков охлаждающего воздуха, и, наконец, вращением конструктивных фрагментов формирующей головки.

Значение термоусадки, т. е. процесса, обратного раздувке, зависит от температуры процесса. Установлено, что для полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) термоусадка происходит в узком интервале температур (106 – 121 °С), при этом раздув полностью компенсируется (усадка 100 %) при температуре 117 °С. Если необходимо получить минимальную силу усадки, то процесс ведут в нижней части температурного диапазона; при необходимости максимальной величины усадки — в средней.

Для изготовления термоусадочной пленки из полиэтилена используют следующие марки ПЭНП: 15313-003; 17501-006 и 15813-020. Две первые марки предпочтительнее, поскольку их более низкий показатель текучести расплава (ПТР) (0,3 и 0,6 г/10 мин) свидетельствует о большем значении средней молекулярной массы полимера и, следовательно, возможности достижения большей степени вытяжки и ориентации.

Дефекты экструдированных пленок

При получении рукавных пленок могут возникать отклонения от технологического режима, приводящие к проявлению у изделия различных дефектов. Самые общие разновидности дефектов, наиболее

вероятные причины их возникновения и рекомендуемые действия по устранению, основанные на практическом опыте предприятий-производителей, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Дефекты экструдированных пленок,
причины их возникновения и способы устранения

Дефект	Причины возникновения	Способы устранения
Наличие «геликов» в пленке	Полидисперсность; непроплавившиеся частицы из отходов; частичное разложение материала; плохая гомогенизация массы	Понизить температуру экструзии, сменить марку полимера; прекратить добавление отходов в экструдер; понизить температуру экструзии, следить за тем, чтобы перед пуском экструдер и головка были тщательно очищены от полимера; повысить давление в головке
Полосы на пленке	Разложение полимера; грязная головка	Снизить температуру экструзии, сменить марку полимера; почистить головку
Асимметричность раздуваемого рукава	Плохая регулировка головки	Отрегулировать размер формирующего отверстия по периметру и температуру по зонам головки
Нестабильность раздутого рукава (непостоянство диаметра, ширины или толщины)	Пульсация расплава; неравномерность подачи воздуха в рукав; движение окружающего воздуха	Уменьшить скорость экструзии или повысить давление в головке; отрегулировать подачу воздуха и устранить обнаруженную утечку; по возможности капсулировать рукав, не допускать в помещении сквозняков, хождений и пр.
Складкообразование при намотке	Неправильная установка агрегата; разнотолщинность пленки	Проверить, нет ли перекоса у намоточных валков, головки, складывающего устройства; добиться правильной установки оборудования; устранить неравномерность охлаждения пленки путем капсулирования и т.п.

Дефект	Причины возникновения	Способы устранения
Поперечные морщины на пленке	Появление внутренних напряжений при низкой температуре охлаждающего вала и слишком низкой линии кристаллизации	Повысить температуру охлаждающего вала, следить за линией кристаллизации
Плохие оптические свойства	Образование крупнокристаллической структуры	Сменить марку полимера, повысить температуру экструзии; в случае плоской пленки уменьшить расстояние между головкой и охлаждающим валком; при производстве рукавной – повысить степень вытяжки или уменьшить расстояние до линии кристаллизации

1.2.4. Технология производства пленки щелевым методом

Процесс изготовления пленки основан на выдавливании расплава через плоскую щель формирующей 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 формирующей головки. Для охлаждения полотна применяются валки или жидкость. Благодаря плоской конфигурации расплав сразу же после выхода из головки быстро охлаждается, что обеспечивает получение прозрачных пленок за счет уменьшения кристалличности и увеличивает производительность, 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 расплав поступает на охлаждающий барабан и при быстром охлаждении исключается самопроизвольная вытяжка экструдата. Этим способом можно легко нанести пленку на различные подложки. Недостатками метода являются невозможность изготовления пленок большой ширины, образуются сравнительно высокие отходы, так как проводится обрезка утолщенных краев полотна, а также то, что ширину полотна можно изменять только за счет смены формирующей 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.

Расплав из экструдера 1 выдавливается через формующую головку 2 и поступает на охлаждающие валки 3, где подвергается двухстороннему охлаждению (рис. 1.30). Затем у пленки устройством 4 обрезаются утолщенные кромки, после чего она протягивается тянущими валками 7 и 10 и поступает в намоточное 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 7 и 8, а также инфракрасным нагревателем 9. Для поперечной ориентации между намоточным устройством 11 и тянущими валками 10 дополнительно устанавливается клуппное растягивающее устройство, показанное на рис. 1.33. Для контроля толщины пленки по ширине установлен толщиномер 6.

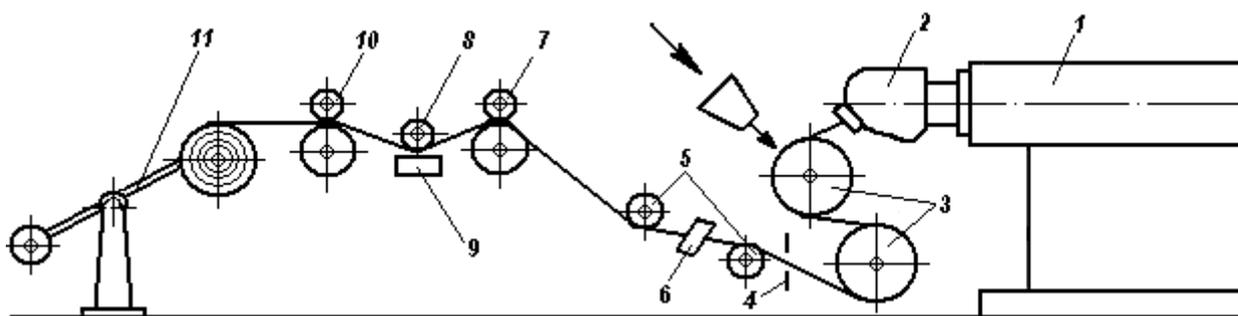


Рис.1.30. Технологическая схема производства пленки щелевым методом с охлаждением на валке: 1 — экструдер; 2 — формующая головка; 3 — охлаждающие валки; 4 — устройство для обрезки кромок; 5 — направляющий валок; 6 — толщиномер; 7, 10 — тянущие валки; 8 — нагревательный валок; 9 — инфракрасный нагреватель; 11 — намоточное устройство

Особенности подготовки 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 до-

стигаются путем выбора определенного режима работы экструдера: температуры нагревания 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.

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 максимальная температура нагревания расплава ограничивается термостойкостью полимера.

Формование полотна

Процесс формования пленки (полотна) осуществляется с использованием плоскощелевых головок. Расплав на выходе из головки проходит между двумя пластинами (формующими губками), где приобретает необходимую конфигурацию, т.е. определенную толщину и ширину полотна. Поскольку расплав течет через узкую щель, для предотвращения разнотолщинности пленки необходимо обеспечивать равномерный зазор между губками по ширине головки. По ширине головки не должно быть больших перепадов температуры расплава, так как в противном случае появляются элементарные струи с различной вязкостью, что может послужить причиной неоднородности свойств пленки и появления ее разнотолщинности по ширине.

Формование пленок наиболее часто осуществляется в коллекторных головках, когда расплав из патрубка экструдера растекается по коллектору (каналу, расположенному по ширине), а из него перетекает в плоский формующий зазор (рис. 1.31). Поскольку при течении расплава в коллекторе возникает перепад давления, выход расплава по ширине щели может быть неравномерным. Если проанали-

зировать траектории отдельных струй течения расплава (см. рис. 1.31), 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 разности перепада давления расход расплава по ширине будет различным и это приведет к появлению разнотолщинности. Для выравнивания потока применяют различные устройства. Наиболее часто используют регулировочные вкладыши (см. рис. 1.31). Расплав из патрубка попадает в коллектор 9, а затем течет через плоский канал, образованный плитами 1 и 7 к формирующему каналу.

В верхней плите 1 имеются гнезда, в которые вставляются вкладыши 2, плотно прилегающие друг к другу по ширине головки. Чтобы выровнять поток, центральные вкладыши винтами 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 расплава по ширине выравнивается. Чтобы в кольцевой щели не образовались застойные зоны, вкладыши делают обтекаемой формы. Торцовые части коллектора обычно закрывают вставками 8, которые плавно поворачивают поток расплава вдоль головки и также исключают образование застойных зон. Для регулирования толщины пленки имеется подвижная губка 6, при смещении которой относительно корпуса изменяется зазор щели и соответственно толщина пленки.

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 экс-

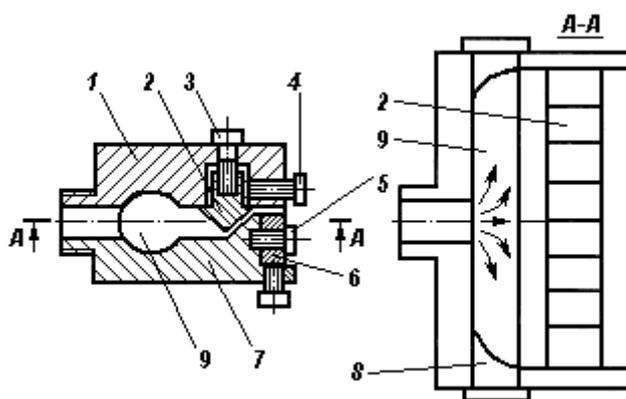


Рис. 1.31. Выравнивание потока расплава в коллекторной головке регулировочными вкладышами; 1 — верхняя плита; 2 — вкладыши; 3-5 — винты; 6 — подвижная губка; 7 — нижняя плита; 8 — вставка; 9 — коллектор

трузии 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, как правило, не обладает изотропными свойствами. Кроме этого при переработке линейных и разветвленных полимеров изменяется характер образования кристаллических структур, и прочность пленок в продольном и поперечном направлениях изменяется от направления ориентации макромолекул неоднозначно. При изготовлении тонких пленок перед их охлаждением, как правило, проводят значительную вытяжку расплава, поэтому чтобы уменьшить ориентацию макромолекул и снизить анизотропию свойства 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. И, наоборот, при изготовлении пленок с большими анизотропными свойствами производят быстрое охлаждение расплава после выхода из головки и последующее его растяжение.

Охлаждение пленки

Охлаждение расплава осуществляется на валках 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 или стеклования, или кристаллизации. При резком охлаждении расплава возможно коробление пленки, особенно для кристаллизующихся полимеров. Чтобы исключить это, в момент начала охла-

ждения предусматривают прижим пленки к валку, например, струей сжатого воздуха или созданием электростатического заряда за счет электрода, располагаемого над пленкой в месте соприкосновения ее с охлаждающим барабаном. При охлаждении пленки без прижима между валками и пленкой попадает воздух и она из-за неравномерного охлаждения становится некачественной – появляются пятнистость и коробление.

Для прижима можно использовать также подпружиненный валок (рис. 1.32). В данном случае валок 3 выполняет роль гладильно-калибровочного приспособления, поскольку он оказывает влияние на шероховатость поверхности и уменьшает разнотолщинность. Однако при значительном колебании толщины пленки по ширине на входе в валки могут появиться наплывы.

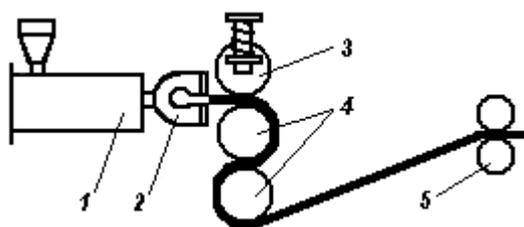


Рис. 1.32. Охлаждение пленки между двумя валками: 1 – экструдер; 2 – головка; 3 – прижимной валок; 4 – охлаждающие валки; 5 – тянущие валки

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 валка, расстояние его от головки и чистота обработки его поверхности. Обычно рабочую поверхность валка полируют с обеспечением 12-го класса чистоты. От температуры валка зависят главным образом скорость охлаждения полимера и степень кристалличности. Чем ниже температура валка, 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 валка. При переработке кристаллизующихся полимеров с понижением температуры валка уменьшаются степень кристалличности и светорассеивание, поэтому пленка становится более прозрачной. Однако с повышением температуры охлаждающей поверхности возрастает прочность при растяжении, а относительное удлинение пленки

уменьшается, так как повышается степень кристалличности полимера. Однако при очень высоких температурах наблюдается прилипание пленки к охлаждающему валку и процесс ее изготовления нарушается.

При увеличении расстояния от головки до зоны охлаждения уменьшается скорость вытяжки расплава, поэтому уменьшается степень ориентации. Кроме этого при большом расстоянии до охлаждающей поверхности полнее проходит процесс релаксации и степень ориентации еще больше понижается. При уменьшении расстояния от формирующих губок до охлаждающего валка 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 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 силы трения.

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. 1.30), установленных на некотором расстоянии друг от друга. Перед вытяжкой пленка нагревается выше температуры стеклования и 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, выше T_c и ниже $T_{пл}$, а также при определенной скорости деформации и коэффициенте (степени) вытяжки. (Под коэффициентом вытяжки понимают отношение окружных скоростей валков: $K_v = v_2 / v_1$). На начальной стадии ориентации начинают вытягиваться проходные участки макромолекул, расположенные в аморфных (дефектных) 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, и 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, так как в нагретом состоянии одновременно происходит процесс дезориентации, и подвижные участки макромолекул переходят в неориентированное состояние. При ориентации аморфных полимеров в начальный момент вытяжки происходит растяжение дефектных участков макромолекул, а затем деформация кристаллитов.

Одной из стадий получения одноосно ориентированных пленок в ряде случаев является термообработка полимера. Для усовершенствования структуры кристаллов ориентированных пленок производится отжиг, который сопровождается ростом больших периодов кристаллических областей и усадкой пленки, происходящей вследствие релаксации проходных, дефектных участков цепей. Если отжиг проводится при температуре 80 °С, то дезориентация кристаллических участков практически отсутствует, однако повышение температуры отжига приводит к небольшой дезориентации.

Качественные показатели пленки из полиэтилена высокой плотности также зависят от степени ориентации и могут быть функционально выражены через коэффициент вытяжки. Высокая степень ориентации полиэтилена при 60 °С достигается при коэффициенте вытяжки $K_v > 5$. Прочность и относительное удлинение изменяются пропорционально в зависимости от коэффициента вытяжки. Влияние температуры ориентации на прочность пленки неоднозначно. Эта зависимость имеет максимум при определенном интервале температур, а при отклонении от этого значения прочность падает.

При двухсторонней ориентации после продольной вытяжки, происходит последующее растяжение пленки в поперечном направлении.

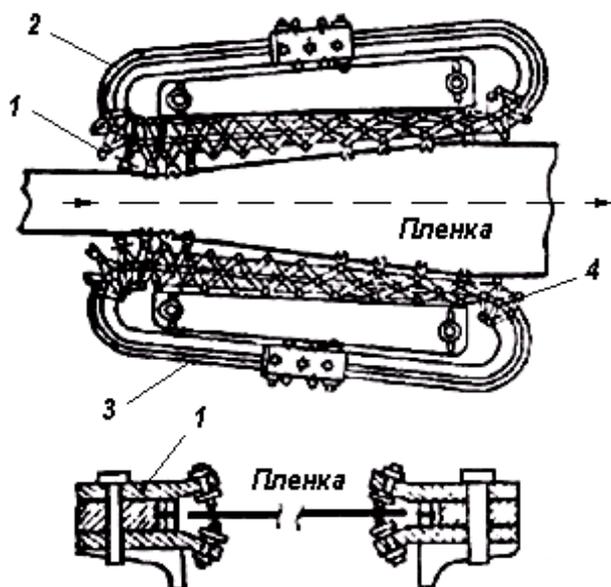


Рис. 1.33. Конструкция машины поперечного растяжения пленок: 1 – захваты (круппы); 2, 3 – направляющая рама; 4 – направляющие ролики

Основное требование к параметрам процесса ориентации – это минимальное колебание температуры нагревания пленки по длине и ширине. Неравномерный обогрев ведет к разнотолщинности. Предварительный подогрев и нагрев в зонах растяжения осуществляется обдувом горячим воздухом через сложную систему сопел. Система должна обеспечивать колебания температур на всей поверхности зоны не более $\pm 1^\circ$ (лучше $0,5^\circ$). Зоны должны быть изолированы одна от другой, так как в них поддерживаются

различные температуры. Нагретая пленка захватывается за края специальными захватами-круппами, которые закреплены на двух бесконечных движущихся цепях с индивидуальным приводом, и передвигаются по профильным направляющим (рис. 1.33).

После поперечной ориентации отдельные участки макромолекул и домены разворачиваются и располагаются равновероятно во всех направлениях, поэтому анизотропия свойств пленки практически исчезает. Такие пленки обладают пониженной усадкой.

Пленки из кристаллических полимеров после процесса ориентации проходят термофиксацию. В этом случае пленка быстро нагревается на дополнительных валках до температуры несколько ниже температуры кристаллизации. Так, например, термофиксация пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) производится при температуре 210 – 240 °С в течение 5 – 20 с. Перенапряженные участки макромолекул за счет нагревания ослабляются, и изменяется их конформация. За счет этого пленки достаточно хорошо выдерживают растягивающие напряжения, так как остаточные напряжения в полимере ликвидируются. Термофиксация должна производиться в растянутом состоянии, т.е. на валках или в зажимах.

Намотка пленки. 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 ее разнотолщинностью. 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 нормативными документами.

1.2.5. Технологические процессы изготовления многослойных пленок

Основная область применения комбинированных пленочных материалов, полученных соэкструзией, – упаковка различных веществ, в первую очередь пищевых продуктов. Одно из наиболее перспективных направлений использования многослойных пленок – получение также бикомпонентных пленочных нитей и волокон. Основными изделиями, получаемыми в процессе соэкструзии, являются

многослойные пленки и листы, в том числе комбинированные материалы, изготовленные нанесением соэкструдированной пленки на различные подложки. Разработана также технология получения соэкструзией многослойных емкостей, труб, профильных и других погонажных изделий. Процесс соэкструзии предполагает три основных способа совмещения слоев полимеров: до экструзионной головки, в самой головке и после выхода из нее. Наибольшими экономическими преимуществами обладает способ получения бикомпонентных материалов по методу, когда два экструдера подают расплавы в одну головку. В этом случае происходит качественная сварка двух слоев и обеспечивается высокая адгезионная прочность соединения.

Особенно важное значение метод соэкструзии приобретает для производства полимеров, соединение которых в силу неполярности макромолекул является сложной задачей. Возможность исключить применение клеев (адгезивов) обеспечило полиолефинам ведущую роль в качестве сырья для соэкструзии. В настоящее время многослойные пленки изготавливаются из полиэтилена, полипропилена, полиамида и их сополимеров.

Одним из слоев комбинированной пленки, как правило, является полиэтилен (ПЭ). В зависимости от назначения и требуемого комплекса свойств применяют марки полиэтилена с различной плотностью и молекулярной массой (показателем текучести) или полипропилена, отличающиеся по изотактичности и молекулярной массе. Исследования показали, что при получении трехслойного материала из полимеров наиболее однородный, практически не расслаивающийся материал можно изготовить при использовании ПЭНП с показателем текучести 12 г/10 мин.

Из сополимеров рекомендуют применять сополимеры этилена с винилацетатом, улучшающие способность к сварке и повышающие эластичность комбинированного материала, этилена с акриловой кислотой, обеспечивающие хорошую адгезию соэкструдированной пленки к субстратам (алюминиевой фольге, целлофану, бумаге, картону), этилена с этилакрилатом, повышающие жиростойкость, прочность и адгезию к виниловым полимерам, а также этилена с изобутилакрилатом, обладающие хорошими защитными свойствами и адгезией к ПП. Применяются также сополимеры этилена с непредельными моно- и дикарбоновыми кислотами, содержащие ионы металлов I и II групп

(иономеры). Последние придают многослойным пленкам высокую прочность, способность к глубокой вытяжке при термоформовании, стойкость к истиранию, маслостойкость и восприимчивость к печати.

При соэкструзии однородных материалов не надо принимать дополнительные меры для увеличения адгезии между слоями. Если возникает необходимость в совмещении полимеров различной природы (например, ПЭ с ПВХ или ПА), то часто вводят третий промежуточный слой (обычно сополимер с функциональными группами), который обладает хорошей адгезией к обеим соединяемым пленкам. Другие приемы увеличения адгезии между слоями заключаются в активировании их поверхности за счет повышения температуры экструзии одного или обоих полимеров, в подаче между соединяемыми пленками газообразного окислителя и т.д. Но все эти методы существенно усложняют оборудование и технологический процесс, а также увеличивают стоимость продукта. Поэтому по возможности их следует избегать.

Соэкструзия представляет собой частный случай получения изделий из многокомпонентных полимерных материалов. В рассматриваемых ниже процессах речь везде будет идти о конструкциях изделий с одной границей раздела между полимерами. Однако возможны и многокомпонентные системы в виде полимерных смесей. Особый интерес среди таких систем могут представлять полимерные композиции, в которых один из компонентов образует при экструзии бесконечно длинные волокна, армирующие матрицу второго компонента.

Независимо от технологической схемы, вида получаемых изделий (листы, плоские, рукавные пленки и др.) и сочетания полимеров при соэкструзии в формующем канале головки происходит ламинарное течение расплавов, так что отдельные слои не перемешиваются. По технологии и применяемому оборудованию такие операции процесса, как приемка (вытяжка) экструзионных заготовок, охлаждение материала, обрезание кромок, намотка и дальнейшая обработка, аналогичны операциям при получении однослойных пленок. Отличия состоят лишь в конструкциях экструзионных головок и приборах для измерения и регулировки толщины готовых пленок и отдельных их слоев.

Общая технологическая рекомендация по соэкструзии пленок с высокой адгезией между слоями состоит в том, чтобы температура всех потоков была выше температуры плавления наиболее "тугоплав-

кого" компонента. Это предотвращает образование тонкой затвердевшей пленки между слоями. Условия переработки должны кроме этого по возможности обеспечивать потоки в головке, близкие по вязкости.

Вязкость расплавов можно регулировать, варьируя температуру, однако при этом необходимо соблюдать следующие правила: нельзя допускать, чтобы температура расплава одного полимера превышала температуру деструкции другого; температуры расплавов на выходе из экструдеров не должны различаться между собой более чем на 10 – 15 °С, чтобы в адаптере и головке не возникало больших градиентов температур во избежание значительной неравномерности внутренних напряжений по слоям получаемого продукта. По этим соображениям на практике часто все расплавы экструдировать при одинаковой температуре.

Адгезионная прочность слоев увеличивается с повышением температуры и времени ее воздействия, что объясняется увеличением скорости физико-химического взаимодействия (диффузии сегментов и образованием межмолекулярных зацеплений) между полимерами на границе соприкосновения при возрастании общей температуры расплава. Взаимодействие в основном обусловлено диффузией сегментов и образованием межмолекулярных зацеплений. Аналогичное влияние оказывает уменьшение скорости экструзии. Замедление отвода пленки увеличивает продолжительность контакта компонентов и способствует повышению адгезии между ними. Например, при экструзии двухслойных плоских пленок из ПЭ – ПВХ со скоростью 2 м/мин адгезия может достигать 800 Па·м, 3 м/мин – 500 Па·м, а при 4 м/мин она снижается до 250 Па·м. Снижение производительности способствует повышению качества пленок, но отрицательно сказывается на себестоимости продукта. Улучшается адгезия слоев при повышении давления в головке. При технологической наладке установок необходимо в первую очередь располагать зависимостями производительности каждого экструдера (по данному полимеру) от частоты вращения шнека. Затем определяются ширина, толщина и скорость отвода пленки и далее рассчитывается необходимая производительность всех экструдеров.

Заданная толщина слоев пленки обеспечивается производительностью экструзионных агрегатов Q_1 и Q_2 , подающих расплав в формующий канал головки. В зависимости от вязкости расплава и толщины отдельных слоев при течении в формующем канале устанавливается про-

филь скорости. Поскольку течение расплава ламинарное, то линия раздела довольно устойчивая и линейная. Это доказано при наблюдении за процессом течения в поляризованных лучах.

Созэкструзия пленок, изготовленных плоскощелевым методом, может осуществляться по следующим основным схемам.

Одновременная экструзия слоев из двух экструдеров через две плоскощелевые головки используется чаще всего для получения пленок и листовых материалов с целью их дальнейшей переработки термоформованием. Схема установки типа «два экструдера – две головки», показанная на рис. 1.34, предполагает соединение материалов после выхода из головок.

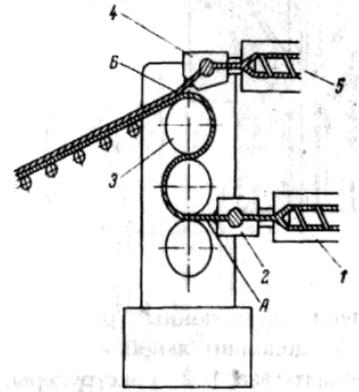


Рис. 1.34. Созэкструзия двухслойного листового материала по схеме «два экструдера – две головки»: 1, 5 – соответственно основной и дополнительный экструдеры; 2, 4 – плоскощелевые головки; 3 – приемное валковое устройство

Созэкструзия с использованием нескольких экструдеров и одного распределительного блока (адаптера) схематически показана на рис. 1.35. Несколько потоков материала из разных экструдеров одновременно поступают в адаптер, в котором происходит окончательное распределение слоев по ширине головки, после чего материал подается в плоскощелевую головку. Наличие питательного блока требует применения полимеров, сравнительно близких по эффективной вязкости, тем не менее по этой схеме можно получать самые разнообразные пленки с числом слоев от 2 до 100, включая слои из недостаточно термостабильных материалов.

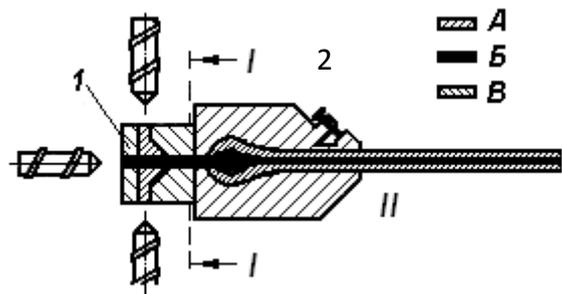


Рис. 1.35. Созэкструзия трехслойного пленочного полотна с использованием блока питания адаптера (1) и одной формующей головки (2)

1.2.6. Основные тенденции развития экструзионных методов

Развитие экструзионных методов идет в последнее время по трем направлениям:

1. Совершенствование оборудования и оснастки.
 2. Разработка новых композиций с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами.
 3. Совершенствование методов контроля и управления.
- Подробно каждое направление рассматривается в специальной и периодической литературе.

1.3. Материал для самоконтроля

Тест 1

1. Основные параметры шнека:

- а) диаметр, длина, угол наклона нарезки шнека;
- б) диаметр, отношение длины к диаметру, степень сжатия;
- в) степень сжатия, диаметр, угол наклона нарезки шнека;
- г) диаметр, длина, степень сжатия;
- д) степень сжатия, угол наклона нарезки, диаметр.

2. Движение материала в зоне загрузки обусловлено разностью крутящих моментов от действия сил трения на поверхности шнека и цилиндра. Эта разность обеспечивается:

- а) нагревом шнека и охлаждением цилиндра;
- б) нагревом цилиндра и охлаждением шнека;
- в) более высокой чистотой обработки поверхности цилиндра, чем шнека;
- г) более высокой чистотой обработки поверхности шнека, чем цилиндра;
- д) нагревом цилиндра и охлаждением шнека и более высокой чистотой обработки поверхности шнека, чем цилиндра;
- е) нагревом цилиндра и охлаждением шнека и более высокой чистотой обработки поверхности цилиндра, чем шнека.

3. Движение материала в зоне загрузки обусловлено:

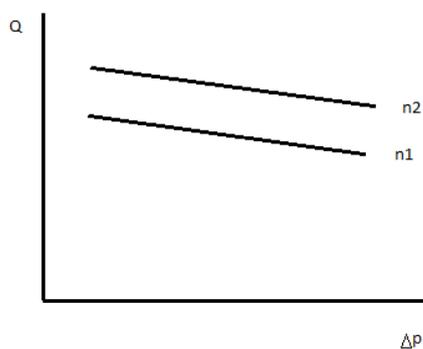
- а) разностью сил трения на поверхностях цилиндра и шнека;
- б) углом наклона нарезки шнека;
- в) вращением шнека;
- г) переходом полимера в вязкотекучее состояние.

4. Повышение температуры расплава при экструзии приводит:

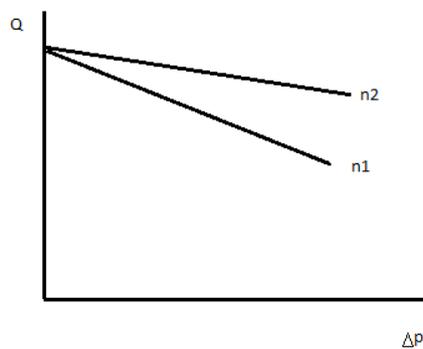
- а) к повышению производительности;
- б) повышению производительности и снижению перепада давления;
- в) снижению производительности;
- г) снижению производительности и перепада давления;
- д) снижению перепада давления и не скажется на производительности.

5. Увеличение скорости вращения червяка с n_1 до n_2 вызовет изменение зависимости $Q = f(\Delta p)$ (где Q - производительность, а Δp – перепад давления):

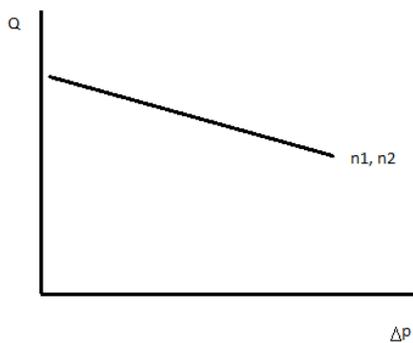
а)



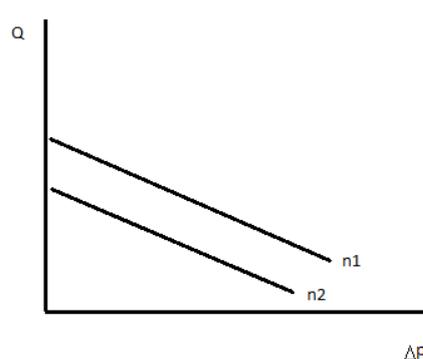
б)



в)



г)



6. Увеличение длины червяка приведет:

- а) к повышению производительности;
- б) повышению качества расплава;
- в) повышению качества расплава и производительности;
- г) снижению производительности и повышению качества расплава;
- д) не скажется ни на чем.

7. Рабочая точка экструдера – это:

- а) решение системы алгебраических уравнений, связывающих производительность экструдера и головки с перепадом давления в экструдере;
- б) точка пересечения двух кривых на графике зависимости производительности экструдера и головки от перепада давления;
- в) производительность экструдера при производстве конкретного изделия;
- г) перепад давления при производстве конкретного изделия, выше которого удастся получить изделие требуемого качества.

8. Полимер находится в зоне дозирования в состоянии:

- а) стеклообразном (кристаллическом);
- б) высокоэластическом;
- в) вязкотекучем.

9. Расположите зоны экструдера, приведенные ниже, в порядке их нахождения в экструдере:

- 1 – плавление;
 - 2 – загрузка;
 - 3 – дегазация;
 - 4 – дозирование;
- а) 1234;
 - б) 2134;
 - в) 3214;
 - г) 2314;
 - д) 4231.

10. Степень сжатия шнека – это:

- а) отношение диаметра шнека в зоне загрузки к диаметру шнека в зоне дозирования;
- б) отношение объемов винтового канала в зоне загрузки и зоне дозирования;
- в) отношение объемов винтового канала в зоне дозирования и зоне загрузки;
- г) отношение глубины нарезки в зоне загрузки и зоне дозирования;
- д) отношение шага шнека в зоне дозирования и зоне загрузки.

Тест 2

1. Расположите стадии технологического процесса изготовления труб в правильном порядке:

- 1) маркировка;
- 2) формование профиля трубы из расплава;
- 3) подготовка сырья;
- 4) калибрование трубы;
- 5) плавление и гомогенизация расплава;
- 6) охлаждение трубы;
- 7) намотка или резка.

- а) 1234567
- б) 3651274
- в) 3524617
- г) 5671234
- д) 3542176

2. Метод калибрования с использованием сжатого воздуха рекомендуется использовать при изготовлении:

- а) профиля с повышенной точностью размеров;
- б) изделий с минимальной толщиной стенки;
- в) изделий с максимальной толщиной стенки;
- г) при максимальной скорости экструзии;
- д) при минимальной скорости экструзии.

3. Недостаток калибрования сжатым воздухом:

- а) сложность использования оборудования;
- б) невозможность калибрования изделий минимальной толщины;
- в) отсутствие возможности наблюдать за качеством расплава;
- г) невозможность калибрования изделий максимальной толщины;
- д) невозможность использования при высокой скорости экструзии.

4. При производстве пленки рукавным методом ориентация пленки происходит:

- а) в продольном направлении;
- б) поперечном направлении;
- в) одновременно в продольном и поперечном направлениях.

5. Недостаточное сжатие и выравнивание скоростей отдельных потоков расплава приводит к появлению:

- а) шероховатости внутренней поверхности;
- б) концентрических волнообразных утолщений, периодически повторяющихся вдоль трубы;
- в) продольных утолщений, симметрично расположенных по внутренней окружности трубы;
- г) овальности трубы.

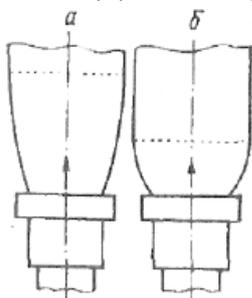
6. Коэффициент вытяжки при получении рукавной пленки выбираем в пределах:

- а) 2 – 3,5;
- б) 2 – 5;
- в) 1,5 – 3;
- г) 3 – 5.

7. Увеличение степени кристалличности получаемых пленок обеспечивается:

- а) увеличением скорости охлаждения;
- б) уменьшением скорости охлаждения;
- в) снижением температуры получения пленки;
- г) повышением температуры получения пленки;
- д) при увеличении толщины получаемой пленки.

8. На рисунке представлена конфигурация пленочного рукава при получении пленки методом раздува. Для перехода конфигурации (а) к конфигурации (б) необходимо:



- а) увеличить скорость охлаждения;
- б) уменьшить продольную вытяжку;
- в) уменьшить скорость охлаждения;
- г) увеличит продольную вытяжку;
- д) уменьшить температуру расплава;
- е) увеличить температуру расплава.

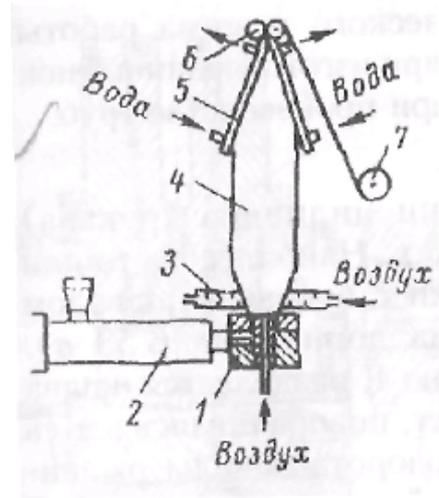
9. При испытании труба не выдерживает внутреннего гидростатического давления. Для устранения этого дефекта необходимо:

- а) повысить температуру расплава;
- б) уменьшить скорость экструзии;

- в) усилить охлаждение калибрующей насадки;
- г) понизить температуру расплава;
- д) увеличить скорость экструзии;
- е) ослабить сжатие транспортирующих органов тянущего устройства.

10. На рисунке изображена технологическая схема производства пленки рукавным методом. Сопоставьте цифры на рисунке с названием элементов:

- а) рукав пленки;
- б) обдувочное кольцо;
- в) экструдер;
- г) формующая головка;
- д) приемное устройство;
- е) направляющие пластины;
- ж) тянущие валки.



Контрольные вопросы

1. Назовите изделия, получаемые экструзией.
2. Причины движения материала в зоне дозирования со скоростью V_0 .
3. Дать определение рабочей точки экструдера.
4. Влияние технологических параметров на качество труб (скорость выхода расплава, скорость вытяжки).
5. Основные параметры червяка.
6. Причины движения материала в зоне дозирования со скоростью V_z .
7. Уравнение производительности головки (алгебраическая и геометрическая формы).
8. Влияние технологических параметров на качество труб (температура расплава).
9. У современных экструдеров каковы отношение L/D и степень сжатия?
10. Причины движения материала в зоне дозирования со скоростью $V_{\text{утечки}}$.
11. Цель калибрования труб. Способы калибрования.

12. Что такое степень сжатия червяка? Каким образом создается заданная степень сжатия?
13. В каком экструдере, работающем в насосном или дроссельном режиме, выше производительность?
14. Сравнить способы калибрования труб сжатым воздухом и вакуумом.
15. Зоны червяка.
16. Уравнение производительности зоны дозирования (алгебраическая и геометрическая формы).
17. Режимы работы экструдеров.
18. Стадии получения пленок раздувом рукава. Особенности экструдера.
19. Причины движения материалов в зоне загрузки.
20. Режимы работы экструдеров.
21. Получение пленок раздувом рукава. Ориентация и охлаждение пленки.
22. Причины движения материалов в зоне плавления.
23. Признаки начала зоны дозирования.
24. Получение пленок раздувом рукава. Коэффициенты вытяжки и раздува.
25. Причины движения материалов в зоне дозирования.
26. Увеличение длины червяка скажется:
 - а) на производительности;
 - б) на качестве расплава;
 - в) на качестве расплава и производительности;
 - г) не скажется ни на чем.
27. Стадии получения пленок раздувом рукава. Особенности экструдера.
28. В какой зоне червяка материал перемещается в виде пробки?
29. Сравнить способы калибрования сжатым воздухом и вакуумом.
30. Способы увеличения движущей силы в зоне загрузки.
31. На чем скажется повышение температуры экструдированного расплава? Ответ обоснуйте.
32. Производительность экструдера в зоне загрузки.
33. В какой из трех зон – загрузки, плавления, дозирования – производительность максимальная?

- 34.** В каком состоянии находится полимер в зонах дозирования, плавления и загрузки?
- 35.** Дать определение рабочей точки экструдера.
- 36.** Основные параметры червяка.
- 37.** Из каких скоростей складывается скорость движения материала в зоне загрузки?
- 38.** Стадии процесса производства труб.
- 39.** Цель калибрования труб, способы калибрования.

2. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТЕРМОПЛАСТОВ

2.1. 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, его уплотнением за счет давления с последующим охлаждением.

Основное оборудование для литья под давлением – литьевая машина с возвратно-поступательным движением шнека, которая является потомком машин, созданных Х. Бекком и В. Х. Уиллертом. Х. Бек, работая на немецком предприятии «Фабрениндустри», получил патент в 1952 году. Американец В. Х. Уиллерт подал заявку в 1952 году, но патент получил лишь в 1956 году. Первая серийная 600-тонная литьевая машина была выпущена в 1953 году. В современных машинах усилие смыкания достигает 11000 т, а объем впрыска – до 50 кг.

В настоящее время литьевые машины **классифицируются** в соответствии со следующим международным соглашением:

Компания-производитель T/P , где T – усилие смыкания, т,

$$P = V_{\max} \cdot P_{\max} / 1000, \quad (2.1)$$

где V_{\max} – максимальная доза впрыска, см³; P_{\max} – максимальное давление впрыска, бар.

Литьем под давлением можно перерабатывать все без исключения термопластичные полимеры, вид и марку 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 70 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, 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 его разогреву и значительной ориентации макромолекул. Степень ориентации повышается также за счет больших сдвиговых напряжений, возникающих в формующей 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 утяжин. Для предотвращения этого необходимо перед охлаждением повышать давление в форме. Однако охлаждение под высоким давлением затрудняет протекание релаксационных процессов и сильно изменяет условия кристаллизации. Поскольку литьем под давлением изготавливают изделия сложной конфигурации, очень трудно обеспечить равномерное охлаждение всех их элементов. В связи с этим релаксационные процессы в отдельных местах изделия завершаются на различных уровнях, а после охлаждения остаются внутренние остаточные напряжения, вызывающие коробление изделий, появление трещин или снижающие их прочность.

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.

2.1.1. Технология литья под давлением

Технологический процесс литья изделий из термопластичных полимеров состоит из следующих операций: 1) подготовка расплава полимера и его дозирование; 2) смыкание формы и подвод узла впрыска к форме; 3) впрыск расплава; 4) выдержка под давлением и отвод узла впрыска; 5) охлаждение изделия; 6) раскрытие формы и извлечение изделия. Операционная схема процесса литья под давлением приведена на рис. 2.1.

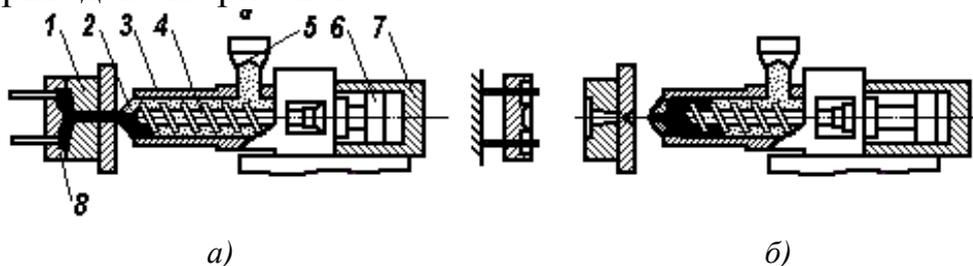


Рис. 2.1. Технологическая схема процесса литья термопластов: а – формирование изделия; б – раскрытие формы и извлечение изделия; 1 – форма; 2 – сопло; 3 – цилиндр литьевой машины; 4 – шнек; 5 – бункер; 6 – поршень узла впрыска; 7 –

В момент впрыска расплава и выдержки его под давлением (рис. 2.1, 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 формирующую полость. Для исключения вытекания расплава из формы дается выдержка под давлением, во время которой происходит частичное охлаждение расплава. Во время охлаждения изделия, когда расплав в литнике достаточно охлажден, узел впрыска отводится от формы (рис. 2.1, б) и начинается дозирование новой порции расплава, при этом шнек, вращаясь под действием давления расплава, скапливающегося перед шнеком, отходит вправо. В конце операции дозирования, когда накопится заданная масса расплава, вращение шнека прекращается. После окончания охлаждения полимера форма раскрывается и происходит удаление изделия. Такова общая последовательность технологических операций.

Подготовка расплава полимера и его дозирование

Данная операция осуществляется периодически через равные промежутки времени и с постоянной для каждого конкретного изде-

лия 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 шнеки не вращаются, поэтому нагревание гранул происходит только за счет теплопередачи. Таким образом, 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. Набор дозы начинается после окончания выдержки под давлением предыдущего цикла литья. При давлении впрыска (60—220 МПа и более) нагрузка на шнек очень велика и вращение его недопустимо. Для обеспечения хорошей гомогенизации расплава во время дозирования шнек отходит не свободно, а преодолевая усилие подпора. Усилие подпора на шнеке регулируется с помощью обратного клапана, через который сливается масло из поршня узла впрыска. Следует заметить, что увеличение подпора увеличивает температуру расплава и повышает ее однородность по сечению в каналах шнека, но снижает скорость набора дозы. С увеличением частоты вращения шнека перемешивание ухудшается и неоднородность расплава в его каналах возрастает, поэтому для гомогенизации расплава увеличивают усилие подпора за счет повышения давления масла в цилиндре узла впрыска.

Шнеки литьевых машин конструктивно отличаются от экструзионных. Они обычно имеют меньшую длину ($L/D = 15 - 17$) и степень сжатия для них $i = 2 - 2,5$. 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 вследствие течения в литниковых каналах расплав хорошо перемешивается и одновременно происходит дополнительный его нагрев. 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. 2.2).

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. 2.2) втулка прижимается к конической части хвостовика шнека, перекрывает каналы и исключает обратное течение. При переработке

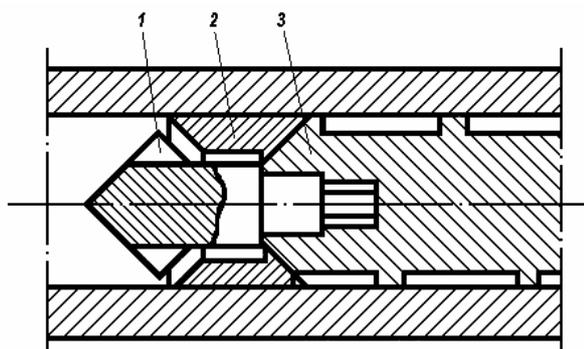


Рис. 2.2. Конструкция запорного клапана шнека: 1 – наконечник шнека; 2 – втулка клапана; 3 – шнек

нетермостойких полимеров (например, жесткого поливинилхлорида) применяются шнеки без запорного клапана с удлиненным гладким 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, выходное отверстие мундштука перекрывается клапаном самозапирающегося сопла, а при открытых конструкциях сопла узел впрыска не отводят от формы. Объем дозы расплава задается величиной отвода шнека вдоль цилиндра за счет изменения расстояния между кулачками конечных выключателей.

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, литниковых каналах и формующей полости не возникали большие перепады давлений. 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:

$$Q_{л} \geq (NG_{изд} + G_{л}) / (t_{охл} + t_{р}), \quad (2.2)$$

где $G_{изд}$ и $G_{л}$ – масса изделия и литников; N – гнездность формы; $t_{охл}$ – время выдержки при охлаждении и пауза между циклами.

Смыкание формы и подвод узла впрыска

Смыкание формы осуществляется в результате перемещения подвижной плиты термопластавтомата вместе с закрепленной на ней разъемной частью формы и созданием определенного усилия. Усилие смыкания $N_{см}$ необходимо для исключения раскрытия формы в момент заполнения ее расплавом. Для форм с туннельными или щелевыми впускными литниковыми каналами оно должно быть равно:

$$N_{см} \geq P_{\phi} (F_{изд} N + F_{л}), \quad (2.3)$$

где $F_{изд}$ и $F_{л}$ – площадь изделия и литников в плоскости разъема формы; P_{ϕ} – давление в форме, усредненное по площади отливки (при расчете обычно принимают $P_{\phi} = 5 \cdot 10^7$ Па); N – гнездность формы.

Для форм с горячеканальными литниковыми системами и точечным впускным литником расчет усилия производится по уравнению

$$N_{см} = P_{\phi} \cdot F_{изд} \cdot N. \quad (2.4)$$

В данном случае площадь литниковых каналов не учитывается, так как они расположены в другой плоскости разъема.

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.

Впрыск расплава

Во время впрыска при движении шнека вдоль цилиндра к соплу, втулка клапана 2 под давлением смещается (см. рис. 2.2), 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

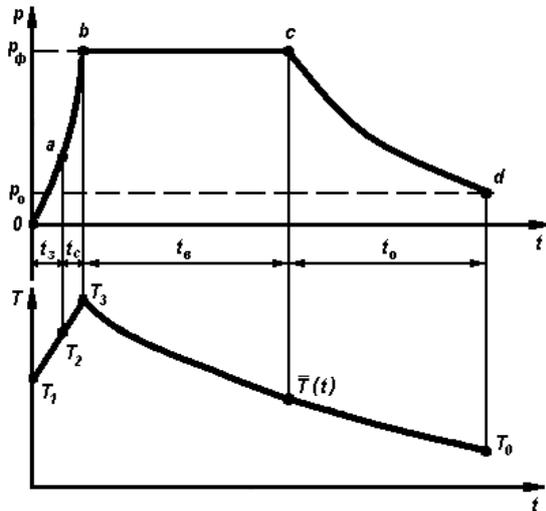


Рис. 2.3. Цикл-диаграмма изменения давления и температуры расплава во время процесса литья под давлением: *Oa* – заполнение формы расплавом; *ab* – сжатие; *bc* – выдержка под давлением; *cd* – охлаждение изделия

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. 2.3 (отрезок *Oa*).

В момент впрыска происходит нестационарный процесс течения, так как изменяются скорость течения и длина канала, а также температура расплава.

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, за счет которой происходит дополнительный разогрев полимера. Поэтому температура после впрыска T_2 будет равна:

$$T_2 = T_l + \frac{\sum \Delta p_m + \sum \Delta p_l}{C_p \rho_p}, \quad (2.5)$$

где T_l – температура расплава в цилиндре литьевой машины; Δp_m и Δp_l – перепады давления в каналах мундштука и литниках формы; C_p , ρ_p – удельная теплоемкость и плотность расплава полимера при температуре T_l .

Изменение температуры при литье под давлением показано на рис. 2.3.

Характер заполнения формы расплавом зависит от скорости впрыска и размеров формующей полости. При струйном режиме и очень высокой скорости впрыска расплав после выхода из литников движется в формующей полости вначале зигзагообразно (рис. 2.4, а).

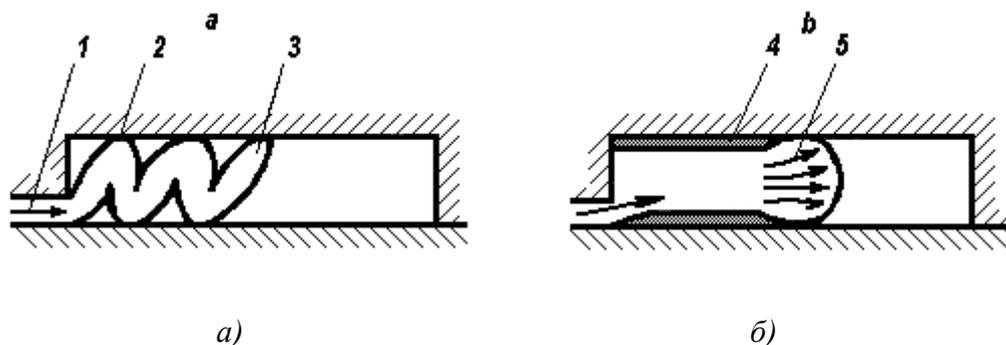


Рис. 2.4. Схема заполнения формующей полости расплавом в струйном (а) и ламинарном (б) режимах: 1 – впускной литник; 2 – стенки формы; 3 – струя расплава; 4 – твердый слой полимера; 5 – фронт течения расплава

По мере заполнения полости формы расплавом происходит уплотнение отдельных зигзагов, расплав прилипает к стенкам формы и струйный режим переходит в ламинарный — течение становится сплошным потоком. Внутренние слои полимера перемещаются к поверхности, происходит растяжение фронтального слоя расплава и оттеснение его к поверхности. Растянутые и ориентированные макромолекулы увеличивают неоднородность структуры полимера в изделии. Струйный режим возникает преимущественно в том случае, когда глубина впускного литника намного меньше формующего зазора. Струйный режим иногда приводит к дефектам изделий, после впрыска и уплотнения расплава на поверхности изделия остаются разводы (неоднородности). Заполнение формы при литье тонкостенных изделий или впрыске расплава с невысокой скоростью происходит сплошным потоком, который образуется непосредственно около впускного литника. Проследить характер течения можно при впрыске малой дозы расплава. При постепенном уменьшении объема впрыска по виду отливки хорошо виден процесс заполнения формы расплавом. Если струйный режим слишком велик, в местах впуска можно установить ложный знак, который переведет течение расплава со струйного потока на сплошной.

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 формирующей 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.

Качественный режим заполнения можно обеспечить, когда потери давления в формирующей полости в момент впрыска будут не более 60 МПа. В тех случаях когда это условие выполнить невозможно, производят доработку конструкции изделия, на нем предусматривают дополнительные ребра вдоль течения расплава или местное утолщение стенок.

Известно, что при течении расплава наибольшее напряжение сдвига образуется на стенке. Поскольку расплав у поверхности стенок быстро охлаждается, 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 формирующей 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. Остаточные напряжения появляются вследствие неоднородной ориентации макромолекул в отдельных элементах изделия. На участках, где остается высокая степень ориентации, макромолекулы находятся в растянутом состоянии, а на остальных – в сжатом.

Остаточные напряжения можно выявить при исследовании изделий при прохождении поляризованных лучей. Для этого изготавливают модельную деталь из прозрачного полимера (например, поли-

стирола) и на ней проверяют влияние режима литья. Косвенным методом исследования степени ориентации макромолекул является определение термической усадки микросрезов образцов с поверхности изделия. Для этого можно использовать микротом, применяемый в микроскопии. Последовательно с поверхности детали срезают пленки толщиной 15 – 20 мкм, нагревают их до температуры $T_c < T < T_t$, а затем измеряют изменение линейных размеров вдоль литья и в противоположном направлении.

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. Остаточные напряжения при повышении температуры также уменьшаются. Такое же влияние на степень ориентации и ее однородность по толщине изделия оказывает температура формы.

При высоких температурах литья удельная ударная вязкость изделий из полиэтилена повышается и приближается к прочности изделий, изготовленных методом прессования, что связано, очевидно, со снижением ориентации. Прочность больших литевых изделий из сополимеров на основе формальдегида при испытании на удар падающим грузом изменяется в зависимости от расстояния до литника. Чем дальше вырезаемый образец от литника, тем больше ударная прочность. Это обусловлено степенью ориентации макромолекул, которая уменьшается с увеличением расстояния до литника.

На анизотропию свойств оказывают влияние форма и габаритные размеры 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 кроме осевых напряжений σ_{zz} возникают нормальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$.

При заполнении литевой формы могут протекать процессы ориентации двух видов.

Первый вид – одноосная ориентация, возникающая в литевых изделиях, получаемых преимущественно в результате одноосного движения потока расплава полимера. Если размеры поперечного сечения изделия по направлению течения неизменны и ширина литника соответствует ширине изделия, то при заполнении формы вследствие одномерного перемещения расплава происходит одноосная ориентация. Примером таких изделий могут служить стандартные образцы в виде малых брусков и лопаток.

Второй вид – двухосная ориентация, возникающая при расширении потока расплава перпендикулярно направлению его движения.

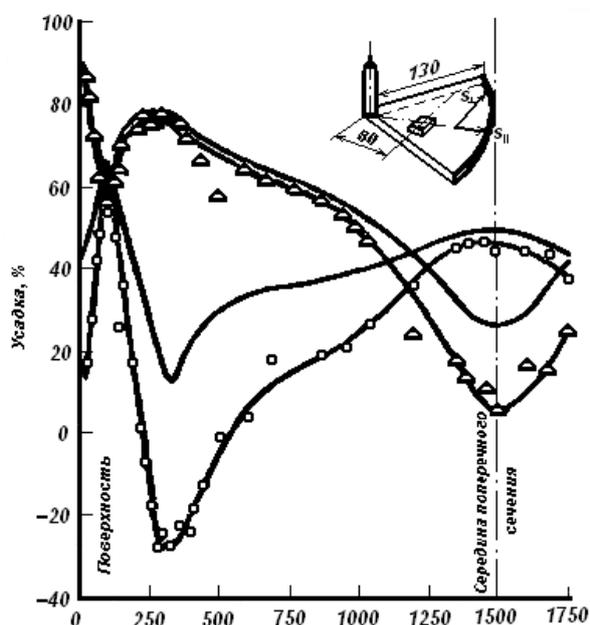


Рис. 2.5. Значение усадки вдоль течения \hat{s}_{\parallel} и в перпендикулярном направлении \hat{s}_{\perp} для сополимера стирола с акрилонитрилом в образцах после термообработки пленки, срезанной с поверхности изделия в виде сектора (\hat{s}_{\parallel} , \hat{s}_{\perp} – расчетные значения усадки при одноосной ориентации вдоль течения и в перпендикулярном направлении)

Расплав распространяется в форме таким образом, что фронт потока в любой момент заполнения формы представляет собой дугу, центр которой расположен у литника.

На примере сектора, изображенного на рис. 2.5, можно показать, что при продвижении расплав расширяется перпендикулярно направлению течения на величину дуги $\pi\Delta r/2$. Однако это расширение происходит неравномерно по поперечному сечению стенки. После соприкосновения со стенкой формы расплав начинает охлаждаться около нее и затвердевает, в то время как новые потоки расплава передвигаются по этому слою и одновременно расширяются перпендикулярно направлению течения, т.е. происходит радиальное и тангенциальное распространение расплава при двухмерном заполнении формы. Это означает, что расширение по сечению различно и приводит к возникновению нормального напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, направленного перпендикулярно направлению течения. Напряжение сдвига приводят к ориентации вдоль течения, а расширение вызывает ориентацию

перпендикулярно направлению течения, т.е. происходит радиальное и тангенциальное распространение расплава при двухмерном заполнении формы. Это означает, что расширение по сечению различно и приводит к возникновению нормального напряжения $\sigma_{\theta\theta}$, направленного перпендикулярно направлению течения. Напряжение сдвига приводят к ориентации вдоль течения, а расширение вызывает ориентацию

макромолекул в перпендикулярном направлении. Оба процесса ориентации вдоль и перпендикулярно направлению течения приводят к двухосной ориентации в литьевом изделии.

Измерение усадки образцов, вырезанных из изделий, показало, что области с приблизительно одинаковой ориентацией в сечении, перпендикулярно направлению течения, располагаются концентрически вокруг литника. Этот результат согласуется с наблюдением за перемещением расплава при заполнении формы. Расплав при одинаковой толщине стенок проходит за одинаковое время одинаковые отрезки пути. Поэтому скорость охлаждения и перемещения расплава и, следовательно, напряжение сдвига и ориентация одинаковы по окружностям, расположенным концентрически вокруг литника. В направлении течения средняя величина ориентации в области литника вначале сильно понижается, а затем почти не изменяется до конца пути расплава, где ориентация снова сильно понижается. Перпендикулярно направлению течения ориентация у литника также сильно понижается, а затем почти не изменяется.

Значение усадки срезов для образцов сополимера стирола с акрилонитрилом свидетельствует о повышении ориентации у поверхности до максимума в направлении, перпендикулярно направлению течения, а у изделий из полиметилметакрилата и поликарбоната увеличение усадки у поверхности перпендикулярно направлению течения выражено несколько слабее.

Наибольшая ориентация в направлении течения наблюдается на поверхности изделия. Она понижается к центру поперечного сечения так же, как у одноосно ориентированных литьевых изделий. В области, где имеется максимальная ориентация перпендикулярно направлению течения, ориентация в направлении течения непосредственно у поверхности снижается до минимума.

Тонкий поверхностный слой чаще всего характеризуется значительной ориентацией в направлении, перпендикулярно потоку. Потом ориентация понижается и проходит через максимум, особенно у сополимеров. Этот максимум зависит от длины пути расплава и наиболее отчетливо выражен в середине пути. 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 направлении и увеличивают в поперечном.

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 спая. После обтекания арматуры или знака два потока встречаются друг с другой 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. Кроме этого в поверхностных слоях фронта движения расплава происходит ориентация макромолекул, поэтому при охлаждении на линии стыка образуются слоевые структуры.

В слоевых структурах значительно меньше межмолекулярных перехлестов и проходных участков макромолекул, поэтому прочность в перпендикулярном направлении уменьшается. При течении отдельные слои расплава сдвигаются неравномерно и в слоях с очень сильной ориентацией затрудняется процесс кристаллизации. В слоях интенсивного сдвига структура состоит преимущественно из кристаллитов.

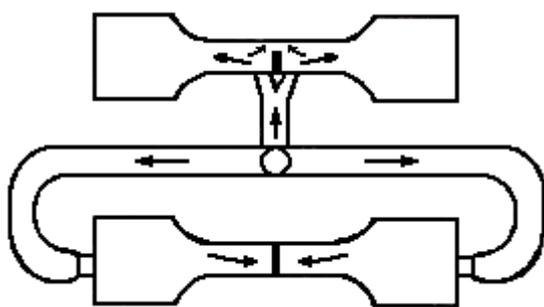


Рис. 2.6. Схема расположения литников при литье лопаток для определения прочности спаев

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. Когда впрыск расплава производят через несколько впускных литников, чтобы ликвидировать линии спаев, при выдержке под давлением часть из них перекрывают специальными клапанами. Поэтому при подпитке

течение происходит через оставшиеся литники, вследствие чего на границе стыка возникает сдвиг слоев расплава, на линии спая образуются проходные участки макромолекул, и она упрочняется.

На рис. 2.6 представлена схема расположения литников, при которых получаются два вида спаев. При двух впусках с противоположных сторон лопатки в направлении оси изделия спай образуется в конечный момент заполнения формы. Во втором случае предусмотрены два впуска, расположенные рядом и перпендикулярно к оси лопатки. Такое расположение литников приводит к образованию неоднородности течения в начале заполнения формы, поэтому стыковой шов прочнее, чем в первом случае.

Рассмотрим результаты изменения прочности спаев различных термопластов, полученных на образцах лопаток, показанных на рис. 2.6. Прочность спая полистирола, при заполнении формы с двух противоположных сторон, сильно увеличивается при повышении температуры литья (рис. 2.7, а). Прочность образцов, изготовленных с боковым подводом расплава, уменьшается. Очевидно, в последнем случае прочность определяется не наличием спая, а степенью ориентации полистирола, которая с повышением температуры уменьшается. Картина течения полимера при этом виде спая почти аналогична картине течения в лопатке с одним впускным литником, расположенным пер-

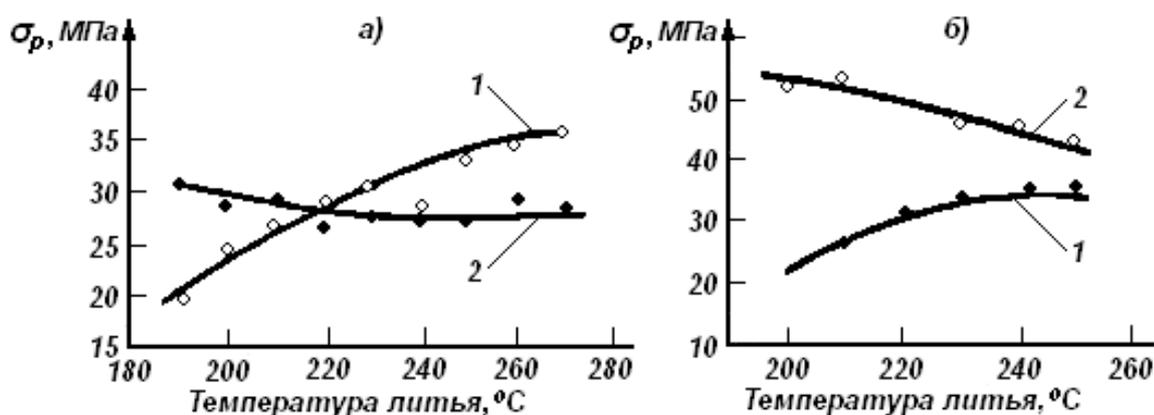


Рис. 2.7. Зависимость прочности при растяжении спая блочного полистирола (а) и ударопрочного полистирола (б) от температуры литья: 1 – впуск параллельно оси лопасти с противоположных сторон; 2 – впуск в центре лопасти перпендикулярно оси

пендикулярно ее оси, но прочность при двух впусках несколько выше, чем при одном впуске. Установлено, что повышение температуры литьевой формы в пределах 35 – 75 °С не оказывает существенного влияния на прочность спая блочного полистирола, но она несколько повышается с ростом давления литья.

Таким образом, наибольшее влияние на прочность спая полистирола оказывает температура литья: чем она выше, тем выше прочность спая.

Прочность спая у изделий из ударопрочного полистирола (рис. 2.8, б) при увеличении температуры литья повышается в меньшей степени, чем из полистирола. Возможно, это объясняется присутствием нитрильного каучука, обладающего плохой аутогезией. Кроме того, в местах соприкосновения двух потоков материала может находиться воздух, не удалившийся в конце заполнения формы, что приводит к термоокислению расплава полимера, так как воздух при сжатии подвержен сильному нагреванию. Если в форме предусмотрена соответствующая вентиляция (каналы для отвода воздуха), то прочность спая повышается.

Следует заметить, что при литье сложных изделий или неправильном подведении впускного литника в формующей полости могут образоваться воздушные полости, препятствующие течению расплава. Воздух закрывается расплавом в полости формы, за счет высокого давления он сильно нагревается, полимер по краям пригорает, и изделие имеет дефекты. Для удаления воздуха из этих мертвых зон в них устанавливают выталкиватели или ложные знаки. За счет наличия зазоров между корпусом формы и вставками (толкателем) воздух из формующей полости удаляется, и изделие также формируется без дефектов.

Среднее давление, создаваемое в конце впрыска в форме P_ϕ , К.И. Басов с соавторами рекомендуют рассчитывать по уравнению

$$P_\phi = P_n(0,07 / K + 0,045K + 0,72), \quad (2.6)$$

где P_n – давление расплава на выходе из литника; K – коэффициент, зависящий от размеров формующей полости, вязкости расплава и температуры формы.

С некоторым приближением для определения коэффициента K они предлагают применять эмпирическое уравнение

$$K = X(170/T_p)^4 / \Phi, \quad (2.7)$$

где X – длина формующей полости от выпускного литника; Φ – средний периметр сечения формующей полости в плоскости, перпендикулярной к направлению литья; T_p – температура расплава, °С.

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. 2.3. Величина давления P выбирается из условия достижения необходимой плотности расплава, чтобы в процессе охлаждения не происходило значительного уменьшения объема. При недостаточном сжатии увеличивается усадка изделия и могут образоваться 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 перепадом давления в каналах мундштука и литников. Однако этот перепад давления намного меньше, чем в момент заполнения формы расплавом, так как объемная скорость при подпитке очень мала.

Сжатие расплава необходимо рассматривать как термодинамический процесс. Увеличение давления расплава обуславливает изменение энтальпии системы, что приводит к повышению температуры до T_3 (см. рис. 2.3):

$$T_3 = \frac{1}{\beta C_p} \left(\frac{RT_2}{MP} + b \right) (1 - e^{-\beta P_{cp}}) - \frac{RT_2}{C_p M} \cdot \ln \left(\frac{P_{cp}}{P} + 1 \right) + T_2, \quad (2.8)$$

где: β – коэффициент сжимаемости полимера; C_p – удельная теплоемкость расплава; P_ϕ – среднее давление в полости формы; M , P , b – коэффициенты уравнения состояния; M – молекулярная масса полимерного звена.

Экспериментально установлено, что для большинства полимеров прирост температуры при сжатии под давлением до 100 - 140 МПа равен 5 – 7°.

Прирост (повышение) температуры от диссипации энергии вязкого течения составляет около 15 – 25° и зависит в основном от размеров литника и скорости течения.

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 расплава переходит в медленное дополнительное нагнетание (подпитку), а последняя компенсирует уменьшение объема полимера в форме при его охлаждении и уменьшает усадку изделий.

Выдержка под давлением (отрезок «bc» на рис. 2.3) обычно продолжается до тех пор, пока расплав на каком-либо участке литниковой системы или в формующей полости около литника не охладится ниже температуры текучести. Так как после охлаждения до T_T масса расплава в формующей полости больше не изменяется, подпитка прекращается и не происходит вытекания расплава при отводе сопла. Исходные значения средней температуры и давления расплава в точке «с», см. рис. 2.3, определяют изменение линейных размеров изделия при последующем охлаждении. Чем больше выдержка под давлением, тем сильнее понижается температура расплава в формующей полости, поэтому при последующем охлаждении после окончания выдержки под давлением размеры изделия изменяются меньше. При повышении давления в форме плотность расплава повышается, и при охлаждении объем изделия уменьшается меньше. Таким образом, усадочные процессы, происходящие в форме, зависят от размеров литника и формующей полости, температуры расплава и формы, а также от давления в форме и теплофизических свойств полимера.

При большем диаметре литника время выдержки под давлением возрастает, поэтому увеличивается ориентация макромолекул вдоль течения и анизотропия свойств изделия становится больше. Одновременно с этим уменьшается время, необходимое для охлаждения детали. Поскольку операция охлаждения совмещается с дозированием расплава (пластикацией), за короткий промежуток времени заданная порция расплава не успевает накопиться, и необходимо будет увеличивать технологический цикл литья или повышать частоту вращения шнека, что ухудшает гомогенизацию. Поэтому не рекомендуется применять литники большого сечения. При подпитке на расплав при

его охлаждении в форме действуют неодинаковые по площади напряжения сдвига, они больше около впускного литника, поэтому степень ориентации макромолекул также будет неоднородная, что приводит к последующему короблению изделия из-за появления остаточных напряжений.

Для предотвращения этих нежелательных факторов целесообразно заполнить форму расплавом, уплотнить его под высоким давлением, а затем сразу же 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 небольшого сечения (точечные литники) или мундштуков с запорным клапаном. Особенно это необходимо производить при литье изделий с большой площадью отливки. Однако в случае литья изделий с большой толщиной стенок при малой выдержке под давлением невозможно проводить подпитку, поэтому для уменьшения усадки толстостенных изделий необходимо создавать в форме высокое давление или отливать их из газонаполненных полимеров.

Давление при выдержке рассчитывают с учетом всех технологических параметров процесса, а также размеров литников. При правильно выбранном давлении после окончания охлаждения в формующей полости остается некоторое остаточное давление $p_{ост}$. Если чрезмерно увеличить давление в форме (диаграмма $O a b'' c'' d''$ на рис. 2.8), 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 могут произойти разрушение их или деформация. 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 или форму-

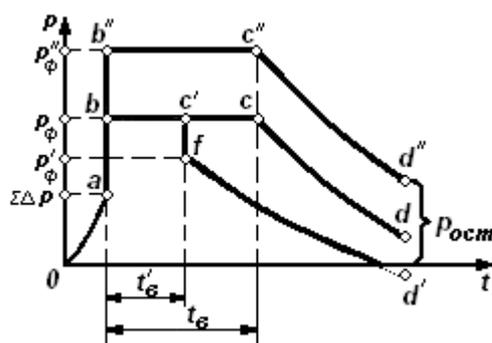


Рис. 2.8. Цикл-диаграмма литья при различных режимах: $Oabcd$ — оптимальный режим; $Oab''c''d''$ — высокое давление в форме; $Oabc'fd'$ — выдержка под давлением недостаточна

ющей полости, то полимер частично вытекает из формы и давление падает (диаграмма $O a b c' f d'$ на рис. 2.8). Из-за недостаточной компенсации усадочных процессов на изделиях в этом случае появляются утяжины и раковины (пустоты) или увеличивается усадка.

На второй стадии, когда расплав уже охладился до T_t , подача расплава в форму не происходит, и масса материала не изменяется. При этих условиях усадка аморфного полимера происходит за счет термического сжатия (сокращения), определяемого коэффициентом объемного расширения. Усадка зависит от скорости охлаждения, определяемой температурой формы. Чем ниже температура формы, тем меньше усадка аморфного термопласта. В случае кристаллических полимеров усадка на этой стадии определяется главным образом процессом кристаллизации, в результате которого происходит значительное уменьшение размеров литевых изделий. Определяющим фактором на этой стадии для кристаллических полимеров является температура формы. Чем выше температура формы, тем больше усадка кристаллического полимера, поскольку отвод тепла проходит медленнее, и кристаллизация протекает полнее. При более высокой температуре формы расплав в конце выдержки под давлением также имеет более высокое значение температуры, поэтому в процессе последующего охлаждения у него сильнее изменяется плотность и усадка изделия возрастает.

Усадка в форме на второй стадии может быть свободной, когда оформляющие части формы не препятствуют усадке материала, или несвободной, когда оформляющие части препятствуют уменьшению линейных размеров полимера, например при наличии металлической арматуры в изделии или формующих знаков для отверстий. На третьей стадии после извлечения изделия из формы происходит только свободная усадка, если, конечно, изделие не сажают на какую-либо оправку.

После достижения определенного времени выдержки усадка имеет минимальную постоянную величину, поскольку расплав в литниковых каналах или формующей полости успевает охладиться до T_t , поэтому после отвода узла впрыска от формы он не вытекает из формы и в ней сохраняется высокое давление. Последующее увеличение времени выдержки бесполезно, так как подпитка формы расплавом прекращается.

Охлаждение изделия

Охлаждение расплава фактически 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 с помощью толкателей или плит съема.

Температура полимера перед размыканием формы должна быть такой, чтобы при извлечении изделия не произошло его коробление или разрушение. В процессе охлаждения температура расплава уменьшается, а так как объем остается неизменным, то давление в форме снижается (отрезок «cd» на рис. 2.3). 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. При недостаточном сжатии расплава у изделий с большой толщиной стенок внутри изделия могут образоваться пустоты (раковины).

Литьевые изделия могут иметь весьма разнообразную конфигурацию и размеры, а также разнотолщинность, которые служат основной причиной появления остаточных внутренних напряжений. Особенно большое влияние на равномерность процесса охлаждения влияет разнотолщинность стенок. 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 формующих 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. В местах с большой толщиной стенок дезориентация протекает полнее, а так как там первоначально напряжения и так были меньше, то различие в ориентации по площади изделия 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 у полимеров с

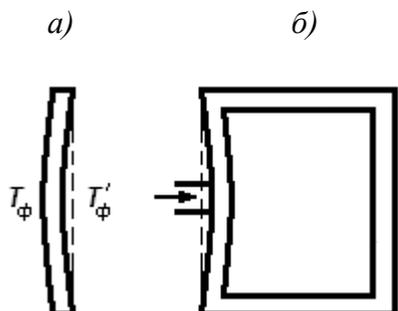


Рис. 2.9. Коробление изделий вследствие неравномерного охлаждения ($T'_ф > T_ф$) (а) и при неправильном расположении литника (б)

высоким модулем жесткости образуются микротрещины. Коробление возможно и у изделий, не имеющих разнотолщинности стенок, из-за 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, которая имеет различную температуру плит, после извлече-

ния изделия происходят неравномерные усадочные процессы и оно изгибается в сторону поверхности, которая была перед извлечением более нагретой (рис. 2.9, а). Это объясняется тем, что линейные размеры более нагретой поверхности изделия после извлечения из формы при охлаждении изменяются сильнее, чем у менее нагретой поверхности.

Зависит коробление и от расположения литника в форме (рис. 2.9, 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 на боковых стенках и днище. 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, а также применением полимеров с большей текучестью, т.е. уменьшая степень ориентации макромолекул и ее неоднородность.

Коробление изделий может возникать за счет значительной разности усадки в продольном и поперечном направлениях (вдоль

направления течения расплава и в перпендикулярном). Особенно сильно это проявляется у кристаллических полимеров с высокой молекулярной массой (низким показателем текучести). Например, для полиэтилена высокой плотности (ПЭНД) с индексом расплава 21 г/10 мин, различие в усадке составляет 0,1 %, а с показателем текучести 0,3 г/10 мин – 3,1 %. Естественно, при литье сложных или крупногабаритных изделий из ПЭНД или подобных полимеров с показателем текучести 0,3 г/10 мин будет происходить значительное коробление изделий. Для литья крупногабаритных изделий, особенно плоских, необходимо применять полимеры с высокой текучестью или предусматривать несколько впускных литников.

Раскрытие формы и извлечение изделия

После окончания операции охлаждения происходит раскрытие формы. Одновременно с изделием из литниковой втулки извлекается литник.

При производстве изделий из полимеров, обладающих сильной адгезией, для уменьшения прилипания полимера к поверхности формирующей 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.

2.1.2. Влияние технологических параметров на качество изделий

К технологическим параметрам, оказывающим значительное влияние на эксплуатационные свойства литьевых изделий (прочность, размерную точность, твердость, анизотропию свойств и др.), относятся давление, температура расплава и формы, скорость впрыска и время выдержки под давлением. При рассмотрении зависимостей технологических параметров на свойства изделий следует учитывать степень кристалличности полимеров. Так, при литье аморфных полимеров ударная вязкость с повышением температуры

расплава вначале повышается, а затем, проходя через максимум, снова снижается (рис. 2.10).

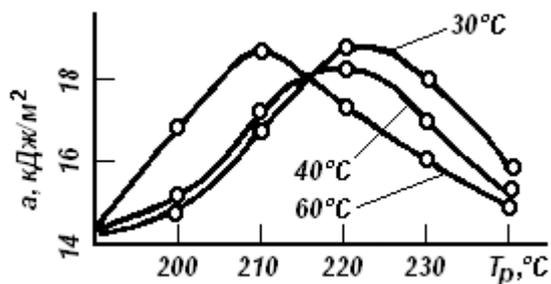


Рис. 2.10. Зависимость ударной вязкости изделий из полиметилметакрилата от температуры расплава при различной температуре формы

Из представленных данных видно, что удельная ударная вязкость изделий из полиметилметакрилата при различных температурах формы одинаковая и меняется только от температуры расплава. Но при этом от температуры формы происходит смещение максимума кривой.

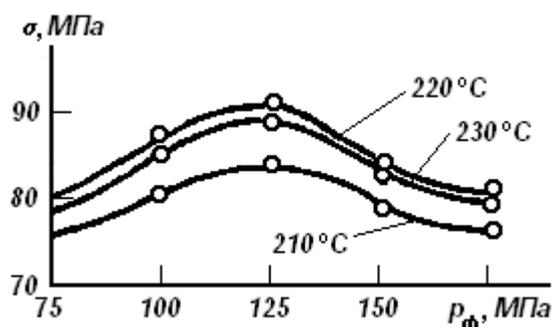


Рис. 2.11. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении изделий из полиметилметакрилата от давления в форме при температуре формы 30 °C и разной температуре расплава

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. 2.11).

Из представленных данных видно, что удельная ударная вязкость изделий из полиметилметакрилата при различных температурах формы одинаковая и меняется только от температуры расплава. Но при этом от температуры формы происходит смещение максимума кривой. При литье изделий наибольшее значение прочности достигается при давлении 125 МПа. Однако несколько иное влияние оказывает давление при литье полистирола.

Из полученных данных следует, что более высокая прочность полистирола при растяжении достигается при низких температурах литья и при высоких давлениях литья, но при этом в отличие от литья полиметилметакрилата отсутствует максимум прочности.

Было также установлено, что при постоянной температуре литья и формы давление не оказывает влияния на прочность полистирола при статическом изгибе. 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.

Кроме значения давления необходимо учитывать и продолжительность его приложения, которая определяется не только временем выдержки под давлением, но и размерами впускного литникового канала, поскольку после затвердевания термопласта в этом канале передача давления прекращается.

Как уже было отмечено, температура расплава и формы очень сильно влияют на анизотропию свойств изделия: чем они выше, тем меньше разница в свойствах изделий вдоль и поперек направления литья. Особенно сильно на анизотропию свойств, влияет 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 и ее неоднородность.

Таким образом, время выдержки под давлением и время застывания впускного литникового канала определяют время передачи давления. Поэтому при малых сечениях впуска время выдержки под давлением почти не влияет на предел прочности при растяжении, в то время как при впусках большого размера время выдержки под давлением оказывает влияние на этот показатель. Проанализировать влияние температуры литья на изменение основных параметров процесса и свойства изделий можно по приведенной схеме (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Влияние температуры расплава на основные параметры процесса литья и свойства изделий

Аналогично можно проанализировать влияние давления на изменение основных параметров процесса и свойств изделий.

Подобную схему можно представить по изучению влияния давления и других технологических параметров.

Имеются данные, что предел прочности при растяжении аморфных полимеров при повышении температуры формы изменяется очень незначительно. В то же время влияние температуры формы на механические свойства кристаллических термопластов проявляется в большей степени, чем аморфных. Как правило, механические свойства полиолефинов с ростом температуры формы повышаются.

При повышении температуры формы увеличивается степень кристалличности, поэтому предел прочности при растяжении и модуль упругости кристаллизирующихся полимеров возрастают, а относительное удлинение при разрыве уменьшается.

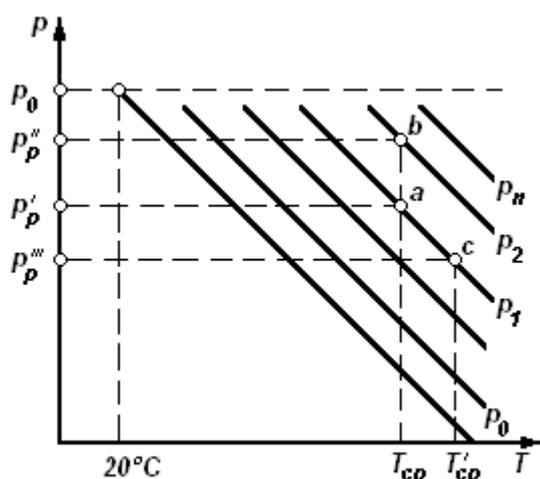


Рис. 2.13. Зависимость плотности расплава аморфного полимера от давления и температуры (схема к расчету)

Технологические параметры процесса литья очень сильно влияют на усадку изделий, т.е. на их линейные размеры. Это достаточно легко проследить, используя зависимость изменения плотности расплава полимера СП температуры и давления. Известно, что при увеличении давления в форме плотность расплава возрастает. Например, при давлении p_1 исходная точка, характеризующая состояние расплава, находится на пересечении линий давления p_1 и средней температуры расплава после выдержки под давлением T_{cp} (точка «а» на рис. 2.13).

При увеличении давления плотность полимера повышается и исходное состояние смещается в точку «b». Поскольку в точке «b» плотность ρ_p выше, чем в точке «а», при охлаждении расплава под высоким давлением происходит меньшее изменение объема и усадка изделий уменьшается в соответствии с уравнением (2.9):

$$Y = 1 - (\rho_p / \rho_0)^{1/3}, \quad (2.9)$$

где U – усадка; ρ_0 – плотность полимера при 20 °С; ρ_p – плотность при температуре переработки.

Из уравнения (2.9) 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 «с» на рис. 2.13). Этому состоянию соответствует плотность ρ_p''' , меньшая, чем ρ_p' , в точке «а». Таким образом, с ростом температуры усадка в поперечном направлении U_{\perp} увеличивается, так как плотность полимера понижается. При высокой температуре ориентация уменьшается и усадка вдоль направления литья U_{\parallel} понижается. По этой же причине повышается удельная ударная вязкость изделий.

То же самое 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 «с». Однако если с повышением температуры T_p или T_{ϕ} увеличить выдержку под давлением, то усадка может остаться прежней или даже несколько уменьшиться. Действительно, если при меньшей выдержке и температуре T_{ϕ} исходному состоянию соответствовала точка «с», то при увеличении продолжительности выдержки при том же давлении p_1 рабочая точка смещается к точке «а». 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 растет значительно сильнее, чем при изменении других параметров.

2.1.3. Технологические параметры процесса литья под давлением

В настоящее время существует целый ряд компьютерных программ (pro-Ingeneering, Moldflow), позволяющих с высокой точностью рассчитать технологические параметры процесса литья в зависимости от марки используемого материала, формы и размеров изделия и конструкции формы. Для получения изделий с оптимальными эксплуатационными свойствами здесь же мы рассмотрим качественное влияние основных технологических параметров литья под давлением (давление литья, температура расплава и формы, время выдержки под давлением, время охлаждения) на качество изделий.

Температура расплава

Известно, что полимеры перерабатываются при различных температурах, но для каждого метода выбираются температуры, обеспечивающие необходимые значения вязкости расплава. При изучении реологических зависимостей различных полимеров при температурах переработки было замечено, что для каждого метода переработки выделяется отдельная реологическая область, определяемая вязкостью расплава. Экспериментально установлено, что температура литья должна обеспечивать определенный интервал вязкости расплава полимера, что на реологической зависимости выражается определенной областью.

Обычно в справочной литературе приводится диапазон температур, в котором рекомендуется перерабатывать данный вид (марку) полимера. Выбор конкретной температуры определяется целым рядом факторов, в первую очередь формой и габаритными размерами изделия (чем сложнее изделие и тоньше его стенки, тем температура выше), литниковой системой (чем разветвленнее литник (многогнездная форма), тем температура выше). В общем случае повышение температуры приводит к увеличению времени охлаждения, т.е. к снижению производительности. Таким образом, температуру литья повышают лишь в случае необходимости.

Температура формы

Температура формы обеспечивает необходимую скорость охлаждения и конечную температуру изделия. Кроме того, при литье кри-

сталлизирующихся полимеров она влияет на условия кристаллизации, а следовательно, и на свойства изделий. Температуру формы находят экспериментально, ориентируясь на справочные данные, или задают из условия обеспечения необходимой степени кристалличности полимера в изделии, степени ориентации макромолекул при литье аморфных полимеров.

Выбор термопластавтомата

Современные литьевые машины, или термопластавтоматы (ТПА) – это сложные технические устройства, оснащенные всеми необходимыми средствами автоматизированного управления параметрами технологического процесса.

Практически все фирмы выпускают типоразмерные ряды ТПА по двум основным параметрам (усилие запираения формы и объем впрыска). Таким образом выбор фирмы-изготовителя определяется другими технико-экономическими параметрами. В первую очередь возможностью изготовления изделий с необходимыми степенью точности, гарантийным сроком работы, легкостью обслуживания и ремонта и т.д. Стоимость ТПА одинакового объема впрыска и усилия смыкания может отличаться в разы (от максимального (ТПА Западной Европы) до минимального (ТПА Китая и РФ).

После определения фирмы-производителя и марки литьевой машины выбирается конкретная литьевая машина по требуемому усилию смыкания и объему впрыска по уравнениям

$$N_{см} \geq P_{\phi}(J_{изд} \cdot n + J_{лит}), \quad (2.10)$$

$$V_{впр} \geq \frac{G_{изд} \cdot n + G_{лит}}{\rho_p}, \quad (2.11)$$

где $G_{д}$, $G_{л}$ – масса изделия и литниковой системы; ρ_p – плотность расплава при температуре литья (при расчете можно принять плотность полимера); P_{ϕ} – давление в форме (при расчетах с запасом можно принять давление литья); $J_{изд}$, $J_{лит}$ – площадь изделия и литников в плоскости разъема формы; n – гнездность формы.

Мировая практика в настоящее время такова, что литьем под давлением из пластмасс (и общего, и специального конструкционного

назначения) могут быть получены изделия, по существу, любой разумной сложности и габаритов, к ним могут предъявляться весьма высокие требования точности. Для каждого изделия (а расширение номенклатуры, появление новых изделий безграничны) требуются индивидуальные решения, тем более что объективно ужесточаются (т.е. повышаются) требования к точности литьевых изделий. По современным экспертным оценкам приблизительно для 30 – 40 % изделий назначаются качества IT 12-13; до 10%-IT 7-10; для микропрецизионных изделий – точнее IT 7. Такая тенденция в целом характерна и для российской практики за исключением последней группы, которая в РФ не производится. Принимая во внимание затраты, необходимые для обеспечения более высокого качества изделия (трудно поддается ориентировочной оценке из-за специфического для каждого изделия взаимодействия «образующих точность» факторов влияния), понятна цена ответственности разработчика изделия и всех участников процесса его создания. Сейчас конструктор изделия и пресс-формы в подавляющем большинстве случаев вынужден делать выбор «в условиях неопределенности» и повышенного риска в отношении ожидаемого результата.

Время выдержки под давлением

Время выдержки под давлением определяется, с одной стороны необходимостью передать в формующую полость необходимую дополнительную порцию расплава полимера для уменьшения усадки. С другой стороны, выдержка под давлением должна быть минимальной, чтобы обеспечить максимальное время на набор следующей дозы материала.

При использовании форм с традиционной литьевой системой время выдержки под давлением зависит от температуры расплава и объема впускного литника.

Графически минимальное время выдержки под давлением соответствует перегибу кривой зависимости массы изделия от времени выдержки под давлением (см. рис. 2.14).

Теоретический расчет усложняется тем, что литье происходит при нестационарных условиях теплопроводности, а охлаждение расплава в литники – во время течения через литник расплава со скоростью, зависящей от изменения объема полимера в формующей полости.

Выдержка под давлением приводит, как известно, к повышению внутренних напряжений в изделии, поэтому в настоящее время выдержку под давлением уменьшают или сокращают до нуля. Наиболее распространенный метод – применение форм с точечными литниками при одновременном значительном увеличении давления литья. Давление литья увеличивают до такого уровня, чтобы количество материала в полости формы уже при впрыске соответствовало точке «выдержка под давлением» на рис. 2.14.

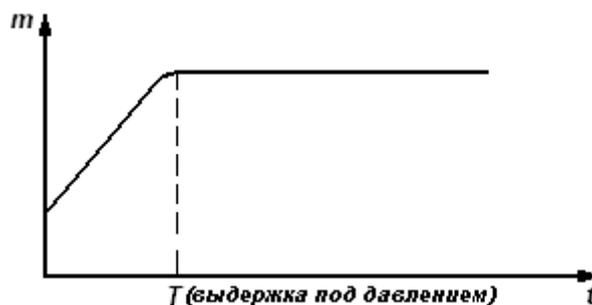


Рис. 2.14. Зависимость массы изделия от времени выдержки под давлением

Время выдержки при охлаждении

Охлаждение начинается сразу же после заполнения формы расплавом и происходит до тех пор, пока изделие не достигнет определенной конструкционной жесткости. Однако технологическое расчетное время выдержки при охлаждении задается по реле времени после отвода сопла от формы, т.е. после выдержки под давлением, когда расплав уже частично охлажден и имеет по толщине изделия определенный профиль температуры. Поскольку расчет профиля температуры сложен, удобнее найти общее время охлаждения с момента впрыска, а затем из него вычесть выдержку под давлением. При определении времени охлаждения необходимо учитывать конфигурацию изделий, их размеры, температуру расплава и формы, а также коэффициент температуропроводности расплава. Расчет обычно проводят по уравнениям нестационарной теплопроводности, которые в зависимости от формы изделий имеют различный вид.

Например, для пластины

$$t_0 = \left[\frac{\delta^2}{\pi^2 \alpha} \ln \frac{8(T_3 - T_0)}{T_0 - T_0} \right] - t_s, \quad (2.12)$$

где δ – толщина изделия; T_0 – средняя температура изделия по толщине стенки после извлечения его из формы; α – коэффициент температуропроводности, находится при средней температуре $T_c = (T_3 + T_0)/2$.

Необходимо отметить, что реальный процесс охлаждения изделия существенно отличается от расчетного. Прежде всего, своей нестационарностью: непостоянна температура формы, изменяются условия теплопередачи внутри затвердевающего изделия и текущие значения коэффициента теплопроводности материала в функции температуры. Поэтому длительность охлаждения нередко определяют эмпирически.

Отдел пластмасс германской фирмы «Bayer» предлагает номографический метод приближенного определения длительности охлаждения (см. приложение).

Величины α , $\tau_{\text{охл}}$ и δ – те же, что и в приведенном уравнении (2.12); T – безразмерная температура, определяемая по выражению

$$\bar{T} = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{изд}} - T_{\text{ф}}}, \quad (2.13)$$

где $T_{\text{пл}}$, $T_{\text{изд}}$ и $T_{\text{ф}}$ – температура расплава, изделия и формы соответственно.

Длительность охлаждения определяют следующим образом:

1) на ординатах α и δ находят положения точек, соответствующих температуропроводности пластмассы и толщине стенки изделия, соединяют их линией;

2) на ординате \bar{T} намечают точку, адекватную расчетному значению безразмерной температуры, и соединяют ее с точкой, лежащей на пересечении первой линии с вспомогательной ординатой x_i ;

3) на пересечении линии 2 с ординатой $\tau_{\text{охл}}$ располагается точка, соответствующая требуемой длительности охлаждения.

Увеличение длительности охлаждения способствует завершению релаксационных процессов, происходящих в затвердевающей пластмассе, уменьшению внутренних напряжений и объективно приводит к улучшению физико-механических и эксплуатационных свойств изделия. Чем больше вязкость расплава полимерного материала, тем длительнее должно быть охлаждение изделия.

Пластикационная производительность

Поскольку дозирование осуществляется во время операции охлаждения и раскрытия формы, частоту вращения шнека рассчиты-

вают из условия обеспечения заданной дозы материала за указанное время. При этом производительность узла пластикации должна быть равна

$$Q_{nl} \geq \frac{N_{\phi} G_{изд} + G_{л}}{(t_0 + t_p) \rho_p}, \quad (2.14)$$

где $G_{изд}$ и $G_{л}$ – масса изделия и литников; N_{ϕ} – гнездность формы; t_0 и t_p – время охлаждения и раскрытия формы соответственно.

2.1.4. Виды брака и способы их устранения

Основные виды брака при литье под давлением следующие.

1. Недолив выражается в неполном оформлении изделия. Основной его причиной является недостаток материала, поступающего в литьевую форму (из-за низкой температуры формы или расплава и, следовательно, пониженной текучести расплава, а также по причине засорения литникового и разводящих каналов).

2. Перелив вызывает образование грата в месте смыкания формы. Он возникает при неправильной работе дозирующего устройства, перегреве расплава и литьевой формы, недостаточном усилии смыкания формы.

3. Стыковые швы. Видна кривая линия спая отдельных потоков, механически прочность резко снижена в месте спая. Основными причинами образования стыковых швов являются сниженная температура расплава или формы, неудачная конструкция формы, приводящая к охлаждению отдельных потоков расплава до момента их слияния (вследствие чего не происходит полного сваривания), а также недостаточное давление расплава.

4. Вздутия на поверхности и пузыри (пустоты) в массе изделия наблюдаются при повышенном содержании летучих, которые вспучивают мягкую поверхностную пленку при перегреве расплава, сопровождающемся частичной деструкцией и значительным газовыделением. Поверхность вздутия образуется также при недостаточном охлаждении изделия.

5. Усадочные раковины – значительные углубления на поверхности изделий – возникают вследствие повышенной усадки при пере-

греве массы и недостаточном поступлении расплава (снижено давление расплава или мало сечение впускных каналов). Иногда поверхностные раковины появляются при неравномерном распределении температуры в форме и при дефектах в ее вентиляции.

6. Коробление готовых изделий возникает из-за значительных напряжений внутри изделия, обусловленных большой разностью температур в отдельных частях формы, а также при недостаточной выдержке изделия в литевой форме, отчего оно извлекается недостаточно жестким.

7. Трещины образуются вследствие значительных остаточных напряжений в изделии, а также при его прилипанию к стенкам формы.

8. Риски, царапины, сколы на поверхности изделий возникают при неисправном состоянии оформляющей поверхности формы и неаккуратном обращении с готовыми изделиями.

9. «Мороз» – узоры, напоминающие зимнюю разрисовку оконных стекол. Основная причина их появления – попадание влаги в форму при недостаточной сушке гранулята и дефектов в вентиляции формы.

10. Расслоение наступает при повышенном содержании влаги в литевом материале и при наличии отвердевших литников, не совмещающихся с основным материалом. Если отслоение выражено в виде очень мелких блесток, его называют серебристостью.

11. Разнотонность – неодинаковая поверхностная окраска изделия – объясняется недостаточно одинаковым окрашиванием или разложением красителя из-за его термической нестойкости или перегреве расплава.

12. Размерный брак – отклонение от номинальных размеров, превышающее установленный допуск; наблюдается при чрезмерной усадке или неудачной конструкции литевой формы.

Таким образом, основными мерами предупреждения брака являются исправное состояние оборудования, соблюдение технологического режима и стандартность сырья.

Перечень возможных дефектов литевых изделий и способы их устранения дополняют сведения, приведенные в таблице.

Возможные дефекты литьевых изделий и способы их устранения

Дефект	Причина дефекта	Способ устранения
Полосы и продолговатые пузыри на поверхности изделия	Влажность материала	Подсушка сырья
Матовые пятна на поверхности изделия	Перегрев расплава	Понижение температуры расплава; полирование литниковых каналов
Темные полосы на поверхности изделия	Местный перегрев материала; наличие мертвых зон в цилиндре и сопле	Понижение температуры расплава; ликвидация мертвых зон
Темные разводы и воздушные пузыри	Своевременно не удален попавший в цилиндр воздух	Повышение давления плаستيкации
Пустоты в изделии	Сильный нагрев (в результате сжатия) воздуха, попавшего в форму	Улучшение условий выхода воздуха из полости формы; уменьшение скорости впрыска и снижение температуры материала
Местный пережог детали	Сильный разогрев попавшего в форму воздуха, сжатие его и, как следствие, пережог материала	То же
Загрязнение изделия	Попадание в материал посторонних частиц или наличие задиров на поверхности цилиндра, поршня или червяка	Контроль за чистотой материала, поступающего в бункер; проверка поверхностей, соприкасающихся с материалом
Пленка или пятна на поверхности изделия	Соприкосновение расплава с маслом, чрезмерная смазка формы	Проверка чистоты инъекционного цилиндра; очистка формы, уменьшение смазки
Волнистая поверхность удаленной от литника части изделия	Охлаждение расплава в процессе течения	Повышение температуры материала и скорости впрыска
Линии на поверхности детали	Нарушение течения материала, неравномерное заполнение формы	Проверка режима заполнения формы; при необходимости – изменение размеров литников и их расположения
Пузыри в виде белых включений	Высокая температура цилиндра и низкое давление литья, недостаточное время выдержки материала в форме под давлением	Снижение температуры цилиндра, повышение давления литья и времени выдержки под давлением, увеличение размеров литников или литниковых каналов для снижения потерь давления

Дефект	Причина дефекта	Способ устранения
Швы и складки около литника	Излишне быстрое охлаждение расплава на участке вблизи литника	Повышение температуры формы вокруг литника, увеличение размеров литниковых каналов
Сварные швы	Чрезмерное охлаждение расплава при заполнении формы	Повышение температуры формы и материала, скорости впрыска, давления литья, изменение расположения литника (для изменения направления течения расплава)
Отслаивание наружного слоя детали	Включение посторонних материалов. Избыточное значение разности температур расплава и формы	Очистка цилиндра и сопла от посторонних материалов
Грат на изделии	Недостаточное усилие запирания формы, нарушение параллельности соприкасающихся поверхностей форм	Увеличение усилия запирания формы или снижение скорости впрыска и давления формования; проверка правильности затяжки колонн при образовании грата с одной стороны изделия; уменьшение загружаемой порции материала; проверка параллельности соприкасающихся поверхностей формы; уменьшение вторичного давления формования
Затруднения при съеме изделий, деформация изделий при съеме	Неправильные режим литья и конструкция формы	Уменьшение давления литья, увеличение конусности стенок формы или сердечников, полирование поверхности формы, обеспечение воздушных зазоров, сталкивание изделий воздухом (во избежание образования вакуума)

2.2. Материал для самоконтроля

Тест 3

1. Расположите стадии технологического литья под давлением в правильном порядке

- 1) плавление, гомогенизация и дозирование полимера;
- 2) охлаждение изделия;
- 3) подвод узла впрыска к форме;
- 4) впрыск расплава;
- 5) смыкание формы;
- 6) выдержка под давлением и отвод узла впрыска;
- 7) раскрытие формы и извлечение изделия.

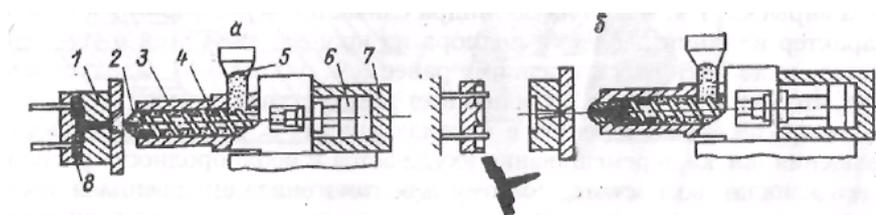
- а) 1234567
- б) 1364527
- в) 7456123
- г) 5472136
- д) 1534627

2. Степень сжатия для процесса литья под давлением находится в интервале:

- а) 2 – 2,5;
- б) 1 – 3,5;
- в) 2 – 3;
- г) 2,5 – 3,5.

3. На рисунке изображена технологическая схема производства полимерных изделий литьем под давлением. Сопоставьте цифры на рисунке с названием элементов:

- а) цилиндр литьевой машины;
- б) бункер;
- в) форма;
- г) поршень узла впрыска;
- д) сопло;
- е) изделие;
- ж) цилиндр узла впрыска;
- з) шнек.

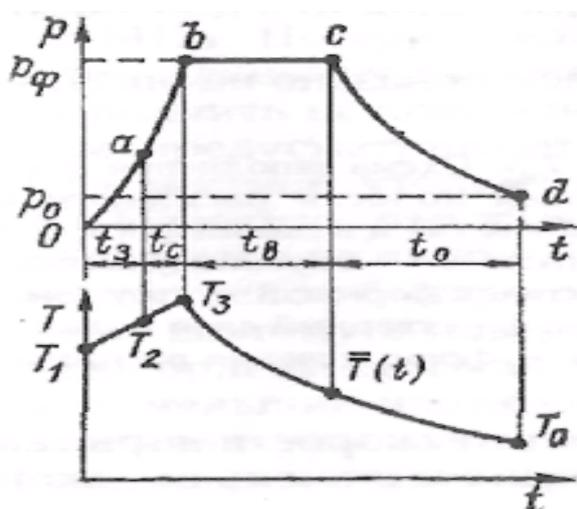


4. При впрыске расплава шнек литевой машины:

- а) вращается;
- б) вращается и движется в сторону сопла;
- в) вращается и отходит назад;
- г) движется в сторону сопла;
- д) движется в сторону загрузочной камеры;
- е) неподвижен.

5. Впрыск расплава отображается на рисунке отрезком

- а) oa ; б) ab ; в) bc ; г) cd ; д) T_1T_2 ; е) T_2T_3 ; ж) T_3T_0



Цикл-диаграмма изменения давления и температуры расплава в форме во время процесса литья под давлением

6. Повышение температуры расплава с T_1 до T_2 (см. рисунок) связано:

- а) с дополнительным нагревом сопла литевой машины;
- б) дополнительным нагревом за счет перехода части энергии движения расплава в тепловую энергию;
- в) диссипацией энергии вязкого течения;
- г) дополнительным нагревом плит, в которых расположены литниковые каналы.

7. Выдержка под давлением необходима:

- а) для окончательного заполнения формы расплавом;
- б) получения изделия с определенной кристаллической структурой;
- в) компенсации усадки полимера при его охлаждении;
- д) уменьшения внутренних напряжений в изделии.

8. Один из видов брака «мороз» - узоры, напоминающие зимнюю разрисовку оконных стекол. Для его удаления необходимо:

- а) повысить температуру расплава;
- б) понизить температуру расплава;
- в) повысить давление литья;
- г) понизить давление литья;
- д) использовать материал с меньшей остаточной влажностью;
- е) ликвидировать дефекты в форме, связанные с вентиляционными отверстиями.

9. С ростом температуры усадка полимера:

- а) увеличивается в поперечном направлении;
- б) уменьшается вдоль направления литья;
- в) уменьшается в поперечном направлении;
- г) увеличивается вдоль направления литья;
- д) не изменяется.

10. Струйный режим заполнения формы возникает, когда:

- а) диаметр впускного литника намного больше высоты формующего зазора;
- б) диаметр впускного литника намного меньше высоты формующего зазора;
- в) диаметр впускного литника и высота формующего зазора равны;
- г) скорость впрыска высока;
- д) скорость впрыска мала.

Контрольные вопросы

1. Литье под давлением термопластов. Место этого метода среди других методов переработки. Сырье, оборудование. Набор дозы. Особенности шнека.

2. Выбор технологических параметров при литье под давлением термопластов.

3. Литье под давлением термопластов. Влияние технологических параметров на качество изделий.

4. Литье под давлением: смыкание формы, впрыск расплава, выдержка под давлением.

5. Особенности изменения давления и температуры в форме при литье термопластов и реактопластов.
6. Литье под давлением реактопластов.
7. Влияние технологических параметров на качество изделий, изготовляемых литьем под давлением.
8. Изменение давления и температуры в литьевой форме в процессе формования изделия.
9. Литье под давлением термопластов: выдержка под давлением и охлаждение.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО МЕТОДАМ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕРМОПЛАСТОВ

Лабораторные работы предусматривают приобретение студентами практических навыков по переработке полимерных материалов. Студент должен уметь оценивать качество получаемых изделий как визуально, так и с помощью специального оборудования, пользоваться справочными данными и сопоставлять их с полученными практическими результатами, анализировать влияние различных факторов на качество изделий и производительность оборудования.

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, которые изучили теоретические основы процесса, определили цель работы и методику ее выполнения и требования к содержанию и оформлению отчета.

При выполнении лабораторных работ студент обязан соблюдать как общие требования техники безопасности, с которыми он знакомится на первом занятии, так и требования по технике безопасности при выполнении конкретной лабораторной работы, которые приведены в начале каждой работы.

Студенты, не выполняющие график лабораторных работ, направляются на их выполнение вторично в свободное от учебы время.

3.1. Лабораторная работа ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

Требования безопасности при работе на экструдере

1. Экструдер относится к оборудованию с повышенной опасностью для обслуживающего персонала. Возможны получение ожогов, механических травм, поражения электротоком при несоблюдении условий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию оборудования.

2. В процессе экструзии перерабатываемые материалы подвергаются воздействию высокой температуры (до 250 °С).

3. Включение и выключение экструдера, переключение режимов работы осуществляет лаборант.

4. Засыпать материал в зону загрузки следует осторожно небольшими порциями, равномерно, не допуская пыления.

5. Следить за чистотой машины. При чистке машины нужно отключить электрообогрев.

6. При работе на экструдере запрещается:

- пользоваться открытым огнем;
- измерять температуру местного цилиндра на ощупь;
- прикасаться к движущимся частям машины.

Цель работы

Приобрести практические навыки работы на лабораторном экструдере, научиться определять основные параметры процесса экструзии и устанавливать взаимосвязь между ними.

Задание

1. Изучить конструкцию и принцип действия лабораторного одночервячного экструдера.

2. Определить экспериментально производительность экструдера и степень разбухания струи расплава на выходе.

3. Оценить теоретически производительность Q экструдера, соответствующую условиям эксперимента, и провести анализ характеристик червяка и головки экструдера в координатах $Q - P$.

4. Обработать результаты измерений и расчетов, проанализировать полученные данные, составить отчет.

Оборудование и материалы

Лабораторный одночервячный экструдер; гранулированный термопласт; секундомер; весы лабораторные (точность до 0,1 г); измерительная линейка с миллиметровыми делениями.

Методика выполнения работы

1. Получить у преподавателя данные, необходимые для выполнения работы: а) вид перерабатываемого материала; б) уточненное задание по работе.

2. Ознакомиться с устройством экструдера, используя схему рис. 3.1.

3. Включить электрообогрев трех зон экструдера, подавая на электронагреватели каждой зоны необходимое напряжение автотрансформатором. Проконтролировать исправность электронагревателей (по отклонению стрелки амперметра на пульте управления экструдера) и установить необходимые температуры по зонам экструдера.

ВНИМАНИЕ: достижение стационарного теплового режима экструдера происходит в течение 1 – 1,5 ч.

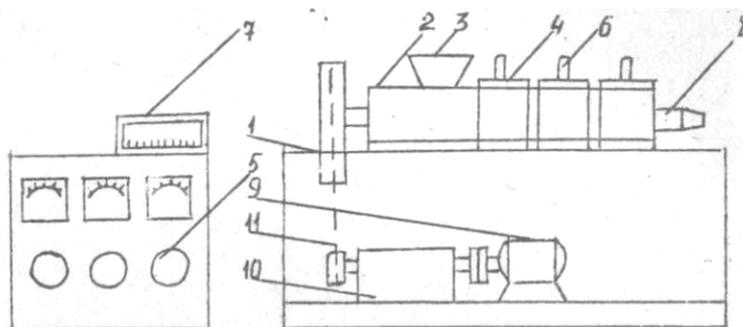


Рис. 3.1. Схема лабораторного одночервячного экструдера: 1 – рама; 2 – цилиндр экструдера; 3 – загрузочный бункер; 4 – электронагреватели; 5 – автотрансформаторы; 6 – термомпара; 7 – милливольтметр; 8 – профилирующая головка; 9 – электродвигатель переменного тока; 10 – редуктор; 11 – цепная передача

Геометрические параметры червяка экструдера:

1. Число заходов червяка $t = 2$;
2. Диаметр червяка $D = 30$ мм;
3. Шаг винтовой нарезки червяка $t = 60$ мм;
4. Глубина винтовой нарезки червяка в зоне дозирования $h_d = 2,5$ мм;
5. Глубина винтовой нарезки червяка в зоне загрузки $h_d = 5,0$ мм;
6. Длина зоны дозирования $l_d = 220$ мм;
7. Длина зоны пластикации $l_{п} = 60$ мм;
8. Длина зоны загрузки $l_3 = 160$ мм;
9. Ширина гребня винтовой нарезки червяка $e = 4$ мм;
10. Величина зазора между гребнями винтовой нарезки червяка и стенками цилиндра $\delta = 0,15$ мм;
11. Угол подъема винтовой нарезки червяка $\varphi = \arctg(t/\pi \cdot D)$;
12. Геометрические параметры головки экструдера видны из рис. 3.2.

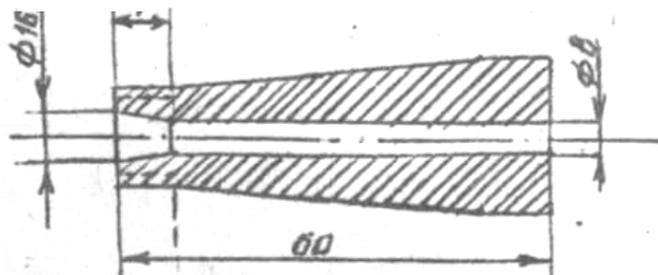


Рис. 3.2. Экструзионная головка для изделия «стержень»

Таблица 3.1

Температурные режимы экструзии при переработке
различных термопластов

Термопласт	Температура по зонам и в головке, °С			
	I	II	III	Головка
Полиэтилен ВД	110	150	180	180
Полиэтилен НД	150	180	200	250
Полипропилен	230	250	280	280
Поливинилхлорид с 48 % дибутилфталата и 3 % стеарата кальция	150	165	180	180

Перемещением рычага коробки скоростей привода редуктора установить заданную скорость вращения шнека. Ее контролировать, используя метку на большом приводном колесе шнека экструдера и секундомер. Засыпать гранулированный термопласт в загрузочную воронку экструдера. Спустя некоторое время после выхода перерабатываемого материала из головки экструдера (около 10 – 15 мин) измерить массовую производительность экструдера G (г/мин), для чего одновременно с включением секундомера отсечь выходящий из головки экструдера пруток расплава термопласта. По истечении одной минуты вторично отсечь пруток термопласта, а охлажденную порцию экструдата, вышедшую из машины за 1 мин, перенести на весы и взвесить с точностью до 0,1 г.

С помощью штангенциркуля или другого измерительного инструмента измерить диаметр выходящей из головки экструдера струи расплава d_3 , которую в дальнейшем использовать для расчета степени разбухания струи экструдата (%) из соотношения

$$C = \frac{(d_3 - d_2)}{d_2},$$

где d_2 – диаметр отверстия на выходе головки экструдера, мм.

Скорость вращения шнека h , производительность G и d_3 измерять не менее трех раз. При дальнейших расчетах и анализе полученных данных принимать во внимание средние арифметические значения указанных параметров, вычисленных по многократным измерениям. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

По окончании измерений прекратить подачу гранулированного термопласта в загрузочную воронку экструдера, дождаться прекращения выхода расплава из головки, после чего выключить привод вращения червяка и электрообогрев цилиндра экструдера.

Практическая часть

Результаты работы оформляют по табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты экспериментального и теоретического изучения работы экструдера

Перерабатываемый термопласт	Температура по зонам и в головке, °С	Скорость вращения червяка, об/мин	Массовая и объемная производительность, г/см ³ , с эксперим.	Объемная производительность (теоретич.), г/см ³	$\frac{Q_{\text{экс}} - Q_{\text{теор}}}{Q_{\text{экс}}}$, %	Разбуксование, %
По заданию преподавателя	1- 2- 3- головка-	$n_1=$ $n_2=$ $n_3=$ $n_{\text{сред}}=$	G_1 G_2 G_3 $G_{\text{сред}}$ $Q_{\text{экс}}$	$Q_{\text{теор}}=$		$C_1=$ $C_2=$ $C_3=$ $C_{\text{сред}}=$

При обработке и анализе полученных данных необходимо выполнить следующее:

1. Теоретически оценить производительность экструдера по соотношению

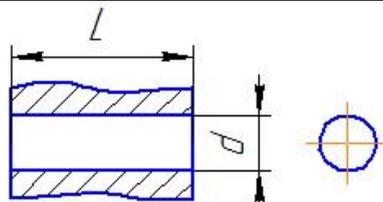
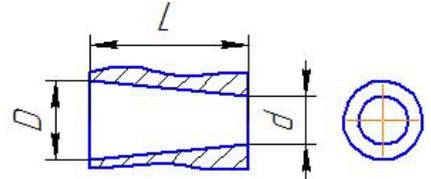
$$Q = \frac{\alpha \cdot K}{K + \beta \cdot \frac{\mu_{\text{эк}}}{\mu_{\text{зз}}} + \gamma \cdot \frac{\mu_{\text{эз}}}{\mu_{\text{зз}}}} \cdot n$$

где Q – объемная производительность экструдера; α , β и $\dot{\gamma}$ – коэффициенты прямого, обратного потока и потока утечки; K – коэффициент геометрической формы головки; μ_0 – вязкость в канале, зазоре, головке.

Значения K определяются по табл. 3.3.

Таблица 3.3

Определение коэффициентов геометрической формы K каналов головок экструдеров и скоростей сдвига $\dot{\gamma}$ в этих каналах

Вид канала	Расчетная схема	Расчетные формулы
Круглый цилиндрический		$K_i = \frac{\pi d^4}{128L^3}$ $\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi d^3}$
Круглый конический		$K_i = \frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)}$ $\dot{\gamma} = \frac{256Q}{\pi(D-d)^2}$

Величины α , β и $\dot{\gamma}$ в случае однозаходного червяка с постоянной глубиной нарезки в зоне дозирования можно рассчитать из соотношений:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot D \cdot h \cdot g \cdot (t-e) \cdot \cos^2 \varphi}{2},$$

$$\beta = \frac{h^3 \cdot g \cdot (t-e) \cdot \sin 2\varphi}{24 \cdot l \cdot g},$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \cdot \operatorname{tg} \varphi \sin \varphi}{10e \cdot l \cdot g},$$

где D – диаметр червяка; h_d – глубина нарезки в зоне дозирования; t – шаг винтовой нарезки червяка; e – ширина гребня винтовой нарезки червяка; φ – угол подъема винтовой линии нарезки червяка; l_d – длина зоны дозирования; δ – величина зазора между наружным диаметром и внутренней поверхностью цилиндра экструдера.

Величины $\mu_{\text{эк}}$, $\mu_{\text{эз}}$, $\mu_{\text{эг}}$ следует определить из графиков зависимостей μ_0 от средней скорости сдвига $\dot{\gamma}$. Температуры в зоне дозирования экструдера и в головке определить на основании фактического температурного режима работы экструдера, а величину $\dot{\gamma}$ оценить из соотношений:

а) для винтового канала червяка

$$\gamma = \frac{\pi^2 (D - h_0)(D - 2h_0)}{h_0 \sqrt{\pi^2 (D - 2h_0)^2 + t^2}} n,$$

где D – диаметр шнека экструдера; h_0 – глубина винтовой нарезки в пределах зоны дозирования; t – шаг винтовой нарезки червяка.

б) для зазора между цилиндром и гребнями винтовой нарезки червяка

$$\gamma = \frac{\pi^2 D^2}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} n,$$

где δ – величина этого зазора.

в) для головки (приближенно)

$$\gamma_2 = \frac{\sum_{i=1}^m \dot{\gamma}_{2i}}{m},$$

где $\dot{\gamma}_{2i}$ – средняя скорость сдвига на i -м участке канала экструзионной головки.

2. Оценить величину перепада давления в головке из соотношения

$$\Delta P = Q \sum_{i=1}^n \frac{\mu_{\text{э}i}}{K_i}.$$

3. В координатах Q - ΔP представить графические характеристики червяка и головки, воспользовавшись при этом соотношениями

$$Q = \alpha \cdot n - \beta \frac{\Delta p}{\mu_{\text{эф.к}}} - \gamma \frac{\Delta p}{\mu_{\text{эф.з}}}; \quad Q = K \frac{\Delta p}{\mu_{\text{эф.2}}},$$

где Δp – величина перепада давления в головке, принятая равной величине давления на выходе дозирующей зоны экструдера.

Найти рабочую точку экструзии и ее координаты.

Построить характеристики червяка при изменениях: а) скорости вращения и б) геометрических параметров червяка (по заданию преподавателя). Найти соответствующие им рабочие точки экструзии и их координаты.

Анализ совокупности полученных данных и формулирование выводов по проделанной работе, включая вывод о применимости теоретических соотношений для описания процесса экструзии термопластов, возможных причинах наблюдающегося несоответствия величин $Q_{\text{теор}}$ и $Q_{\text{эксп}}$ и границах применимости соотношения для оценки производительности червячного экструдера.

3.2. Лабораторная работа ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Требования безопасности при работе на экструдере

1. Термопластавтомат (литьевая машина) относится к оборудованию с повышенной опасностью для обслуживающего персонала. Возможно получение ожогов, механических травм, поражения электротоком при несоблюдении условий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию оборудования.

2. В процессе литья под давлением перерабатываемые материалы подвергаются воздействию высокой температуры (до 300 °С).

3. Включение и выключение литьевой машины, переключение режимов работы осуществляет лаборант.

4. Следить за чистотой машины. При чистке машины нужно отключить электрообогрев.

5. При работе на литьевой машине запрещается:

- работать при открытых защитных кожухах.
- пользоваться открытым огнем.
- прикасаться к движущимся частям машины и частям машины, находящимся за ограждением.

Цель работы

Приобрести практические навыки работы на лабораторной литьевой машине, научиться определять основные параметры процесса литья под давлением термопластов и устанавливать взаимосвязь между ними.

Задание

1. Ознакомиться с конструкцией к литьевой машине, найти все рукоятки и кнопки управления, определить их назначение.

2. Выбрать или рассчитать технологические параметры литья под давлением: температуру материального цилиндра по зонам, температуру формы, давление литья, показания манометра литьевой машины, продолжительность выдержки под давлением и без давления, продолжительность цикла, машинное и технологическое время. Рассчитать технологическое время литья под давлением.

3. Ознакомиться с рабочими приемами регулирования технологических параметров (машину включает лаборант).

4. Получить методом литья под давлением 10 – 15 изделий, визуально оценить их качество.

5. Найти режим термообработки литьевых изделий, построить графики зависимости «температура термообработки – усадка» и «температура термообработки – твердость» по экспериментальным данным.

Оборудование и материалы

Литьевая машина с объемом впрыска 90 см³. Кроме литьевой машины при выполнении работы необходимы микрометр или индикатор часового типа, весы, измельчитель пластмасс роторный.

По заданию преподавателя можно использовать полиэтилен низкой плотности, полипропилен, АБС-пластик и другие термопластичные материалы.

Методика выполнения работы

Студентам необходимо найти в литературе и согласовать с преподавателем температурный режим переработки, заданного материала. Обычно по зонам литьевой машины устанавливают температуру, превышающую температуру текучести термопласта на 20, 40 и 60 градусов, но не выше температуры начала деструкции.

При выполнении лабораторной работы студент выставляет на пульте управления машины технологические параметры литья под давлением, далее снимает показания и рассчитывает технологическое время и время цикла литья под давлением, которые приведены в практической части.

Практическая часть

Продолжительность цикла литья рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{см}} + t_{\text{впр}} + t_{\text{разм}} + t_{\text{техн}},$$

где $t_{\text{см}}$, $t_{\text{впр}}$, $t_{\text{разм}}$ – продолжительность смыкания, впрыска и размыкания; $t_{\text{техн}}$ – технологическое время (время охлаждения изделия в форме), с;

Технологическое время определяется по формуле

$$t_{\text{техн}} = 0.101 \frac{\delta^2}{\alpha} \left(\ln 1.27 - \ln \frac{T_{\text{и}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{рс}} - T_{\text{ф}}} \right),$$

где α – температуропроводность; $T_{\text{и}}$, $T_{\text{ф}}$, $T_{\text{рс}}$ – температура изделия, формы и расплава соответственно, К; $T_{\text{и}}$ принимается приблизительно на 10 – 30 градусов ниже $T_{\text{с}}$ или $T_{\text{пл}}$; $T_{\text{рс}}$ принимается приблизительно равной $T_{\text{цилиндра}}$. $T_{\text{ф}}$ выбирается из справочных данных.

При экспериментальном определении цикла литья

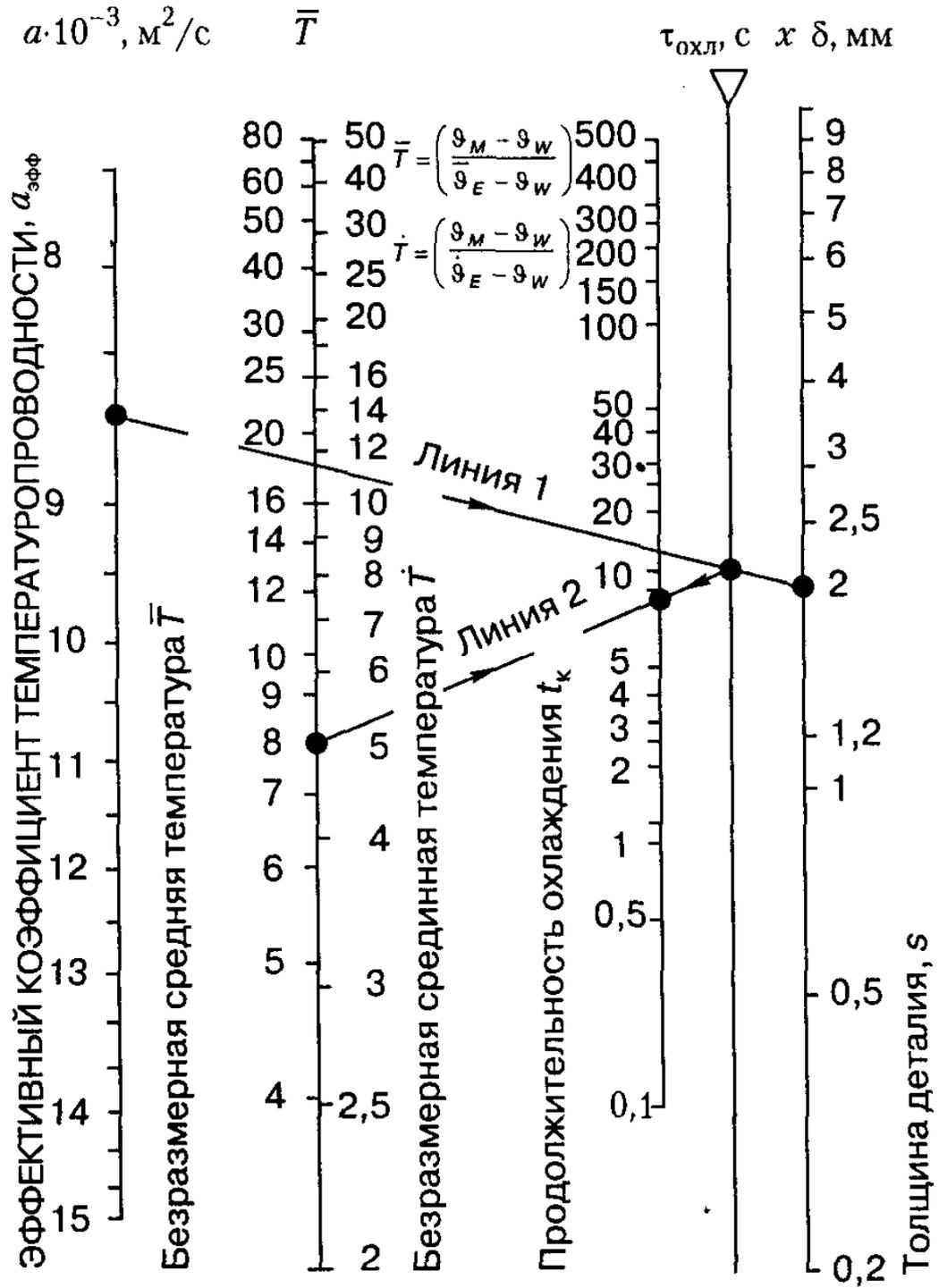
$$t_{\text{техн}} = t_{\text{выд}} + t_{\text{охл}},$$

где $t_{\text{выд}}$ – время выдержки под давлением, с; $t_{\text{охл}}$ – время охлаждения изделия, с.

Полученные результаты оформить в отчете в виде таблицы, где указать характеристики используемого материала, параметры технологического процесса, результаты расчетов и измерений, определить ошибку эксперимента. Обсудить результаты расчетов, сделать выводы, дать список использованной литературы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Номограмма приближенной оценки длительности охлаждения изделий из термопластов



СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. *Раувендааль, К.* Экструзия полимеров : пер. с англ. / К. Раувендааль; под ред. А. Я. Малкина. – СПб. : Профессия, 2008.–768 с.
2. *Оствальд, Т.А.* Литье пластмасс под давлением / Т. А. Оствальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Грэмман ; под. ред. Э. Л. Калинчева. – СПб. : Профессия, 2006.– 712 с.
3. *Шерышев, М. А.* Производство изделий из полимерных листов и пленок / М. А. Шерышев. – СПб. : НОТ - Научные основы и технологии, 2011. – 554 с.
4. *Крыжановский, В. К.* Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский [и др.]. – СПб. : Профессия, 2004. – 464 с.
5. *Власов, С. В.* Основы технологии переработки пластмасс / С. В. Власов. – М. : Химия, 2004. – 600 с.
6. *Бортников, В. Г.* Производство изделий из пластических масс : учеб. пособие для вузов. В 3 т. Т. 2. Технология переработки пластических масс / В. Г. Бортников. – Казань : Дом печати. 2002. – 399 с. – ISBN 5-94259-056-7.

Справочная литература

1. *Каменев, Е. И.* Применение пластических масс : справ. / Е. И. Каменев. – Л. : Химия, 1985. – 448 с.
2. *Калинчев, Э. Л.* Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий : справ. изд. / Э. Л. Калинчев, М. Б. Саковцева. – Л. : Химия, 1987. – 416 с.
3. Технические свойства полимерных материалов : учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Профессия, 2007. – 240 с.
4. *Цвайфель, Х.* Добавки к полимерам : справ. / пер. с англ. – 6-е изд.; под ред. В. Б. Узденского, А. О. Григорова. – СПб. : Профессия, 2010. – 1144 с.
5. *Пантелеев, А. П.* Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс / А. П. Пантелеев, Ю. М. Шевцов, И. А. Горячев. – М. : Машиностроение, 1986. – 400 с.

Дополнительная литература

1. Основы технологии переработки пластмасс : учеб. для вузов / С. В. Власов, Л. Б. Кандырин, В. Н. Кулезнев [и др.]. – М. : Химия, 2004. – 600 с.
2. Выявление и устранение проблем в экструзии / К. Раувендааль, М.Д. Пилар Норьега Е., Х. Харрис ; пер. с англ. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2011. – 368 с.
3. Унгер, П. Технология горячеканального литья : пер. англ. / П. Унгер ; под ред. В. Г. Дувидзона. – СПб. : Профессия, 2009. – 208 с.

Учебное издание

ПАНОВ Юрий Терентьевич
ЧИЖОВА Лариса Анатольевна
ЕРМОЛАЕВА Елена Вадимовна

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ЭКСТРУЗИЯ. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Учебное пособие

Подписано в печать 21.03.13.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 7,44. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.