

*Н.Ефремов*

# **Тара**

*и ее производство*

Министерство образования Российской Федерации  
Московский государственный университет печати

**Н. Ф. Ефремов**

# **ТАРА И ЕЕ ПРОИЗВОДСТВО**

*Второе издание, дополненное*

*Учебное пособие для студентов,  
обучающихся по специальности  
072500 «Технология и дизайн  
упаковочного производства»,  
281400 «Технология полиграфического  
производства», и слушателей ФПК*

*Рекомендовано  
Учебно-методическим объединением  
по образованию в области полиграфии  
и книжного дела для межвузовского использования*

Москва  
2001

УДК 621.798.1

ББК 30.61

Е 92

Рецензенты:

д. т. н., профессор кафедры технологии печатных  
и послепечатных процессов МГУП *В. П. Митрофанов*;

руководитель центра подготовки и переподготовки  
кадров ассоциации «Союзупак» профессор *М. Е. Чернов*

Е 92 **Ефремов Н. Ф.**

Тара и ее производство: Учебное пособие. — 2-е изд., доп. —  
М.: МГУП, 2001. — 312 с.

ISBN 5-8122-0274-5

В пособии приводятся сведения об основных функциях упаковки и их взаимосвязи с комплексом технических требований к таре, этапах разработки тары и упаковки и оптимизации ее конструктивных особенностей, о классификации тары и упаковки, рассмотрены основные материалы для производства тары. Изложены технологические особенности основных способов производства тары, в которых преобладают полиграфические операции: производство мягкой тары из пленочных материалов и складных коробок и ящиков из картона и из гофрокартона.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, готовящих специалистов в области производства и применения тары и упаковки, а также может быть полезным инженерно-техническим и научным работникам упаковочной индустрии.

УДК 621.798.1

ББК 30.61

ISBN 5-8122-0274-5

© Н. Ф. Ефремов, 2001

© Оформление.

Московский государственный  
университет печати, 2001

*Учебное издание*

**Николай Федорович Ефремов**

**ТАРА И ЕЕ ПРОИЗВОДСТВО**

*Учебное пособие*

Ответственный за выпуск

*В. И. Жукова*

Корректор

*Г. И. Кострикова*

Компьютерный набор

*Т. Н. Гормылева*

Компьютерная верстка и графика

*В. М. Кораблёв*

ЛР № 020232 от 20.08.97.

Сдано в набор 11.01.01. Подписано к печати 02.04.01.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Гарнитура *Bookman*С. Печать на ризографе.

Усл. печ. л. 18,2. Уч.-изд. л. 19,0. Тираж 300 экз.

Изд. № 410. Заказ № 379/334 — 3-ий завод (2003 г.).

---

Издательство МГУП.

Отпечатано в ИПК МГУП.

127550, Москва, ул. Прянишникова, 2а.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

Введение .....	3
1. Основные функции упаковки .....	8
2. Классификация тары и упаковки .....	23
3. Особенности разработки тары и упаковки .....	42
4. Основные полимерные материалы для производства тары .....	62
4.1. Классификация и общая характеристика .....	63
4.1.1. Классификация по химической структуре .....	64
4.1.2. Классификация по методам синтеза .....	65
4.1.3. Классификация по физической структуре .....	67
4.2. Механические свойства .....	78
4.2.1. Деформационные свойства .....	81
4.2.2. Прочностные свойства .....	89
4.2.3. Стандартные показатели механических свойств .....	95
4.3. Технологические свойства .....	103
4.4. Полимерные пленочные материалы .....	115
4.4.1. Основные виды полимерных пленок .....	118
4.4.2. Основные способы производства полимерных пленок .....	122

5. Производство мягкой тары .....	146
5.1. Мягкая потребительская тара .....	147
5.2. Сварка мягкой тары .....	156
5.2.1. Основные методы сварки .....	159
5.2.1.1. Контактно-тепловая сварка .....	162
5.2.1.2. Термоимпульсная сварка .....	172
5.2.1.3. Высокочастотная сварка .....	176
5.2.1.4. Ультразвуковая сварка .....	183
5.2.2. Типы сварных соединений и швов .....	190
5.2.3. Основы расчета сварных соединений на прочность .....	198
5.3. Расчет расхода материалов на производство мягкой тары .....	207
6. Производство складных коробок и ящиков из картона и гофрокартона .....	210
6.1. Основные требования к складным коробкам и ящикам .....	211
6.2. Конструкции складных коробок и ящиков .....	215
6.3. Стадии проектирования складных коробок .....	235
6.4. Технология производства складных коробок из картона и гофрокартона .....	238
6.4.1. Штанцевание .....	244
6.4.1.1. Высечка .....	246
6.4.1.2. Рицовка .....	255
6.4.1.3. Перфорация .....	256
6.4.1.4. Биговка .....	258
6.4.2. Штанцевальные формы .....	272
6.4.2.1. Штампы .....	273
6.4.2.2. Контрштампы .....	302
Список литературы .....	306

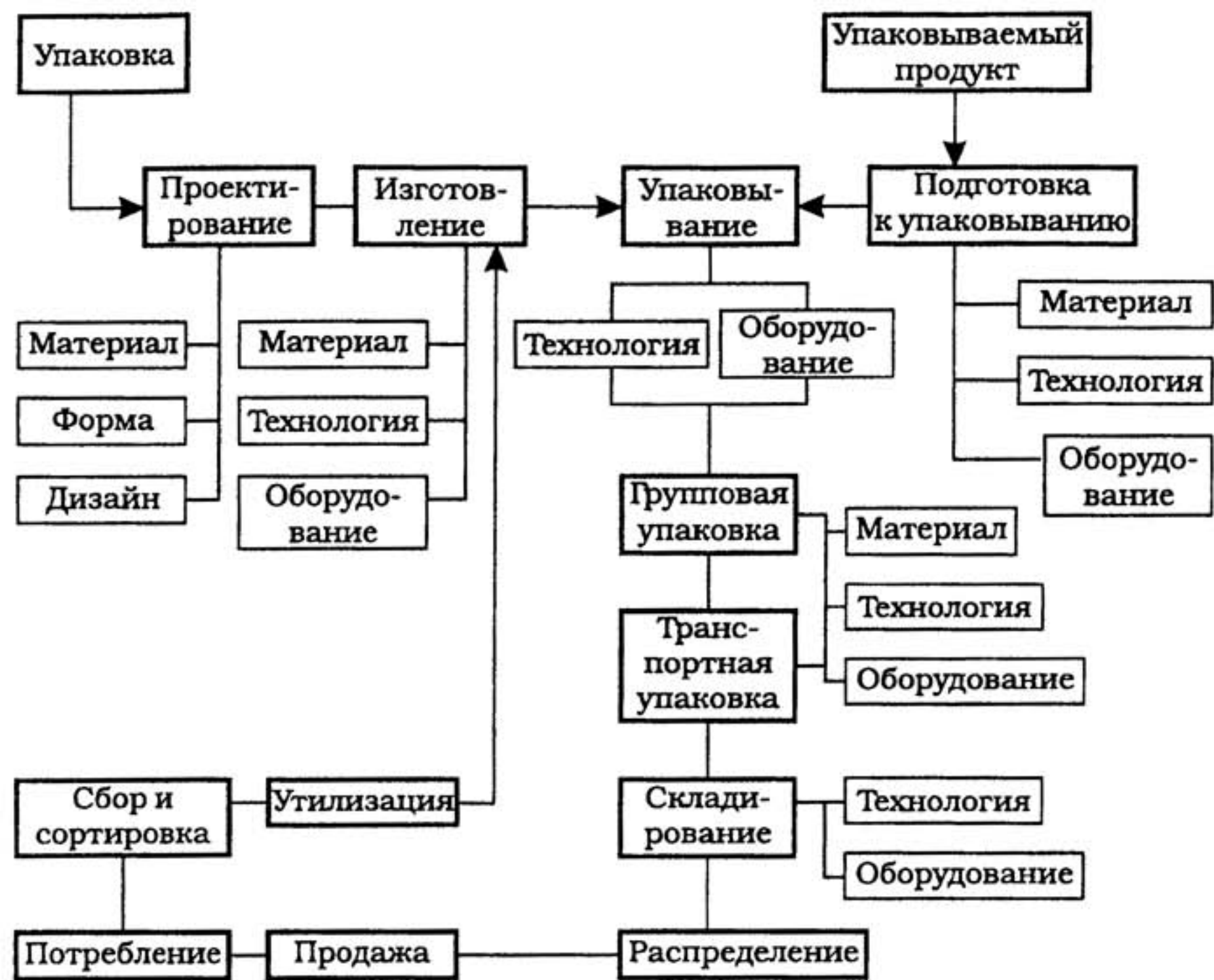
# ВВЕДЕНИЕ

---

Двадцатый век характерен бурным развитием науки и техники. Как следствие, во многих отраслях промышленности периодически возникают новые профессии, о которых раньше было трудно даже предполагать. По уровню производства конец XX столетия несопоставим с началом и даже с серединой столетия. Поэтому совершенно естественным являются требования к подготовке инженеров новых специальностей. По своей сути инженеры будущего должны иметь и принципиально новый образовательный уровень. Помимо точных технических знаний для формирования инженера-творца, инженера-новатора требуется освоение психологических, философских, экономических, социологических знаний. Особую актуальность приобретает гуманизация инженерной деятельности [20]. Одной из новых инженерных специальностей с подобной направленностью подготовки является специальность 072500 «Технология и дизайн упаковочного производства».

Гуманизация инженерной подготовки этой специальности представляется процессом естественным и неизбежным. По совокупности изучаемых дисциплин ее нельзя отнести к какой-либо одной отрасли промышленности. Да и по своей сути упаковка продукции играет важнейшую роль в цепочке производство — хранение — транспортировка — реализация практически для всех отраслей промышленности. Поэтому можно заключить, что специальность «Технология и дизайн упаковочного производства» является межотраслевой.

Необычайную широту и разнообразность охватываемых технологий, процессов, материалов и оборудования на различных стадиях жизненного цикла упаковки удобно рассмотреть с помощью прилагаемой схемы.



Стадии жизненного цикла упаковки

Весь жизненный цикл упаковки можно условно разделить на три периода: получение упакованной продукции, путь упакованной продукции до потребителя и утилизация использованной тары и упаковки.

На первом периоде — получения упакованной продукции — тару и упаковку рассматривают главным образом как техническое изделие, к которому предъявляют определенный комплекс технических требований.

Во время второго периода — пути упакованной продукции до потребителя — тара и упаковка выполняют роль товара, поэтому характеризуются уже другими показателями, присущими товару и самому процессу товародвижения.



К моменту наступления третьего периода тара и упаковка, выполнив на предыдущих периодах свои основополагающие функции, превращаются в отходы. Теперь на первое место выходят требования к удобству переработки отходов тары и упаковки, к способности их утилизации — употреблению с пользой для общества.

Период получения упакованной продукции базируется на взаимосвязанном движении двух материальных потоков: потока тары и упаковки и потока упаковываемого продукта.

Поток тары и упаковки основывается на материалах для ее изготовления. Круг таких материалов необычайно широк: это и разнообразные виды и сорта бумаги и картона, это и различные полимерные материалы, это и металлические сплавы, преимущественно на основе железа и алюминия, это и разные типы стекла и керамики, это и практически все виды деловой древесины. С учетом комплекса специфических требований к упаковке подавляющее большинство этих материалов производят по специальной технологии, целенаправленно для изготовления тары и упаковки.

Этап проектирования тары и упаковки требует наибольшей гуманизации в технической подготовке инженеров. Специалист должен в совершенстве владеть технологическими и конструктивными аспектами материаловедения, умело использовать основные законы сопромата, свободно ориентироваться в тонкостях технологии и оборудования для изготовления тары и упаковки, а также и самого процесса упаковывания. На выбор материала, формы и конструкции тары и упаковки решающее значение оказывают и свойства упаковываемого продукта, и технология его подготовки к упаковыванию. Кроме того, конструкция тары и упаковки должна отвечать техническим требованиям процесса товародвижения упакованной продукции до потребителя — способностью к групповой упаковке, удобству при транспортировке, складировании, продаже и потреблении.

Помимо указанных чисто научно-технических аспектов при проектировании тары и упаковки не менее важными являются и вопросы эстетические, социально-технические, экономические и философские.

Эстетическая сторона при проектировании формы и дизайна тары и упаковки не менее важна, чем чисто техническая сторона. От этой части проектирования зависят и экономические аспекты изготовления тары и упаковки, и проблемы маркетинга упакованной продукции, ее распределения, продажи и потребления. Следует отметить, что технические и гуманитарные аспекты в процессе создания тары и упаковки должны не вступать в противоречия, а органично дополнять друг друга. Только в этом случае возможно создание конкурентоспособной продукции.

Этап изготовления упаковки базируется на трех фундаментальных составляющих. Прежде всего это наука о технологических свойствах материалов тары и упаковки. Затем — представление о различных технологических процессах переработки материалов в требуемые изделия, о взаимосвязи конструктивных особенностей тары и упаковки с конкретными способами ее изготовления. И наконец — комплекс знаний о различных видах технологического оборудования, оснастки и приспособлений для производства тары и упаковки.

Физико-химические свойства и особенности агрегатного состояния упаковываемого продукта определяют технологию его подготовки к упаковыванию. Этап подготовки продукта к упаковыванию основан на трех фундаментальных понятиях — материале, технологии, оборудовании. Но это уже совершенно другие научные дисциплины и понятия, нежели на этапе изготовления тары и упаковки. Так, помимо представлений об исходных физических и химических свойствах упаковываемого продукта и их влиянии на материал и конструкцию тары и упаковки необходимы знания о микробиологических, физических и химических процессах, протекающих в продукте во времени под влиянием разнообразных факторов. Только при таком комплексном анализе возможны выбор оптимальной технологии подготовки продукта к упаковыванию, использование в этой технологии новейшего оборудования.

Процесс упаковывания основан на сочетании технологии заполнения продуктом тары, снабженной необходимыми вспомогательными средствами, последующей укупорки, закрывания упаковки, с оптимальной конструкцией необходимого оборудо-

вания. Выбор технологии и оборудования обусловлен конструктивными особенностями тары, свойствами упаковываемого продукта и технологией его подготовки к упаковыванию.

На втором периоде жизненного цикла упаковки — пути упакованной продукции до потребителя, — включающем этапы ее последовательного размещения в групповой и транспортной упаковке, транспортирования, складирования, распределения по торговой сети, продажи и использования потребителем, каждый этап характеризуют основные базовые понятия: материал, технология, оборудование. Следует подчеркнуть, что, как и на первом периоде, каждому этапу соответствуют свои, отличные от других этапов, разделы этих основных базовых понятий.

Свои разделы в науке о материалах, технологии и оборудовании соответствуют и третьему периоду жизненного цикла упаковки — сбору, сортировке и утилизации отходов использованной упаковки.

Учебное пособие «Тара и ее производство» направлено на изучение общих особенностей этапов проектирования и изготовления тары и упаковки.

# 1. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ УПАКОВКИ

---

---

Упаковка должна экономить больше, чем она стоит.

*Рубен Раусинг,  
основатель фирмы  
«Тетра Пак»*

В историческом плане первыми функциями упаковки были предохранение продуктов или изделий от порчи и обеспечение возможности их транспортировки с сохранением высокого качества. Проблемы упаковки традиционно занимали важное место в жизни как отдельного человека, так и общества в целом. Многие важнейшие открытия и достижения человечества были широко использованы именно для развития упаковки. Можно привести многочисленные примеры из разнообразных областей науки и техники. Это и разработка новых материалов, и создание новых технологий для производства упаковки из дерева, глины, фарфора, стекла, металлов, пластмасс и т. д. Это и широкое использование автоматизированной техники как для изготовления упаковки, так и для процессов упаковывания продукции. Это и создание новых технологий длительного сохранения продуктов...

В современной жизни упаковка прочно вошла в наш быт и сопровождает человека на всех стадиях его деятельности. Она во многом изменила наш жизненный уклад, позволила по-новому взглянуть на многие проблемы, например, питания. По

состоянию развития упаковочной индустрии стали судить об экономическом и техническом уровне той или иной страны. Наиболее развитые страны вкладывают значительные средства в эту сферу. Так, ежегодные расходы в США на упаковку превышают 52 млрд. долларов, в Германии — 33 млрд. марок (около 20 млрд. долларов США). Среднегодовые расходы на упаковку во всем мире составляют от 450 до 500 млрд. долларов США [49, 50].

Со временем значительно изменились функции упаковки. Теперь они не ограничиваются предохранением изделий, сохранением их качеств и обеспечением гигиеничности. К упаковке предъявляют требования облегчения обращения с товарами, обеспечения максимальной экономичности процессов упаковывания и обработки товаров при их распределении, транспортировке, складировании и перемещении в магазинах.

Упаковка должна информировать потребителя о составе, характеристиках, способе употребления продукта. Она становится мощным средством рекламы и маркетинга продукции, нацеленным на продвижение товаров на конкурентный рынок [23]. Благодаря удачной упаковке расширяется объем продажи продукции, открываются перспективы роста производства, увеличения прибыли. При близких характеристиках однородных продуктов качественная упаковка играет определяющую роль в формировании у потребителя решения о покупке товара. Не случайно многие рекламные сообщения концентрируют внимание потенциальных покупателей не на собственно продукте, а на продукте в упакованном виде. В ряде случаев продукт рекламируют за счет представления в выгодном свете именно качеств его упаковки, например, возможности ее повторного использования после опорожнения.

По своей сути упаковку следует рассматривать не просто как средство содержания изделия, но в более широком смысле как систему взаимосвязи производителя, продавца и потребителя товаров. Это предъявляет к упаковке целый комплекс требований. Она должна обеспечить выполнение операций специальной обработки продукции, ее дозирования и укупорки. Кроме того, от упаковки требуется обеспечение длительного хранения продукции, удобства транспортировки, размещения на

витринах, прилавках магазинов, складирования. Упаковке необходимы привлекательный внешний вид, способствующий повышению конкурентоспособности и облегчающий продажу, удобство использования покупателем. Ряд новых требований выдвигается к упаковке в процессе развития и совершенствования упаковочной индустрии.

Основными функциями упаковки являются защитная, дозирующая, транспортная, хранения, маркетинговая, нормативно-законодательная, экологическая, информационная и эксплуатационная (рис. 1.1).

Под **защитной функцией** понимают способность упаковки сохранять качество упакованного продукта в течение заданного времени в определенных условиях.

Защитная функция должна предусматривать в конструкции упаковки меры по защите упаковываемого продукта от влияния климатических факторов, от повреждений и порчи при транспортировке и хранении, а также по защите окружающей среды и человека от негативного воздействия упакованного продукта. Защитная функция особую актуальность и важность имеет при упаковке пищевых продуктов. Влияние



Рис. 1.1

климатических факторов на снижение качества пищевых продуктов приведено в табл. 1.1 [41].

Потери пищевых продуктов из-за неудовлетворительной упаковки в США за 1995 г. составили 3% для консервной продукции и 10–15% для свежей и охлажденной [4]. Эти потери могут быть существенно сокращены за счет подбора соответствующей упаковки, способной в полной мере выполнять защитную функцию. Особые надежды возлагают на многослойную упаковку из полимерных материалов, содержащую непроницаемые для различных веществ барьерные слои. Материалы с барьерными слоями, используемые в настоящее время, практически исключают попадание нежелательных веществ в упакованный продукт. Основные виды защиты и новые упаковочные материалы для некоторых пищевых продуктов приведены в табл. 1.2.

Современная технология производства пищевых продуктов предусматривает различные виды обработки и последующего хранения продукции в упаковке. На рис. 1.2 схематично показано, как некоторые способы технологической обработки скоропортящихся пищевых продуктов влияют на продолжитель-

Таблица 1.1

**Влияние климатических факторов на свойства пищевых продуктов**

Климатический фактор	Вызываемая реакция	Изменение качества
Кислород воздуха	Окисление	Изменение цвета овощей и фруктов, разрушение эфирных масел, прогоркание жиров
Влага	Абсорбция, катализ	Образование комков, размягчение, гидролитическое прогоркание жиров, энзимологическая и микробиологическая порча
Свет	Фотодеструкция	Разрушение чувствительных к свету витаминов А, Е, К, В2, В6, В12, С. Обесцвечивание пищевых продуктов, окислительное прогоркание жиров
Температура	Изменение скорости реакции	Повышение температуры на 10° увеличивает скорость химических реакций в 2–3 раза и снижает срок хранения

**Основные виды защиты и упаковочных материалов  
для некоторых упаковываемых продуктов**

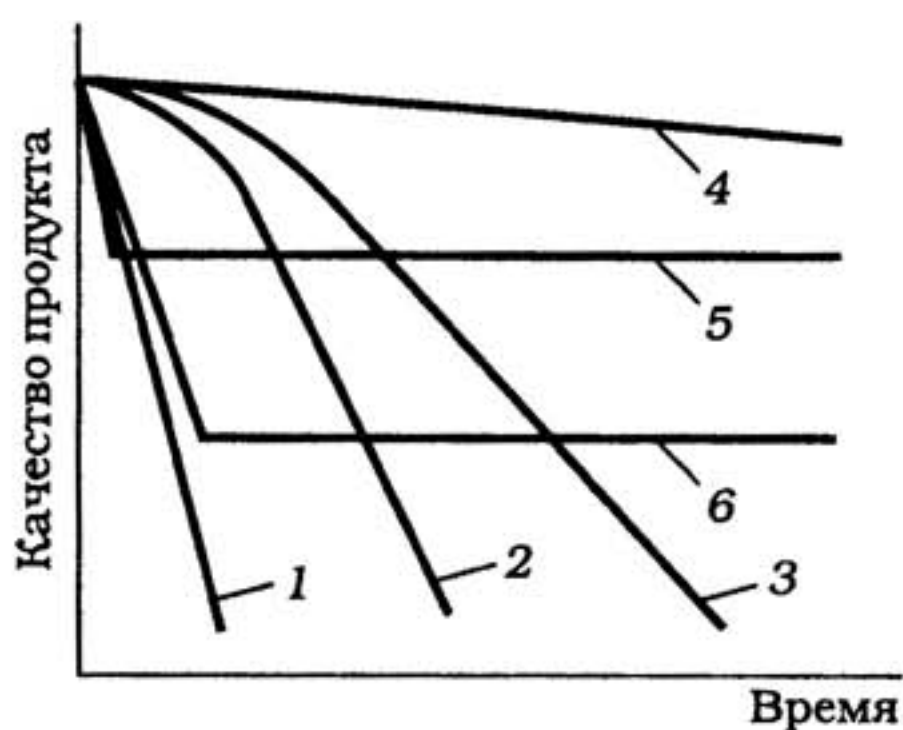
Упаковываемые продукты	Вид защиты	Основные типы упаковочных материалов
Гигроскопические и сыпучие (соль, сахар и др.)	Защита от увлажнения	Бумага с полиэтиленовым покрытием, тканевые мешки с полиэтиленовым вкладышем. Бумага-фольга-полиэтилен (порционная упаковка для длительного хранения в жестких условиях)
Продукты сублимационной сушки (например, креветки, овощи, фрукты и др.)	Защита от влаги, кислорода, света, посторонних запахов, желательна в атмосфере инертного или защитного газа	Непрозрачные многослойные ламинаты, содержащие алюминиевую фольгу или слои металлизированных полимерных пленок
Пряности, приправы (перец, корица, гвоздика и др.)	Защита от потери ароматических веществ и от окисления летучих органических соединений	Ламинаты типа ОПП-ПВДХ или ОПП-ПП (для краткосрочного хранения); ламинаты, содержащие алюминиевую фольгу или металлизированные полимерные слои
Рыбная или мясная кулинария, колбасы, сыр	Защита от всех факторов внешней среды (в том числе от микроорганизмов). Среда — инертный или защитный газ	Барьерные ламинаты, содержащие алюминиевую фольгу. Если предусмотрен разогрев в упаковке, то вместо фольги используют сополимеры EVOH или ПВДХ
Замороженные готовые	Защита от влагообмена, действия кислорода. Обеспечение прозрачности для микроволн (для разогрева), морозостойкость	Картонные лотки с полимерным покрытием, лотки из кристаллического ПЭТФ, пакеты из полимерных комбинированных пленок
Консервы, стерилизованные при температуре выше 100 °С	Обеспечение максимальной герметичности, термостойкость не ниже 120–125 °С	Ламинаты с максимально возможными барьерными свойствами, содержащие алюминиевую фольгу. В случае разогрева продукта в микроволновой печи в ламинаты вместо фольги вводят слои EVOH или другого высокобарьерного полимера



ность сохранения их качества [4]. Использование модифицированной газовой среды в сочетании с охлаждением позволяет значительно увеличить срок хранения пищевого продукта. Термическая стерилизация или асептическое консервирование могут еще больше увеличить срок хранения, но в этом случае продукт претерпевает заметные изменения из-за теплового воздействия. Термическое воздействие рекомендуют главным образом в случаях, когда оно служит операцией кулинарной обработки упаковываемого продукта.

При термической стерилизации, асептическом консервировании и применении модернизированной газовой среды упаковка должна служить барьером, защищающим продукт от возможного вторичного загрязнения микроорганизмами или утечки защитного газа в процессе хранения.

Стремительный прогресс упаковочной промышленности привел к ряду новых представлений об упаковке. Одно из них — возможность стандартизации количества содержимого в пакете. Единообразная система упаковки позволяет ку-



*Рис. 1.2. Изменение качества*

*скоропортящихся продуктов по времени:*

*1 — хранение при комнатной температуре на воздухе;*

*2 — хранение при охлаждении в обычной атмосфере;*

*3 — хранение при охлаждении в модифицированной газовой среде;*

*4 — хранение при быстром замораживании;*

*5 — асептическое консервирование;*

*6 — термическая стерилизация*

пить без дополнительного взвешивания в магазине 250 г масла, 125, 250, 500, 1000 г молочных продуктов и т. д. В дополнение к другим функциям упаковка стала измерителем количества продукта, выполняя **дозирующую функцию**.

Под **транспортной функцией** понимают способность упаковки к удобной перевозке упакованной продукции определенным видом транспорта на заданное расстояние в течение установленного времени в определенных условиях.

Различают наземный, водный и воздушный виды транспорта. К наземным видам транспорта относят железнодорожный и автомобильный, к водным — морской и речной, к воздушным — авиационный и космический.

Транспортная функция предполагает оптимизацию конструкции упаковки с наиболее рациональным видом транспорта, маршрутом транспортировки и свойствами упаковываемого материала. Важным фактором является максимальное использование полезной площади грузового транспортного средства. При комплектовании партии транспортируемого груза следует учитывать существование совместимых и несовместимых упакованных материалов.

Для перевозки изделий, например, жидкости или порошка, от места изготовления до пункта использования необходим контейнер или емкость. В условиях производства такая продукция хранится, как правило, в больших резервуарах различного типа. Ее нужно расфасовать в емкости, удобные для транспортировки и продажи. Важную роль в определении объема емкостей играют условия торговли. Оптовая торговля требует более крупных объемов. Розничная торговля отдает предпочтение уменьшению объемов.

Тенденция сокращения размеров упакованной продукции, удобной в условиях оптовой торговли, приводит к системе групповой упаковки, облегчающей транспортировку. Такая система предусматривает комплектование упакованных в маленькие коробки, банки или бутылки продуктов в определенные по количеству и размерам группы. Эти группы упаковывают различными способами в коробки, связки, термоусадочную полимерную пленку, ящики и т. п. и далее собирают в партии для отгрузки потребителю.

В большинстве случаев упакованный товар не может быть использован немедленно. Он может храниться либо на складе у производителя, либо у продавца, либо у покупателя. Поэтому упаковка должна обеспечить сохранение всех свойств товара в течение длительного времени. Современные материалы и технология упаковки открывают широкие перспективы разработки и применения специальных методов увеличения сроков хранения продукции, таких, как сублимация, охлаждение, стерилизация и т. п.

Выполнение **функции хранения** требует от конструкции упаковки простой и четкой маркировки, возможности штапелирования на стандартных поддонах и оптимального использования площади складских помещений [21]. В случаях длительного хранения следует учитывать необходимость контроля и проверки качества упакованной продукции.

Упаковка, выполняя **функцию маркетинга**, эффективно используется как средство продвижения товара на потребительский рынок. Различают три основные причины, из-за которых значение упаковки в системе маркетинга неуклонно возрастает:

- 1) растущие требования потребителей к удобству пользования продуктом;
- 2) конкуренция за более престижные места на прилавках магазинов;
- 3) использование упаковки для рекламы продукта на месте продажи [23].

Упаковка, представляя продукт, должна быть прежде всего привлекательной за счет умелого дизайна и высокого качества полиграфического оформления. Сочетанием внешнего вида и содержащейся информации она способствует идентификации — установлению соответствия распознаваемого предмета своему образу, знаку (идентификатору).

Идентификация содержимого подбором соответствующей формы упаковки, ее художественного оформления и возможностью визуального обозрения была освоена давно. Постепенно это превратилось в одну из главных функций упаковки. Использование символов, торговых марок, фирменных знаков и

различной информации помогает установить связь между потребителем и изготовителем. Товар с фирменной торговой маркой должен моментально узнаваться покупателем. Известные фирменные марки, кроме того, показывают отличительные свойства продукта, дают гарантии высокого качества, держат продукцию в центре внимания. Они помогают избежать путаницы с конкурентами, показывают соответствие продукта его качеству.

Важными элементами идентификации являются форма и цвет упаковки. Они могут отличать продукт от конкурентов. Так, картофельные чипсы Pringles плотно упакованы в цилиндрические коробки. Это их отличает от других чипсов в пакетах из полимерных пленок. Сыр Edam имеет сферическую форму и красную восковую оболочку. Он часто не маркируется, поскольку комбинация форма — цвет уже несет информацию об этом продукте. Более подробно с вопросами идентификации и другими аспектами использования упаковки в качестве инструмента маркетинга можно ознакомиться в работе [36].

**Нормативно-законодательная функция** упаковки является как бы производной от других функций. Так, в процессе выполнения функций защиты и хранения сложился комплекс санитарно-гигиенических требований к упаковке. В настоящее время во многих странах существует специальное законодательство, строго регламентирующее предельное содержание в упаковочных материалах компонентов и примесей, которые могут мигрировать в продукт. Оно направлено на исключение возможности перехода вредных веществ из упаковки в продукт в количествах, оказывающих влияние на организм потребителя. Любой упаковочный материал может быть использован в пищевом производстве только после получения соответствующего разрешения государственных органов санитарно-гигиенического контроля. Дозирующая функция неразрывно связана с привлечением к упаковке нормативного закона мер и весов. Для наиболее распространенных типов упаковки разработаны соответствующие нормативные документы — технические условия и ГОСТы.

**Экологическую функцию** упаковки можно рассматривать как научное и практическое направление рационального ис-

пользования обществом упаковки в свете взаимодействия с окружающей средой.

Экологическая функция упаковки в последние годы приобретает все более важное значение. По мере увеличения темпов производства возникают проблемы уничтожения использованной упаковки. Это связано с медленной скоростью ассимиляции (усвоения) природой под естественным воздействием света, тепла, влаги, микроорганизмов материалов использованной упаковки. Особые проблемы возникают с полимерными материалами, период ассимиляции которых достигает 80 лет.

Наиболее промышленно развитые страны Европы и Америки испытывают большие трудности с утилизацией использованной тары. Так, в США, например, ежегодно в городском мусоре оказывается около 50 млн. тонн отходов упаковки, из которых 12% приходится на полимеры. Более 80% этих отходов зарывают в землю. В стране имеется около 6000 мест захоронения отходов, что оказывает негативное воздействие на состояние окружающей среды. Во Франции отходы составляют примерно 19 млн. тонн в год, из которых 50% сжигают, а 40% зарывают в землю [4].

По данным гидрологов, обследовавших большие окрестности площадью до 50 га старых мусорных свалок, закрытых более 20 лет назад, подземные воды в этой зоне содержат в 10–20 раз больше Na, в 4–60 раз  $Cl_2$ , в 2–3 раза  $H_2SO_4$ , Sr, ... Грунт обогащен Pb, Zn, Cu, Cr, Ni. Загрязнение распространяется на расстояние 2 км [41].

Решают экологические проблемы использованной упаковки различными путями: увеличение объемов многооборотной потребительской тары; сбор и вторичная переработка традиционными способами; использование полимерных материалов, способных растворяться и в растворе подвергаться вторичной переработке; сжигание с использованием фильтров и аппаратов, улавливающих вредные летучие продукты; разработка и использование для упаковки пищевых продуктов съедобных и самодеструктурирующихся упаковочных материалов. Самодеструктурирующиеся или саморазрушающиеся полимерные материалы подразделяют на биоразлагаемые, разрушающиеся

под действием света, и разлагаемые химическим путем [11]. Наиболее перспективно получение таких материалов из природного крахмала, картофеля и зерновых культур. Важное значение приобретает повторное использование переработанных полимеров — вторичных материалов.

В практическом отношении вопросы утилизации использованной тары лучше всех решены в Германии. В стране уже много лет налажена система сортировки тары населением. Граждане помещают использованную тару в специализированные контейнеры, предназначенные для тары из определенных видов материалов, совместимых между собой в процессе их вторичной переработки. Кроме того, широко используется многооборотная тара, стабильно действует технологическая цепочка по ее повторному использованию.

В Германии созданы специализированные фирмы, занимающиеся экологическими проблемами в области производства изделий, в том числе и тары из полимерных материалов. Эти фирмы совместно с крупнейшими компаниями по производству полимеров и упаковочных материалов, а также учебными и исследовательскими организациями заняты изучением оптимальных путей утилизации или уничтожения отходов полимерной упаковки. В центре внимания этих организаций оказались проблемы термической деструкции отходов упаковки до исходных сырьевых продуктов с последующим получением из них новых полимерных изделий, а также вопросы сжигания полимерных отходов для получения тепловой энергии.

**Информационная функция** упаковки приобрела важное значение в процессе развития формы самообслуживания в розничной торговле. Носящая достаточно информации о продукте, приятная на внешний вид упаковка часто служит единственным «продавцом» в магазинах самообслуживания. Особенно важное значение приобретает упаковка для новых продуктов, еще не известных покупателю. В этом случае она должна завершать весь цикл сбыта — привлекать внимание, стимулировать интерес, вызывать желание и побуждать к покупке продукта. Также задачи решаются посредством передачи информации потребителю. Эта информация должна отражать новизну продукта, его отличие от аналогов, подчеркивать его особенности.

Информацию на упаковке можно разделить на произвольную и обязательную. К произвольной информации относят разнообразные элементы художественного оформления, рекламу и т. п. Обязательная информация регламентирована нормативными документами на упаковываемый продукт. Она включает основные технические характеристики продукта, например, список важнейших его компонентов, руководство по применению, хранению и уходу, предупреждения о возможных противопоказаниях, опасностях и т. п.

**Эксплуатационная функция** упаковки предполагает легкость обращения с ней в процессе сортировки, хранения, перемещения и сбыта, а также удобство для потребителя в использовании упакованного продукта. Опросы покупателей показывают, что им импонирует упаковка, которую можно использовать повторно, которую можно легко открыть, которая является оригинальной и привлекательной, соответствующей пониманию красоты потребителем.

Для выполнения каждой из перечисленных функций упаковка должна отвечать определенному комплексу требований. Так, например, защитная функция предъявляет к упаковке требования по обеспечению необходимых показателей теплоустойчивости, морозостойкости, герметичности, коррозионной и химической стойкости, защиты от пыли, сохранения массы, стабильности формы, долговечности, ударной прочности, прочности при сжатии и разрыве, способности к амортизации ударов. Шесть последних показателей наряду со специфическими другими, такими, как экономия транспортной и складской площади и пространства, устойчивость при скольжении, пригодность к штабелированию и автоматизированной обработке, унификация по конструкции и размерам, способность к групповой упаковке, удобство в обращении, легкость открывания, способность повторно закрываться, важны и для транспортной функции, и для функции хранения. Пять последних требований предъявляет к упаковке и эксплуатационная функция. Маркетинговая функция прежде всего диктует технико-экономические показатели упаковки, требования по экономии пространства и площади при транспортировке, складировании и продаже, а совместно с информационной функцией

выдвигает требования по предоставлению рекламы, информации, а также по наличию элементов идентификации и индивидуальных особенностей упаковки. Экологическая функция рассматривает медико-гигиенические требования к материалам, продукции и упаковке в целом, возможности повторного использования тары, удобство утилизации и другие экологические аспекты. Анализ соответствия функций и требований к упаковке приведен в табл. 1.3. Системный учет таких требований служит основой при подходе к вопросу целенаправленного создания упаковки.

Помимо требований, продиктованных функциональным назначением, при создании тары и упаковки следует учитывать и комплекс требований к упаковке, обусловленных упаковываемым продуктом, заказчиком и производственными условиями (рис. 1.3). Материал и конструктивное исполнение упаковки зависят от агрегатного состояния продукта — твердого, жидкого или газообразного, а также от его особенностей — температуры, давления, вязкости, размера частиц и т. п. Агрегатное состояние упаковываемого продукта и его особенности влияют на выбор материала и конструктивные особенности

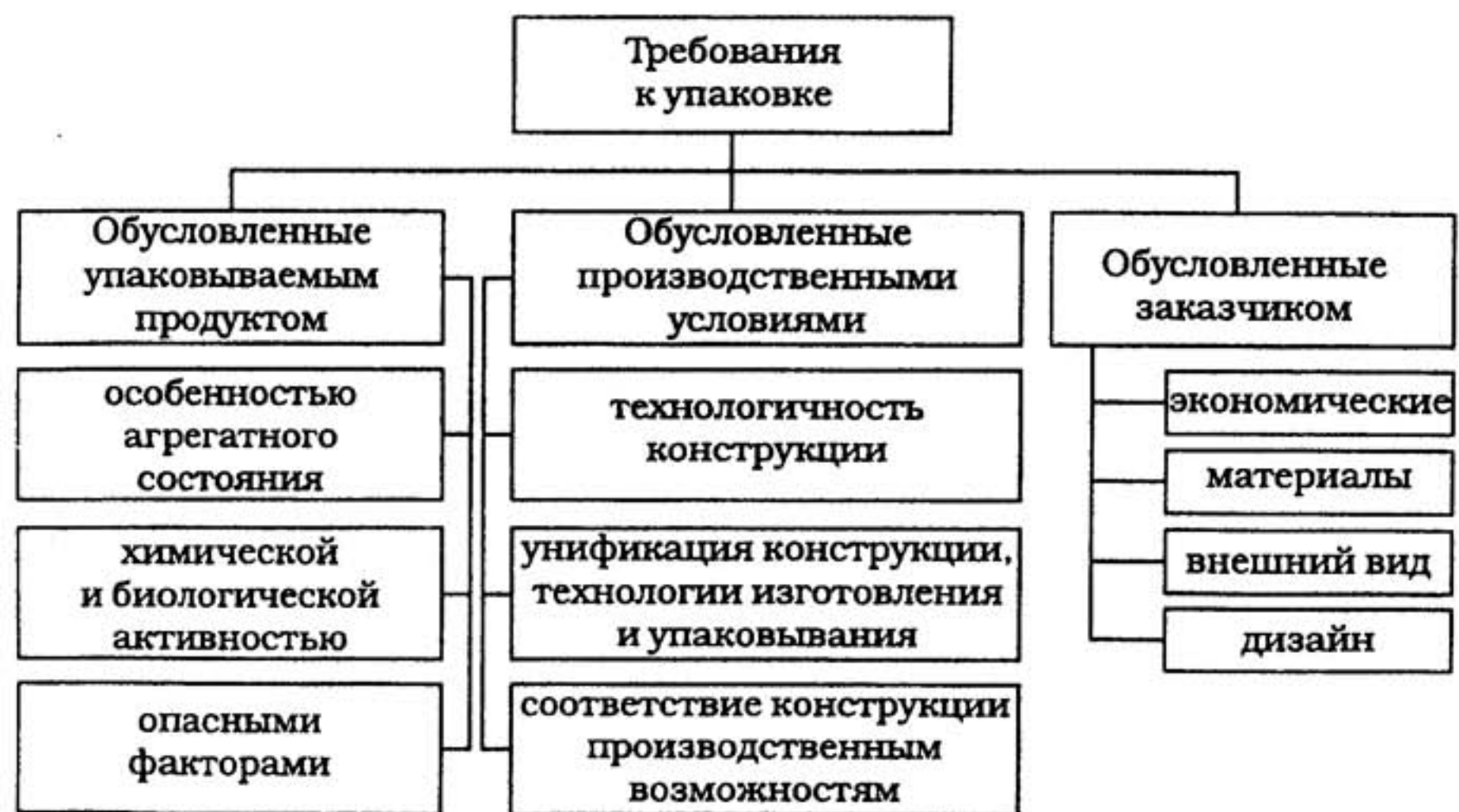


Рис. 1.3



## Соответствие функций и требований к упаковке

Функции упаковки		Требования к упаковке
Защитная		Теплостойкость, морозостойкость Герметичность Коррозионная стойкость Химическая стойкость Защита от пыли Сохранение массы Негорючесть
	Транспортная, хранения	Стабильность формы Долговечность Ударная прочность Способность к амортизации ударов Прочность при сжатии Прочность при разрыве
Пригодность к штабелированию Устойчивость при скольжении Унификация		
Пригодность к автоматизированной обработке Способность к групповой упаковке Удобство в обращении Легкость открывания Способность повторно закрываться		
Экономия пространства Экономия площади		
Маркетинговая		Экономичность
	Информационная	Предоставление рекламы Предоставление информации Идентификационная способность Индивидуальные особенности
	Экологическая	Гигиеничность Возможность повторного использования Экологичность Удобство утилизации

упаковки не только напрямую, но и косвенно, поскольку от них зависят технология и аппаратное оформление процесса упаковывания. Совершенно очевидно, что тара и упаковка должны соответствовать требованиям технологии и конструкции упаковочного оборудования.

Технология упаковывания стремительно развивается. Так, в пищевой промышленности помимо традиционных методов упаковывания в последние годы во многих странах получили большое развитие быстрое замораживание, хранение в модифицированной газовой среде, стерилизация ионизирующим излучением, сублимационная сушка, асептические способы консервирования, микроволновый нагрев и т. п. Каждая из этих технологий непосредственно связана с определенной конструкцией упаковки и предъявляет к ней специфические требования.

Химическая и биологическая активность упаковываемого продукта определяет процессы, протекающие во время его контакта с упаковкой, а также поведение упакованной продукции по отношению к окружающей среде. От этих процессов зависит комплекс требований к материалу и конструкции тары и упаковки. Например, с точки зрения сохранения полезного комплекса свойств упакованных продуктов материал упаковки должен быть химически инертен и не вступать в химическое взаимодействие с продукцией ни в процессе транспортировки, хранения и продажи, ни в процессе эксплуатации, например, разогрева перед принятием пищи. Если пищевой продукт находится в непосредственном контакте с упаковочным материалом, необходима санитарно-гигиеническая оценка материала, основанная на результатах органолептических, санитарно-химических и токсикологических исследований.

Современная упаковка зачастую уже не является индифферентной по отношению к продукту, а активно воздействует на него, осуществляя определенные технологические функции. Такая «активная» упаковка может содержать добавки suscеptоров (усилителей микроволнового нагрева), поглотителей кислорода, консервантов, адсорбентов влаги и т. д. [4].

Требования заказчика в значительной степени определяют особенности упаковки: это и экономические условия, это и требования к внешнему виду и дизайну, а нередко — и определение материала. Требования изготовителя касаются вопросов технологичности конструкции, экономических и технологических возможностей, материалов и т. д. Не менее важным аспектом являются и требования унификации, определяющие взаимосвязь конструкции с важнейшими технико-экономическими показателями упаковки.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТАРЫ И УПАКОВКИ

---

---

Процесс изготовления тары и упаковки нельзя рассматривать в отрыве от процесса упаковывания продукции. Эти различные по сути и техническому оформлению процессы взаимосвязаны единством задач и методологии их выполнения (рис. 2.1). Результатом такого единства является получение упакованной продукции, способной длительное время сохранять высокое качество, решать основные задачи логистики, информации и маркетинга. При этом технология получения упакованной продукции по своей сути представляет совокупность комплексных технологических процессов, отдельные операции и переходы которых взаимосвязаны и часто выполняются в составе единой автоматизированной линии.

Взаимодействие материальных потоков, участвующих в процессе упаковки продукции, иллюстрирует аналитическая



Рис. 2.1. Логическая структура создания упаковки

---

структура упаковки (рис. 2.2). Из упаковочных материалов изготавливают основное упаковочное средство (нем. Packmittel), в которое впоследствии размещают продукцию, и вспомогательное упаковочное средство (нем. Packhilfsmittel), обеспечивающее защиту и сохранность продукции. Совокупность основного и вспомогательного упаковочных средств и представляет собой упаковку. Другой материальный поток составляет упаковываемый материал. По факторам, определяющим тип технологического процесса упаковывания и оборудования для его осуществления, различают заполняемый (жидкий, порошкообразный, гранулированный) и штучный материал. Встречаются оба материальных потока на операции упаковывания (нем. Verpacken), в результате которой получают упакованную продукцию (нем. Packung).

Основное упаковочное средство называют тарой. Помогает установить более четкое разграничение между понятиями «тара» и «упаковка» ГОСТ 17527–86 «Упаковка. Термины и определения» [42]. В нем под **упаковкой** (нем. Verpackung) пони-



Рис. 2.2. Аналитическая структура упаковки

мается средство или комплекс средств, обеспечивающих защиту продукции от повреждений или потерь, окружающую среду от загрязнений, а также обеспечивающих процесс обращения продукции. В процесс обращения включают стадии транспортирования, хранения и реализации продукции. Иначе говоря, упаковкой называют комплекс средств, обеспечивающих выполнение девяти рассмотренных выше функций: защитной, дозирующей, транспортной, хранения, маркетинговой, нормативно-законодательной, экологической, информационной и эксплуатационной.

Под **тарой** понимается основной элемент (или разновидность) упаковки, представляющий собой изделие для размещения продукции. Таким образом, если тара может самостоятельно выполнять весь комплекс требований к упаковке, то ее можно называть упаковкой. В большинстве случаев упаковкой следует называть совокупность тары и вспомогательного упаковочного средства. К **вспомогательным упаковочным средствам** относятся крышки, пробки, этикетки, прокладки, решетки, вкладыши, стяжные и липкие ленты, скрепки, клеи, покрытия, обертки и т. п.

*Тару и упаковку принято классифицировать по назначению, материалу, составу конструкции и технологии производства [34].*

**По назначению** тару и упаковку можно разделить на потребительскую, производственную, транспортную и специальную (консервирующую).

**Потребительская** тара и упаковка предназначена для продажи населению товара, является частью товара, входит в его стоимость, а после реализации товара переходит в полную собственность потребителя. Она, как правило, не выполняет функцию самостоятельного транспортирования и перевозится в транспортной таре.

Потребительская тара и упаковка должна предохранять товары от разрушения, деформаций, разливания, высыпания, усушки и других видов потерь. Ее конструкция, объем и прочие параметры зависят от свойств и конфигурации упаковываемой продукции, применяемого материала, способа изготовле-

ния, условий транспортирования, хранения и т. д. Она имеет ограниченную массу, вместимость и размеры. В большинстве случаев ее суммарный периметр не превышает 600 мм, т. е.  $L + B + H \leq 600$  мм, где  $L$  — длина;  $B$  — ширина;  $H$  — высота упаковки [34].

Наружные размеры потребительской тары должны быть увязаны с внутренними размерами транспортной тары с учетом требований к количеству (массе) продукции и схеме укладки:

$$L = A/k, \quad (2.1)$$

где  $A$  — внутренний размер транспортной тары для рассчитываемого размера потребительской тары ( $L, B, H$ );  $k$  — количество единиц потребительской тары в ряду для данного внутреннего размера транспортной тары.

Теоретические наружные размеры потребительской тары ( $L, B, H$ ) включают ее соответствующие внутренние размеры ( $l, b, h$ ), толщину стенок  $\delta$  и их деформацию после заполнения тары  $\Delta l, \Delta b, \Delta h$ , размеры комплектующих деталей  $f$  и зазоры  $c$ , необходимые для ручной или механизированной укладки потребительской тары в транспортную:

$$L = l + \Delta l + 2\delta + f/k + c/k. \quad (2.2)$$

Потребительскую тару подразделяют на индивидуальную и групповую. Индивидуальная тара предназначена для упаковывания единицы продукции. В групповую тару упаковывают определенное количество продукции.

По отношению к упаковываемому продукту упаковку подразделяют на внутреннюю, внешнюю и транспортную. Внутренняя упаковка предназначена для размещения товара или продукта и находится с ним в непосредственном контакте. В зависимости от агрегатного состояния продукта (твердое, жидкое или газообразное), комплекса его физико-химических свойств и ряда других показателей внутренняя упаковка может быть изготовлена из бумаги, картона, пластмасс, металлов, стекла, керамики, дерева и композиционных материалов. Внешняя упаковка служит защитой для внутренней упаковки и удаляется при подготовке к непосредственному использованию упакованного продукта. Как правило, внешняя упаковка

выполняет и дополнительные функции, например, представление подробной информации о товаре и его свойствах, привлечение внимания к товару, увеличение сроков сохранности и т. п. Транспортная упаковка предназначена для хранения, транспортировки и идентификации продукта. Для духов внутренней упаковкой является стеклянный флакон, внешней упаковкой — изящная картонная коробка с внутренним ложементом под флакон, транспортной упаковкой — ящик из гофрированного картона, вмещающий несколько внешних упаковок с духами [15].

**Производственная** тара и упаковка предназначена для выполнения внутризаводских — внутрицеховых и межцеховых, а также межзаводских перевозок и хранения сырья, материалов, полуфабрикатов, заготовок, деталей, сборочных единиц, готовых изделий и отходов. Производственная тара и упаковка является собственностью конкретного предприятия и подлежит обязательному возврату [42].

**Транспортная** тара предназначена для перевозки, складирования и хранения продукции. Она образует самостоятельную транспортную единицу и может принадлежать любой организации, участвующей в процессе обращения [42].

По габаритам транспортную тару различают на малогабаритную, размеры которой лежат в пределах 1200×1000×1200 мм, и крупногабаритную, когда размеры превышают указанные пределы.

По кратности использования транспортную тару разделяют на разовую и многооборотную. Разовая тара предназначена для однократного ее использования. Многооборотной называют тару, прочностные показатели которой рассчитаны на многократное ее применение. При этом бывшую в употреблении тару, которую используют повторно, называют возвратной, а юридически принадлежащую и подлежащую возврату конкретному предприятию — инвентарной тарой. При получении товара в многооборотной таре, в том числе и инвентарной, предприятие-потребитель продукции выплачивает поставщикам ее залоговую стоимость.

**Специальная** упаковка предназначена для защиты от внешних воздействий, влияния влаги и климатических факторов при транспортировании, хранении и длительной консервации изделий. Как правило, специальной упаковке подвергают крупногабаритные установки, машины и механизмы, а также приборы. Наибольшее распространение получило герметичное упаковывание изделий в полимерную пленку на специальном транспортном поддоне с последующей защитой деревянной обрешеткой или стенками с крышкой. Для консервации крупных агрегатов, самолетов и небольших кораблей применяют способ «кокон». Изделие закрепляют на герметичной сплошной плите, оплетают шпагатом, веревками или длинными бумажными полосами до образования сетки с ячейками размером 150–200 мм, на которую с помощью пневматического пистолета наносят в несколько слоев лак на основе полимеров до образования сплошной непроницаемой оболочки. Такой «кокон» защищают обрешеткой или помещают в контейнер [34]. В качестве специальной упаковки часто используют стеклопластики, из которых формируют баки, цистерны, ящики, контейнеры.

При упаковывании точных приборов и механизмов, хрупких изделий применяют в качестве защиты от механических нагрузок, влаги и тому подобного нанесенный на их поверхности слой пенопласта на основе полиуретанов, полиэфиров, фенопластов.

**По материалу** различают тару и упаковку из бумаги, картона, пластмассы, металлов (жести), стекла, керамики и дерева.

Самые экономичные и широко применяемые материалы для изготовления упаковки — бумага и картон. Объем их использования в упаковочной промышленности составляет 40–50%. Стремительно возрастает применение пластмасс. Сочетание легкости, прочности, красивого внешнего вида, герметичности, автоматизации производства и переработки, дешевизны позволяют прогнозировать и в дальнейшем сохранение такой тенденции. Высокая прочность, жесткость и теплостойкость металлов делают их незаменимыми в производстве упаковки для нефтепродуктов, для пищевых продуктов, особенно консервирования рыбы, мяса и др., для напитков, для аэрозо-



лей и др. Стеклянным пузырькам, бутылкам и флягам отдается предпочтение при упаковывании напитков, продуктов химической промышленности, косметики, кондитерских изделий. Объемы использования этих основных материалов для упаковки в наиболее важных отраслях промышленности США, Европы и Германии приведены табл. 2.1.

Конкретный материал упаковки выбирают, исходя из физических, химических, гигиенических, биологических и других его свойств во взаимосвязи со свойствами упаковываемой продукции. Немаловажную роль играет и технология упаковывания, и конструктивные особенности упаковочного оборудования.

**По составу** упаковку классифицируют в зависимости от вида и типа тары и применяемых вспомогательных упаковочных средств. Под видом тары понимают классификационную единицу, определяющую тару по форме. По форме различают прямоугольную, цилиндрическую, конусную, плоскую тару и др. Типом тары называют классификационную единицу, определяющую тару по материалу [42]. Основа классификации упаковки по составу приведена на рис. 2.3.

**По конструкции** тару подразделяют на коробки, банки, бутылки, ящики, фляги, канистры, бочки, барабаны, флаконы, тубы, стаканчики, ампулы, пакеты, сумки, мешки, пеналы, пробирки. Классификация тары по конструкции с ее распределением на потребительскую и транспортную приведена на рис. 2.4.

Таблица 2.1

**Распределение упаковки по материалам (в %)**

Материал упаковки	США	Германия	В среднем по Европе			В среднем в мире (1995 г.)	
			1994 г.	1995 г.	1996 г.	млрд. \$/%	млн. т/%
Бумага и картон	52,3	39	40	40	41	160/34	500/37
Пластмассы	15,9	30	29	29	29	140/30	300/22
Металл	24,4	21	18	18	16	129/25	150/11
Стекло и керамика	7,4	7	8	8	9	30/6	400/30
Дерево	—	3	5	5	5	25/5	—

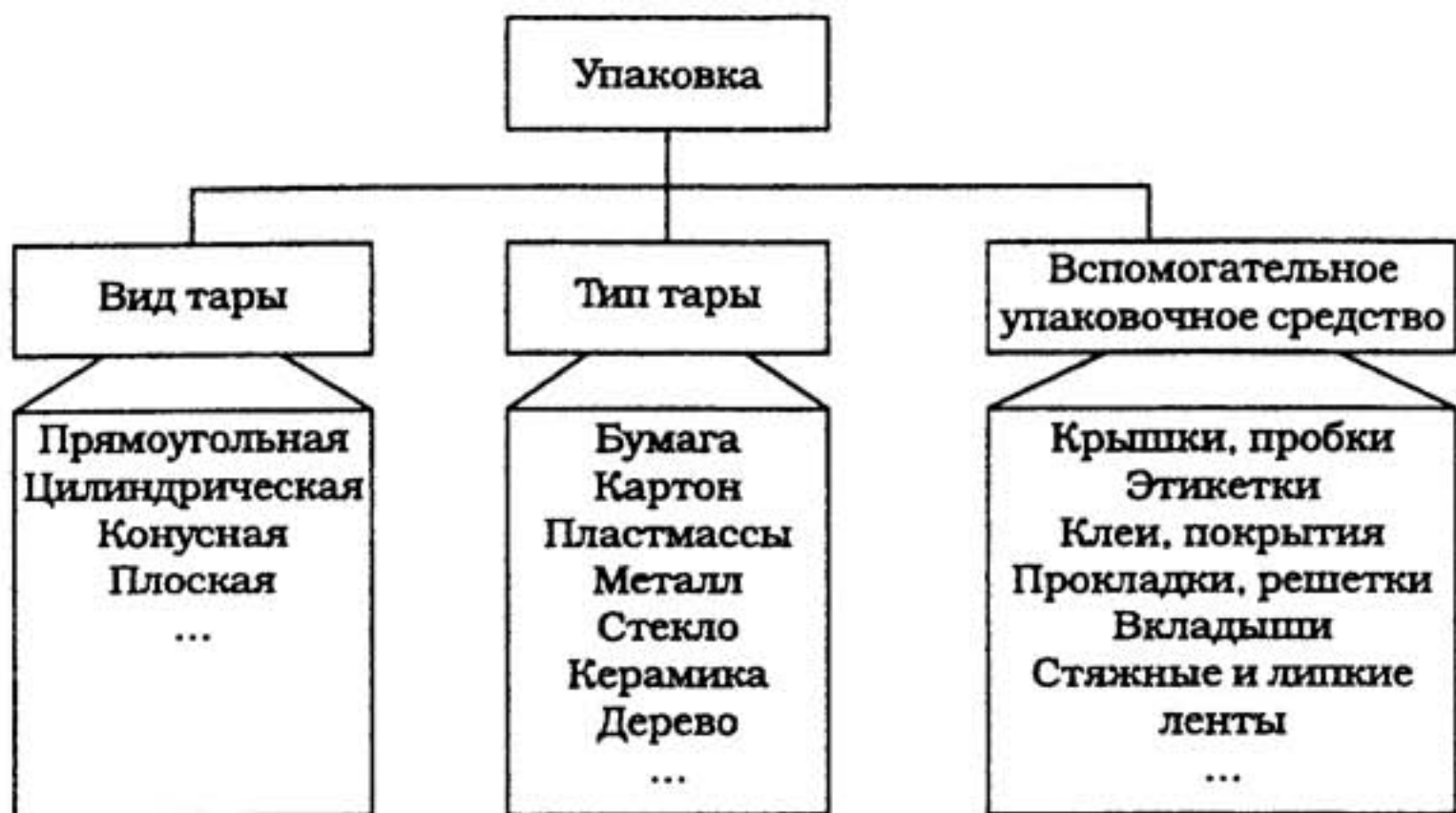


Рис. 2.3. Классификация упаковки по составу

**Коробки** относят к разовой потребительской таре. Они имеют корпус разнообразной формы, плоское дно, сверху закрываются крышкой. Крышки бывают съемные или прикрепленные к корпусу на шарнирах (рис. 2.5).

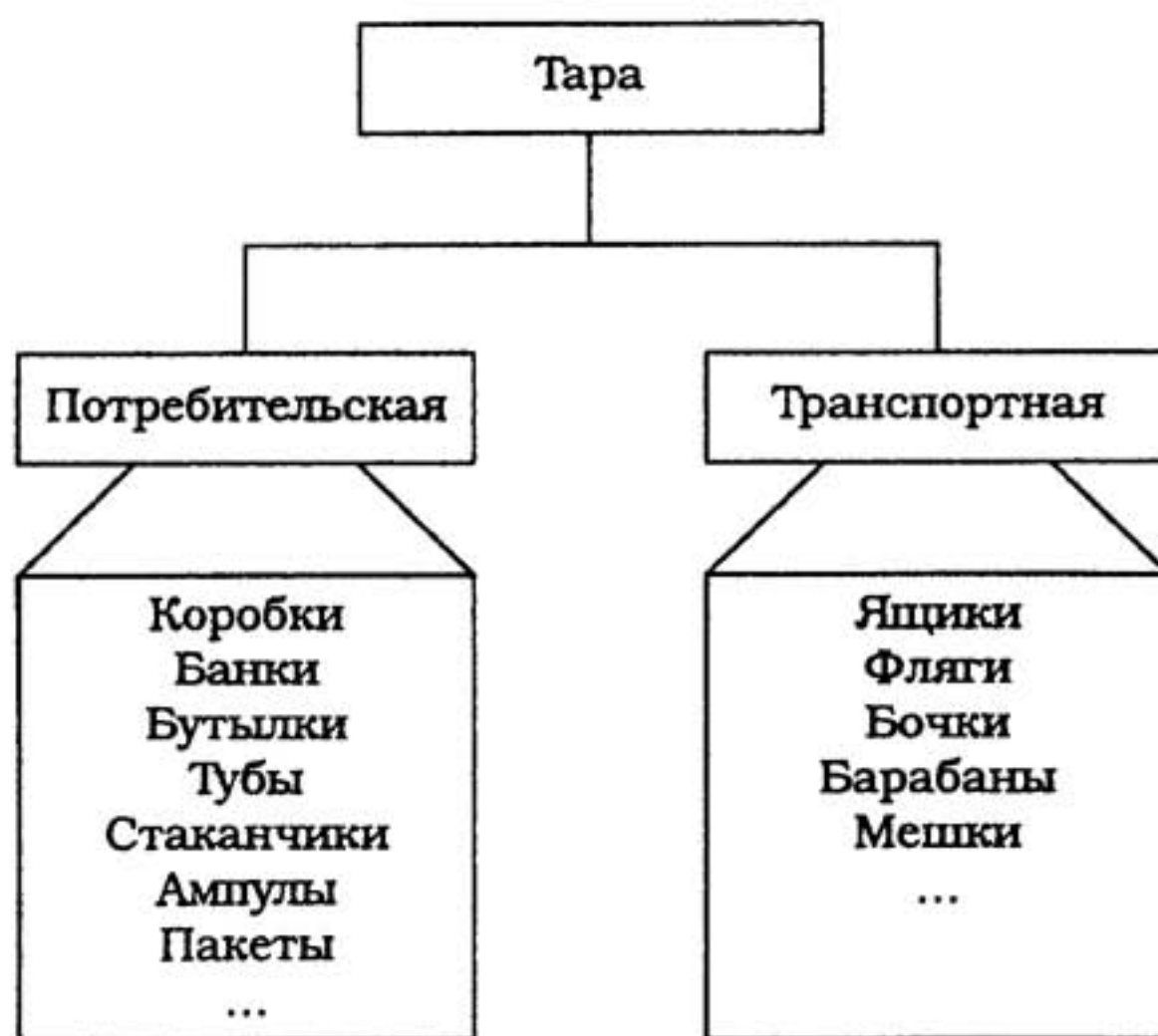


Рис. 2.4. Классификация тары по конструкции

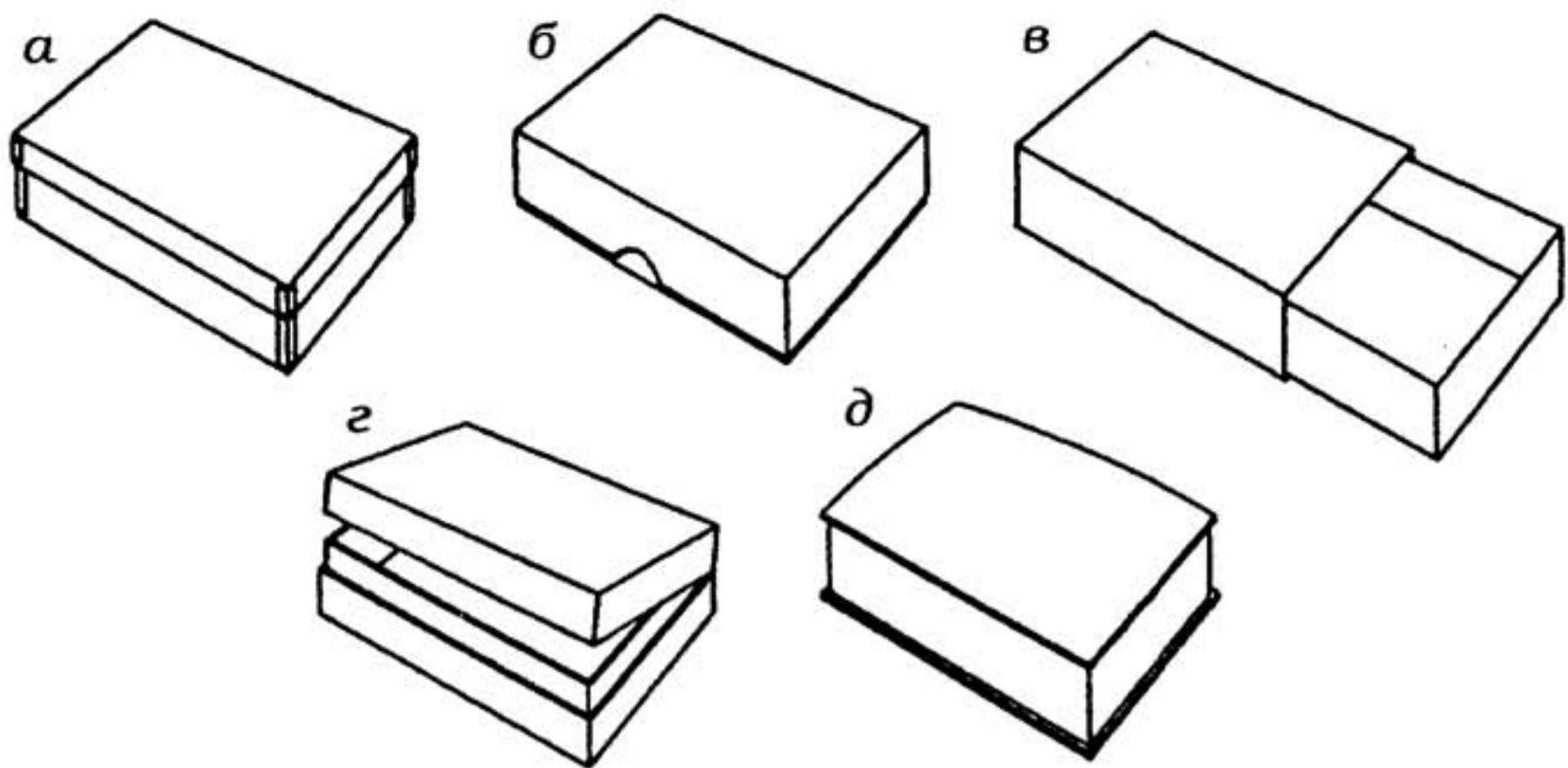


Рис. 2.5. Коробки различной конструкции:  
 а — со съемной крышкой; б — с телескопической крышкой;  
 в — с корпусом типа обечайки и выдвигаемой крышкой;  
 г — с приклепленной на петлях крышкой;  
 д — корпус и крышка с буртиком

**Банками** называют потребительскую тару преимущественно с цилиндрическим корпусом и плоским или вогнутым дном. Они имеют широкую горловину диаметром, равным или несколько меньшим диаметра корпуса (рис. 2.6). Вместимость банок от 0,025 до 10 дм<sup>3</sup>.

**Бутылки** являются потребительской тарой, как правило, с цилиндрическим корпусом, переходящим в узкую горловину.



Рис. 2.6. Банки различной конфигурации

Горловина имеет конструкцию, предназначенную для укупоривания. Дно у бутылок может быть плоским или вогнутым (рис. 2.7).

**Тубы** представляют собой разовую потребительскую тару с корпусом, обеспечивающим выдавливание содержимого. Они имеют узкую горловину с внешней резьбой, на которую навинчивается крышка, называемая бушоном (рис. 2.8). Дно тубы герметично закрывается после наполнения ее продукцией.

**Ампулы** также являются разовой потребительской тарой. Они выполнены в виде цилиндрического корпуса с вытянутой горловиной, которая герметично запаивается после наполнения продукцией. Дно у ампул бывает плоским или выпуклым (рис. 2.9).

**Пакеты и сумки** относят к мягкой потребительской таре с корпусом в виде рукава, с дном различной конструкции и открытой горловиной. Их вместимость до  $20 \text{ дм}^3$ . Сумки имеют разнообразные ручки.

**Пробирками** называют потребительскую тару, имеющую цилиндрический корпус и плоское или выпуклое дно. Горловина диаметром, равным диаметру корпуса, укупоривается пробкой или крышкой. Объем пробирок достигает  $0,05 \text{ дм}^3$ .

**Канистры** имеют корпус, форма которого в сечении, параллельном дну, близка к прямоугольной. В их конструкции предусмотрены приспособления для переноса, сливная горловина и крышка с затвором (рис. 2.10).

Остальные конструкции являются представителями транспортной тары (см. рис. 2.4).

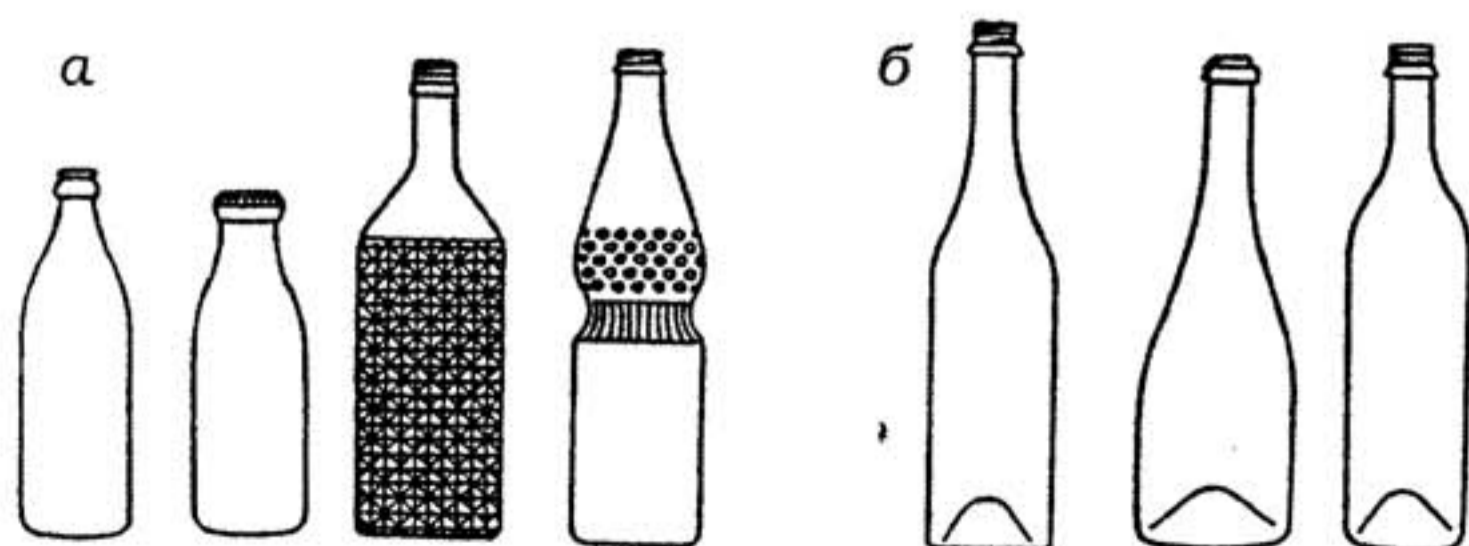


Рис. 2.7. Бутылки с плоским (а) и вогнутым (б) дном

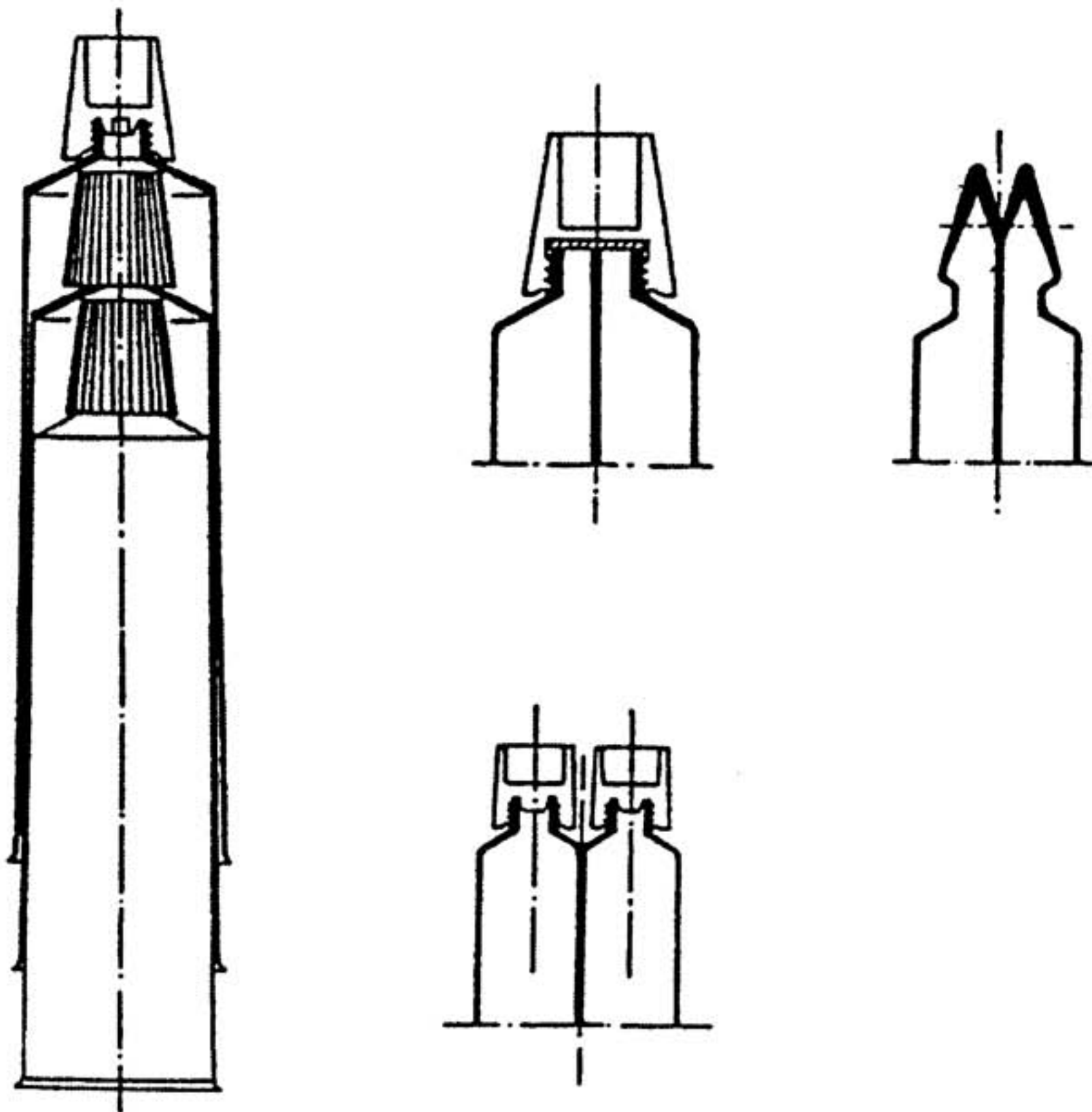


Рис. 2.8. Тубы с бушонами различной конструкции

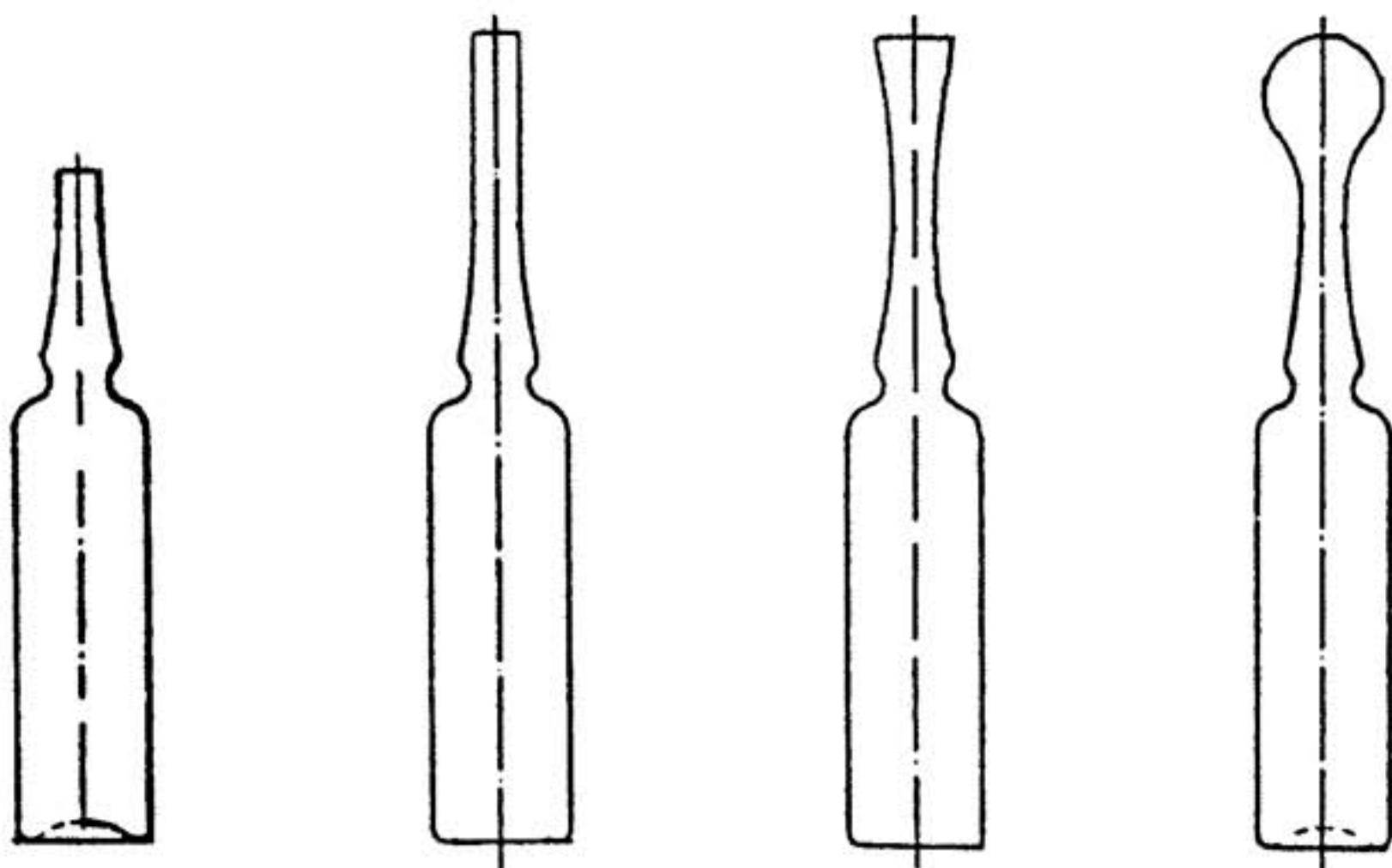


Рис. 2.9. Ампулы различной конструкции

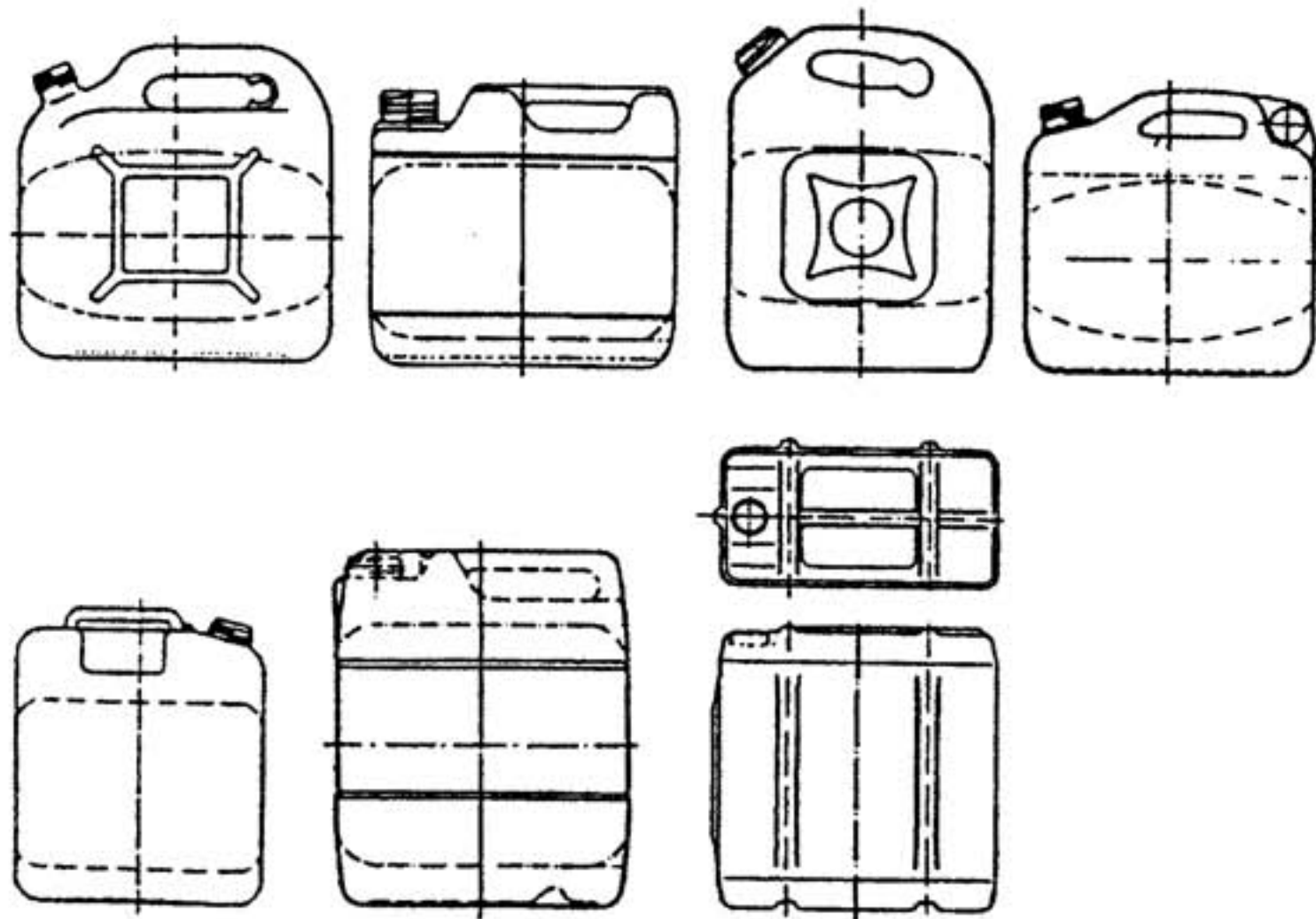


Рис. 2.10. Канистры различной конструкции

**Ящики** характеризуются корпусом, имеющим в сечении, параллельном дну, преимущественно форму прямоугольника. В состав ящика входят дно, две пары торцевых и боковых стенок. Ящики бывают с крышкой и без нее (рис. 2.11). По выполняемым функциям, многообразным конструкциям и размерам ящики можно условно разделить на следующие:

- вкладываемые друг в друга;
- со сплошными или перфорированными стенками;
- стоечные с перфорированными стенками;
- с постоянными или вставляемыми перегородками и т. п.

**Флягами** называют транспортную тару с корпусом цилиндрической формы, переходящим в узкую горловину (рис. 2.12). Фляги снабжены устройством для переноса, крышкой, имеющей рычажный или винтовой затвор.

**Бочки** представляют собой транспортную тару с корпусом цилиндрической или параболической формы. На корпусе пре-

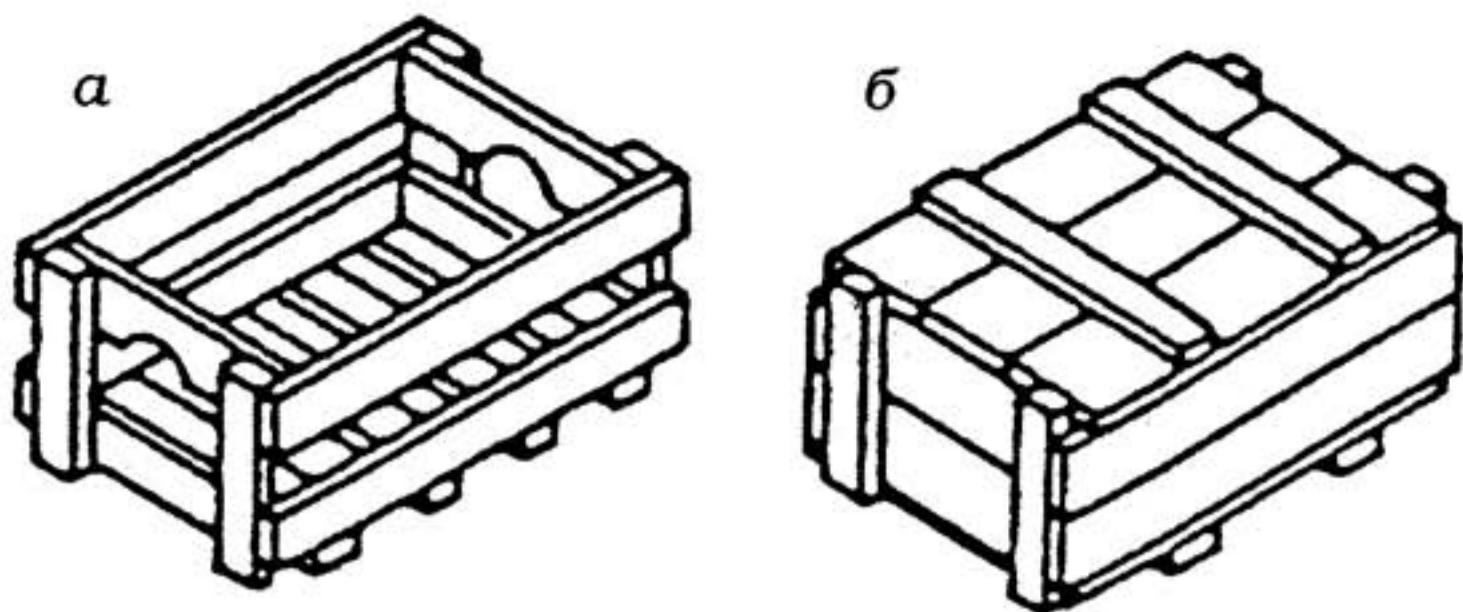


Рис. 2.11. Ящики без крышки (а) и с крышкой (б)

дусмотрены обручи или зиги (гофры) для катания. Днища снабжены сливными отверстиями либо одно дно выполняется съемным (рис. 2.13 и 2.14).

**Барабаны** имеют гладкий или гофрированный корпус цилиндрической или конической формы без обручей или зигов для катания, с плоским дном и крышкой (рис. 2.15).

**Мешки** относят к транспортной мягкой таре. Они имеют корпус в форме рукава, дно и горловину. Горловина бывает открытой или закрытой клапаном (рис. 2.16).

**Дополнительными конструктивными признаками**, по которым классифицируют тару, являются стабильность размеров, плотность (герметичность), компактность.

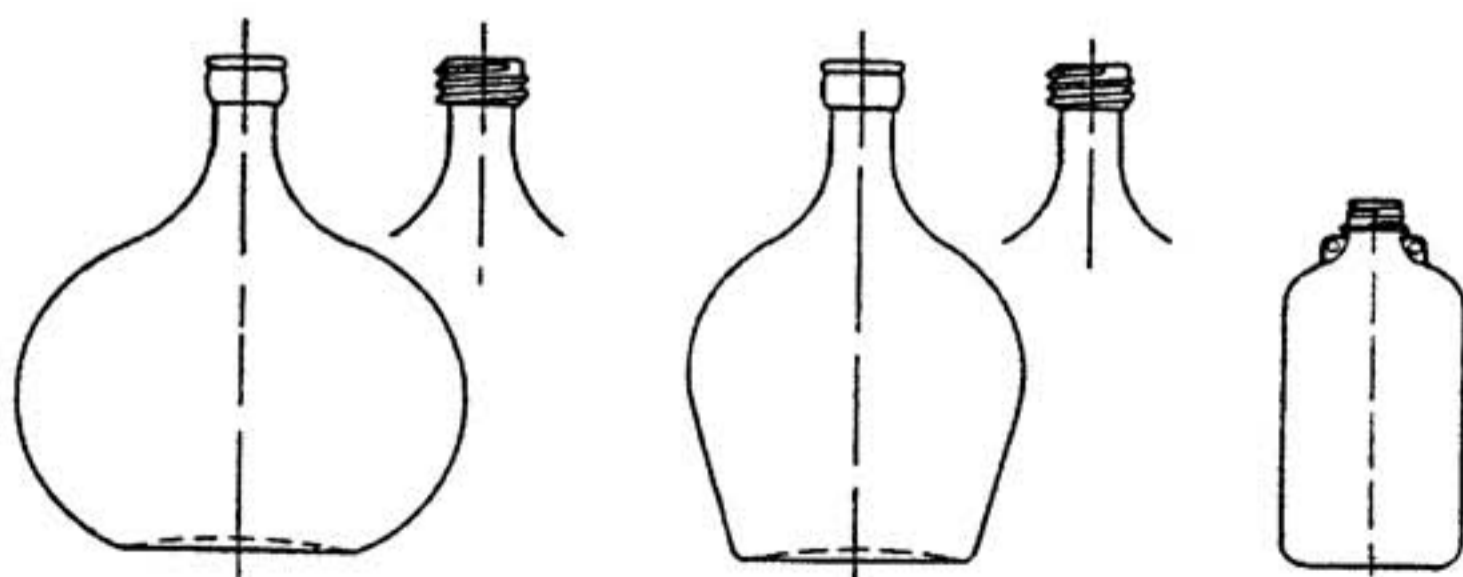


Рис. 2.12. Фляги

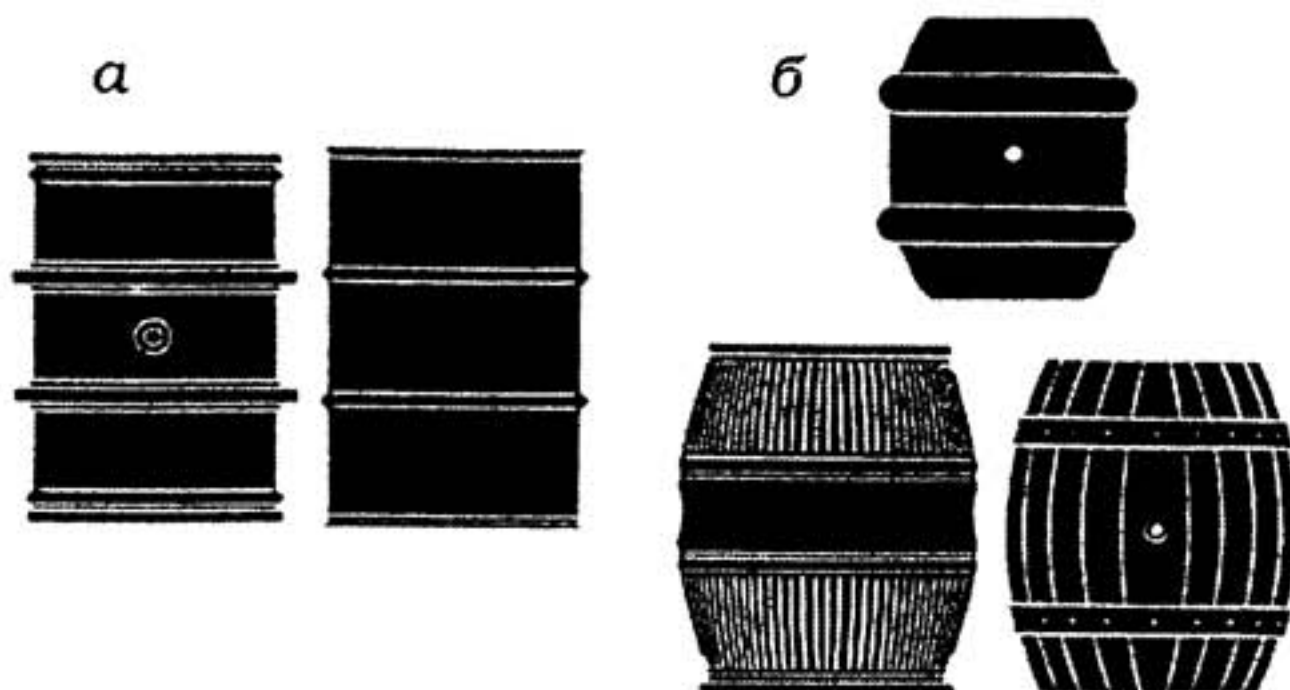


Рис. 2.13. Бочки цилиндрической (а) и параболической (б) формы

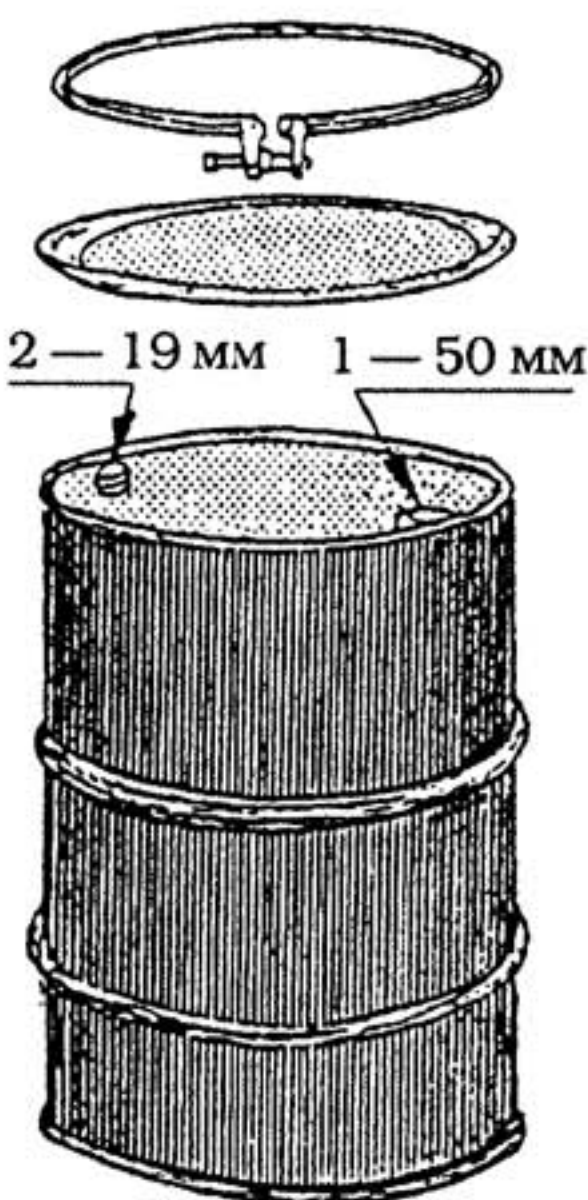


Рис. 2.14. Бочка цилиндрической формы со съемным днищем, сливным (1) и дренажным (2) отверстиями

В зависимости от **стабильности размеров** различают тару жесткую, полужесткую и мягкую.

**Жесткая** тара не меняет своих формы и размеров при заполнении продукцией. Она способна выдерживать внешние воздействия при транспортировке и хранении продукции, сохраняя первоначальные форму и размеры.

**Полужесткая** тара менее устойчива к внешним и внутренним нагрузкам. При незначительном нагружении заполняемой продукцией она сохраняет свою форму и размеры. Под воздействием больших нагрузок полужесткая тара может изменять форму и размеры.

**Мягкая** тара существенно меняет форму и размеры при ее наполнении продукцией.

**По плотности** (герметичности) тару подразделяют на открытую, негерметичную, герметичную изобарическую и изотермическую.





Рис. 2.15. Барабаны с гладким корпусом

Для негерметичной закрытой тары характерна конструкция, предусматривающая применение крышки или другого вида затвора.

Герметичная тара отличается конструкцией, которая обеспечивает непроницаемость газов, паров и жидкостей.

Герметичная изотермическая тара предназначена для сохранения продукции при заданной температуре в течение установленного времени.

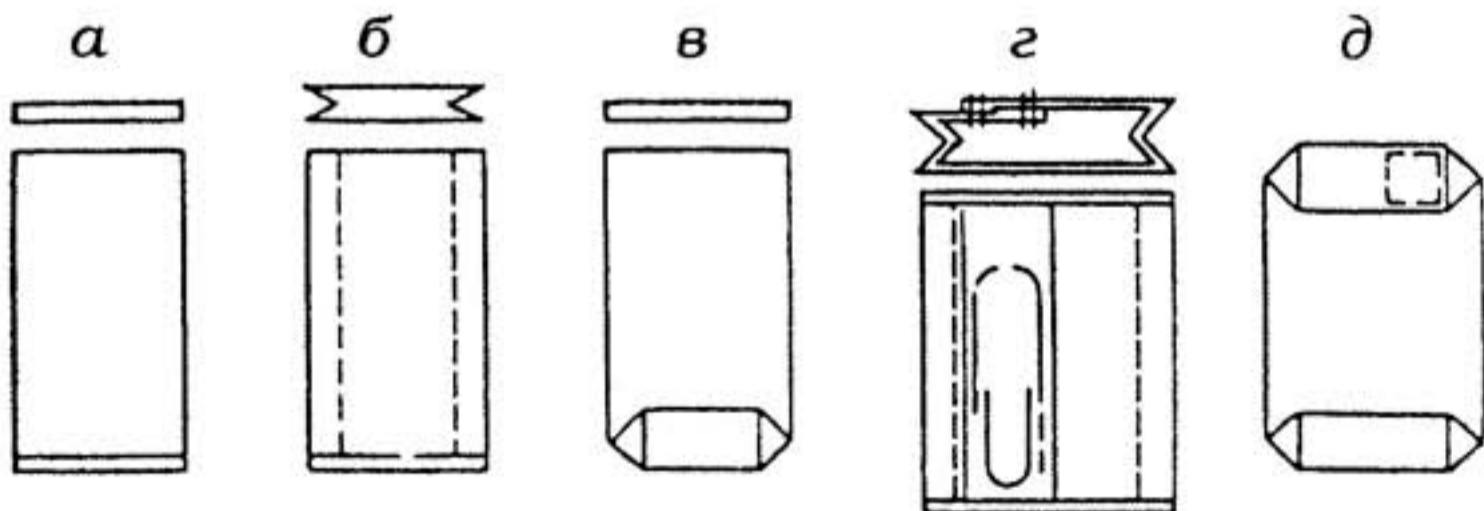


Рис. 2.16. Мешки различной конструкции: открытые — плоский (а), с боковой складкой (б), склеенный (в); закрытые клапанные — двухслойный типа «Милпак» (г), клапанный (д)

**По компактности** различают тару неразборную, разборную и складную.

Конструкция разборной тары позволяет разобрать ее на отдельные части и вновь собрать, соединив сочленяющие элементы.

Конструкции и свойства складной тары открывают возможность сложить ее без нарушения сочленения элементов и вновь придать таре первоначальную форму.

**По технологии производства** тару и упаковку классифицируют в первую очередь во взаимосвязи с ее материалом и с конструктивными особенностями. Наибольшее количество материалов и методов их переработки встречается в производстве полимерной тары и упаковки. Для полимеров принципиально важна взаимосвязь общего процесса получения материала и процесса придания этому материалу требуемой формы, иначе говоря — получение изделия. Конечным критерием правильности выбора технологического процесса и параметров его проведения является высокое качество именно изделия. Технологическая последовательность по схеме *полимер — материал — метод формования — изделие* имеет и обратную связь, позволяющую определить правильность выбора каждой стадии по уровню достигнутого качества изделия [25].

**Подготовительные процессы** предназначены для придания полимерному материалу необходимых при дальнейшей переработке свойств или формы. К подготовительным процессам относят сушку, смешение, измельчение, гранулирование, пластикацию, растворение и раскрой.

Сушку применяют для удаления из полуфабрикатов полимерных материалов летучих веществ. Ее осуществляют в сушилках различных типов: ленточных непрерывного действия, тоннельных, полочных вакуумных и т. д.

Пластические массы, из которых изготавливают различные изделия, практически никогда не состоят из одного полимерного материала. Для придания различных эксплуатационных свойств в пластмассы вводят широкое семейство разнообразных добавок: пластификаторы, наполнители, ста-

билизаторы, сшивающие агенты, красители, порообразователи, смазывающие вещества, другие полимеры и т. п. Смешением получают композиции пластмасс с равномерным распределением ингредиентов смеси. Смешение осуществляют с помощью лопастных, вихревых, валковых смесителей и реакторов с мешалками.

Измельчение и гранулирование проводят с целью придания частицам материала определенной формы и размера. Различают физико-химические методы измельчения (в процессе синтеза полимеров, методы распыления расплавов, химического высаждения, высаждение из раствора и т. п.) и механическое измельчение в мельницах различной конструкции. Гранулирование осуществляют в червячных, дисковых и валковых грануляторах.

Пластикация представляет собой разогрев и гомогенизацию пластмасс перед их дальнейшим формованием. Пластикацию проводят в роторных смесителях, червячных прессах, вальцах, дисковых экструдерах. Растворение пластмасс в различного рода жидкостях предпринимают с целью облегчения процесса последующего формования полуфабрикатов и изделий.

Раскрой листовых и рулонных материалов, резку на бобины осуществляют дисковыми фрезами и ножами, накаляемыми струнами, ленточными пилами и гильотинными ножницами.

**Вид формовочного процесса**, когда полимерный материал под воздействием температуры и механических усилий переходит в пластическое состояние и приобретает необходимые для тары форму и размеры, зависит от вида заготовки полимера. Из гранул и порошка пластмассовую тару изготавливают методами литья под давлением, прессования, экструзии, раздува. Тару в этих случаях называют соответственно литьевой, прессованной, экструзионной и выдувной. Из листов и пленок методами термоформования, сварки и склеивания получают термоформованную, сварную и склеенную тару. Из растворов и суспензий полимеров способами полива, напыления и вспенивания изготавливают поливную, напыляемую и вспененную тару (рис. 2.17).



*Рис. 2.17. Классификация тары и упаковки из полимеров по технологии производства*

**Вспомогательные процессы** фиксируют состояние, окончательную форму и размеры упаковки, приобретенные при формовании. К вспомогательным процессам относят охлаждение упаковки в форме, отделение ее от формы и удаление из формы, удаление излишков полимера и окончательную сборку готовой тары из отдельных элементов.

Охлаждение осуществляют с помощью системы охлаждения формы или других охлаждающих устройств. Охлаждающими агентами служат воздух, вода и т. п.

Отделяют тару от поверхности и удаляют из формы механическими или пневматическими отделяющими и выталкивающими элементами, предусмотренными в конструкциях пресс-форм.

Механическое удаление излишков полимера — облоя, обрезку кромок материала, вырезку горловин осуществляют специальными отрезными и высекательными механизмами.

**Дополнительные процессы** предназначены для придания изготовленной таре специфических свойств или изменения ее размеров. К дополнительным процессам относят сварку, склеивание, активацию, дестатизацию и металлизацию поверхности, печать, механическую обработку.

Методами сварки (термоконтактной, термоимпульсной, ультразвуковой и др.) и склеивания получают неразъемные соединения деталей или элементов упаковки.

Активизация поверхности тары позволяет улучшить адгезию с краской, лаком, металлом и т. п.

Дестатизация направлена на снятие зарядов статического электричества с поверхности тары.

Металлизация значительно улучшает внешний вид, а также придает поверхности тары специальные свойства: электро- и теплопроводность, способность отражать лучевую энергию и т. п. Одновременно металлизация понижает проницаемость материалов по отношению к газам, парам и жидкостям.

Механическая обработка на фрезерных, токарных, строгальных станках, дисковых ножах и пилах, гильотинных ножницах и т. д. предназначена для придания таре и упаковке окончательной формы и размеров.

### 3. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТАРЫ И УПАКОВКИ

---

Для создания упаковки, удовлетворяющей многочисленным и разнообразным требованиям, еще на стадии разработки конструкции следует проводить комплексный анализ, позволяющий сделать оптимальный выбор во взаимосвязанной цепочке важнейших элементов упаковки:

материал (упаковываемый и самой упаковки);

конструкция;

дизайн;

метод изготовления;

метод упаковывания;

сеть и условия распространения;

особенности использования;

утилизация использованной упаковки.

Сложность задачи состоит во взаимном влиянии друг на друга этих факторов. К примеру, совершенно понятно, что выбранный материал в значительной степени определяет и конструктивные особенности, и дизайн, и методы изготовления и упаковывания, и аспекты сети распространения до потребителя.

Комплексный анализ и выбор оптимальных решений при разработке тары и упаковки можно разделить на три основных этапа. Первый этап включает сбор необходимой информации. Второй этап — непосредственно комплексный анализ собранной информации. Третий этап — принятие оптимального решения и разработка мероприятий по изготовлению упаковки.

**Сбор необходимой информации** начинается с формулирования целей и задач разработки тары и упаковки.

*При этом собирается полный объем информации об упаковываемом продукте.* Прежде всего необходимо знать массу и размеры продукта, помещаемого в тару. Не менее важны и сведения о физическом состоянии упаковываемого вещества: какое оно — газообразное, жидкое или твердое? Каковы условия его перехода из одной фазы в другую? Следует установить количественные и качественные характеристики физического состояния. Для газов — это объем, давление, температура, объемный вес и т. п. Для жидкостей кроме указанных показателей важны удельный вес, вязкость, склонность к пенообразованию и др. Твердые вещества разделяют на порошкообразные, гранулированные и штучные. Порошкообразные продукты характеризуют насыпным весом, влажностью, склонностью к образованию комков, пыли и т. п. Гранулированные, кроме того, — размерами гранул, степенью анизотропии формы, сыпучестью и т. д. Для штучных материалов важны удельный вес, габаритные размеры, ориентация и количество в упаковке.

В комплекс сведений об упаковываемом продукте входят его химические и физические свойства. Из химических свойств наиболее важными являются жирность, кислотность, коррозионная и химическая активность, реакция на температуру, свет и т. п. Из физических — жесткость, хрупкость, эластичность и т. д.

Завершают сведения о продукте требования к его форме, к взаимосвязи формы продукта с формой упаковки. Важно определить, должна ли форма тары повторять форму продукта, какова степень заполнения тары продуктом, каков свободный объем тары.

*Второй раздел информации содержит сведения о причинах, которые могут ухудшить качество исходного продукта.*

В зависимости от времени и условий сохранения продуктов ухудшать их качество могут протекающие биологические, химические и физические процессы [52].

*Биологические процессы* связаны с размножением и развитием различных микроорганизмов. Благоприятными условиями для протекания биологических процессов являются: нали-

чие продукта как среды размножения бактерий; область умеренных положительных температур; влажность не менее 60%; присутствие в достаточном количестве кислорода; наличие нейтральной или слабощелочной среды с  $pH = 3-6$ . В результате биологических процессов может произойти биологическая порча продуктов, выражающаяся в изменении внешнего вида, вкуса (например, прокисание), появлении неприятных запахов. Употребление биологически испорченных продуктов может привести к тяжелым отравлениям и даже к смертельным случаям.

*Химические процессы* могут протекать под воздействием кислорода, влаги, света и температуры. Эти факторы инициируют реакции соответственно окисления, абсорбции и катализа, фотодеструкции, изменяют скорость протекающих реакций. Влияние этих реакций на качество продукции показано в табл. 1.2.

*Физические процессы* связаны главным образом с воздействием на упакованный продукт окружающей среды. Под влиянием высоких температур происходит высыхание продуктов, что нежелательно, например, для хлебобулочных изделий. Низкие температуры могут привести к замерзанию жидкостей, порче продукции и разрушению самой упаковки. Воздействие влаги приводит к увлажнению и отсыреванию продукции, образованию комков, размягчению. В процессе длительного хранения может произойти потеря запахов у душистой продукции, такой, как чай, кофе, косметика и т. п. Многие продукты могут приобрести нежелательные или вообще недопустимые запахи, возникающие от соседствующей при транспортировке и хранении сильно пахнущей продукции, а также от красок, лаков и адгезивов, применяемых при изготовлении упаковки.

*Третий раздел составляет информация о прогнозируемом потребителе продукции.* Важно получить достоверные и объективные сведения о размерах рынка потребления упаковываемой продукции. Нужно знать, кто по возрасту, полу, имущественному и общественному положению является наиболее вероятным покупателем продукции, а кто — ее потребителем.

*Четвертый раздел посвящен информации о полной цепочке доставки упакованной продукции от изготовителя до потребителя, о возможных при этом видах повреждений упаковки и продукции.*



Основное количество повреждений упаковки (до 90%) происходит во время погрузочно-разгрузочных операций, транспортировки, складирования и продажи. При этом на упакованную продукцию оказывают физическое воздействие различные виды нагрузений: удар, вибрация, прокол, сжатие, перепады температуры и давления, влажность, свет. Кроме того, упаковку разрушают и живые существа — люди, птицы, грызуны, насекомые. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся виды нагрузений упаковки.

*Ударом* называют совокупность явлений, возникающих при столкновении движущихся твердых тел, а также при некоторых видах взаимодействия твердого тела с жидкостью или газом. Промежуток времени, в течение которого длится удар, обычно очень мал — от десятитысячных до миллионных долей секунды. Развивающиеся на площадках контакта соударяющихся тел силы, называемые ударными или мгновенными, достигают очень больших значений. Действие ударных сил приводит к значительному изменению за короткое время удара скоростей точек тела. Следствиями удара могут быть остаточные деформации, звуковые колебания, нагревание тел, изменение механических свойств материала и др. При скоростях соударения, превышающих критические значения, происходит разрушение тел в месте удара.

Упакованная продукция испытывает ударные воздействия при резком изменении скорости ее перемещения, обычно это удары упаковок друг об друга, при ручной погрузке-разгрузке, а также при падении с конвейера, с поддона, с транспортного средства, с погрузчика и т. п. Наиболее часто разрушение упаковки происходит в результате ее падения. Вероятность разрушения упаковки в зависимости от ее веса и высоты падения показана на рис. 3.1 [52]. Горизонтальная часть кривой соответствует механизированному процессу погрузки-разгрузки, остальная часть кривой — ручному процессу.

На практике используют три основных метода устранения ударов или уменьшения вероятности разрушения упаковки и продукции. Первый метод направлен на сокращение ручных погрузочно-разгрузочных работ, устранение влияния на них человеческого фактора. Второй метод предусматривает разработку

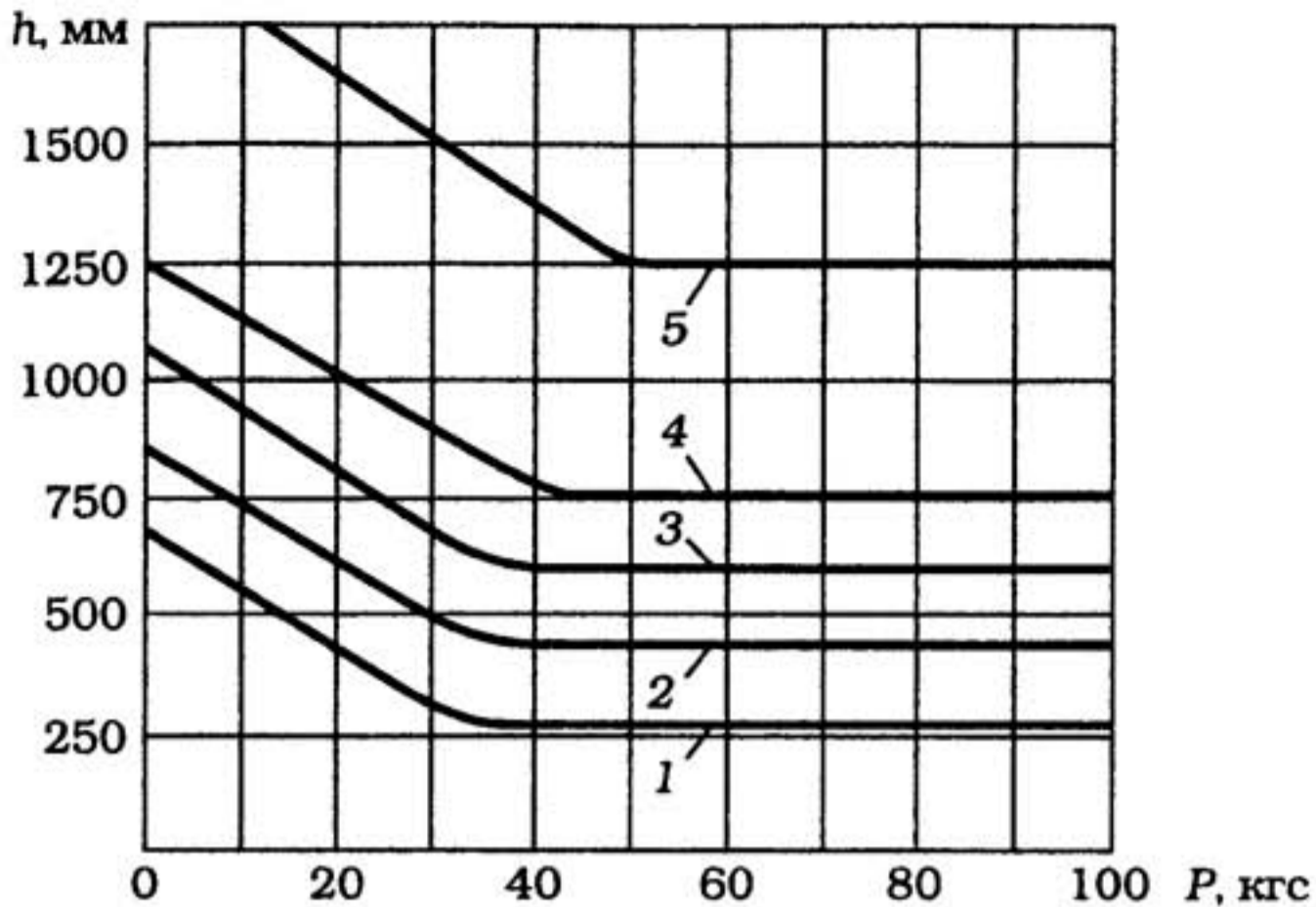


Рис. 3.1. Зависимость вероятности разрушения упаковки от ее веса  $P$  и высоты падения  $h$ :  
 1 — 90; 2 — 99; 3 — 99,5; 4 — 99,9; 5 — 99,99%

конструкционных и технологических решений, позволяющих распределить силу удара на возможно большую площадь или сосредоточить воздействие удара на определенную часть упаковки. Третий метод основан на применении различных прокладок, воспринимающих и амортизирующих ударные нагрузки.

По деформационным свойствам прокладки подразделяют на упругие и неупругие. Упругие прокладки способны после удара восстанавливать свою форму и размеры, поэтому они могут воспринимать удары многократно. Их изготавливают преимущественно из вспененных полимерных материалов. Неупругие прокладки под действием ударных нагрузок деформируются и впоследствии не восстанавливаются. Они имеют главным образом пластинчатую структуру, например, гофрокартон, и деформируются всего один раз. По конфигурации различают прокладки, имеющие заданную форму, соответствующую форме продукции, и не имеющие специальной формы.

Вибрацией называют механические колебания разных частот и амплитуд. Вибрация возникает при работе транспортеров, различного технологического оборудования, при движе-

нии транспортных средств и т. п. Под действием вибрации могут происходить истирание надписей и рисунков на упаковке, отслаивание краев этикеток, развинчивание пробок, проливание продукции. Длительная и интенсивная вибрация может привести к образованию трещин на упаковке и продукции, а также к их разрушению.

Характеристики вибрации, воздействующей на упаковку, зависят от множества факторов. Каждое транспортное средство обладает своими определенными частотными характеристиками вибрации, зависящими от его конструктивных особенностей. У грузового автомобиля, например, частота вибрации подвески (1) составляет 2–7 Гц, рамы (2) — 50–70 Гц, колес (3) — 15–20 Гц (рис. 3.2). Эти колебания накладываются друг на друга и упаковка испытывает их суммарное воздействие. Очевидно, что в различных частях кузова грузового автомобиля упаковка будет испытывать вибрацию различной частоты, максимальную – в зоне задних колес. Характеристики вибрации зависят также от качества дорожного покрытия и способа закрепления упаковки в транспортном средстве.

Борьбу с вибрациями и ее последствиями осуществляют следующими способами. Дно и стены транспортного средства покрывают изолирующим демпфирующим материалом. Прокладками из такого же материала разделяют поддоны и контейнеры с упакованной продукцией. Кроме того, поддоны и контейнеры закрепляют различными способами, уменьшающими возможность перемещения упаковки. При комплектовании транспортного средства различными видами упакован-



Рис. 3.2. Узлы грузового автомобиля, подвергающиеся вибрации

ной продукции следует обращать внимание на то, чтобы острые углы упаковки ни во что не упирались.

В случае невозможности предотвращения воздействия вибрации на упаковку наносят специальные защитные слои, стойкие к истиранию.

Унификация упаковки по форме и размерам также является эффективным способом борьбы с вибрацией. Даже различную продукцию, но упакованную в тару одинаковой формы и размеров, можно легко объединить в групповую упаковку, стойкую к вибрации.

*Сжатие разделяют на статическое и динамическое.*

*Статическое сжатие* возникает под действием статических сжимающих тару и упаковку нагрузок. Типичный пример статического сжатия — воздействие верхних слоев упаковки на нижние в штабеле на складе.

*Динамическое сжатие* наблюдается при неожиданном резком изменении сжимающей силы, возникает в случаях резкого торможения, поворотов, воздействия скрепляющих струбцин при перевозках и т. п.

Статическое и динамическое сжатие может приводить к деформации и разрушению продукции и упаковки, а также к разрушению поддона или контейнера с продукцией. Основными путями устранения негативного воздействия сжатия являются: повышение прочности и формоустойчивости тары и упаковки; применение групповой упаковки и разработка оптимальных схем размещения продукции на поддонах; создание и поддержание в помещениях складов оптимальных условий хранения. Последний путь особенно важен для тары из гофрокартона, у которой прочность и стойкость к сжатию резко падают с повышением влажности.

*Одним из важных факторов разрушения тары и упаковки является деятельность человека.* Человек может разрушать упаковку случайно и преднамеренно. Случайное разрушение происходит преимущественно при погрузочно-разгрузочных ручных операциях. Устранению таких потерь продукции способствует максимальная механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ. Преднамеренное разрушение упаковки человек осуществляет главным образом либо с целью на-

несения вреда конкурирующей фирме, либо с целью опробования и хищения продукции. Поэтому при создании упаковки необходимо в ее конструкции предусматривать меры предохранения от вскрытия.

*Пятый раздел составляет дополнительная информация: юридическая, технологическая, экономическая и др.*

*Юридическая информация, как правило, содержит правовые основы, касающиеся производства, сбыта и потребления данного вида продукции, а также утилизации использованной упаковки.*

*Технологическая информация должна содержать ответы на вопросы о технологии производства, видах и сортах необходимых упаковочных основных и вспомогательных материалов, о требованиях существующего оборудования для изготовления тары и для упаковывания в нее продукции, а также для полиграфического оформления, укупорки, герметизации, этикетирования, стерилизации и т. д.*

*Экономическая информация призвана освещать различные стороны реализации как самой упаковки, так и упакованной продукции. Здесь же необходимы сведения о финансовом состоянии всех партнеров, участвующих в производственном процессе изготовления упакованной продукции. Важен и анализ потока денежных ресурсов этих партнеров, возможности своевременного финансирования конкретных этапов проекта создания упаковки.*

**Непосредственно комплексный анализ собранной информации** начинается с составления полного пакета документов по данной разработке, включающего всю собранную информацию. На ее базе разрабатываются конкретные предложения и варианты решения поставленной задачи. Важно, чтобы альтернативных вариантов было несколько.

**Принятие оптимального решения по основным вопросам разработки тары и упаковки** начинается с определения конкретных материалов для изготовления тары и упаковки. Затем разрабатываются конструкция тары и ее дизайн. После этого создается проект технологии ее изготовления и организации производства. Такой проект обязательно включает раз-

делы контроля качества и проведения испытаний тары и упаковки. После стадий изготовления опытных образцов тары и упаковки, ее комплексных испытаний, согласования этих образцов с заказчиком следует стадия освоения серийного производства. Серьезные фирмы-разработчики тары и упаковки совместно с заказчиком следят за продвижением упакованной продукции на потребительский рынок. После сбора полученной информации проводят анализ особенностей всех стадий продвижения, выявление и исправление всех допущенных недостатков и ошибок.

Потребительские свойства тары во взаимодействии с упаковочными вспомогательными средствами и упаковываемым материалом, совокупность которых представляет упакованную продукцию, можно охарактеризовать показателями массы, свойств материалов, геометрическими параметрами, поверхностными свойствами и условиями эксплуатации (рис. 3.3). Эти показатели являются комплексными, включающими различные группы свойств. Так, в показатель свойств материалов входят механические, электромагнитные, теплофизические и химические свойства. Геометрические параметры — форма и размеры. Поверхностные явления отражают показатели состояния материалов и их конструкционных свойств. Перечисленные группы показателей и свойств имеют качественное и количественное выражение и оценку в виде нормированных единиц измерения. В конечном виде вопросы создания упаковки сводятся к установлению оптимального числового значения комплекса свойств, характерного для данного вида упаковки и упаковываемой продукции.

При создании упаковки следует учитывать изменение свойств материалов упаковки и продукции под влиянием различных факторов, возникающих в процессе выполнения упаковкой своих функций.

Выполнение упаковкой таких функций, как защитная, хранения и эксплуатационная, связано с влиянием низких и высоких температур, солнечной радиации, агрессивных химических веществ, биологическим воздействием. Низкие температуры приводят к хрупкости материала упаковки и замерзанию жидких продуктов. Эти явления вызывают растрескива-

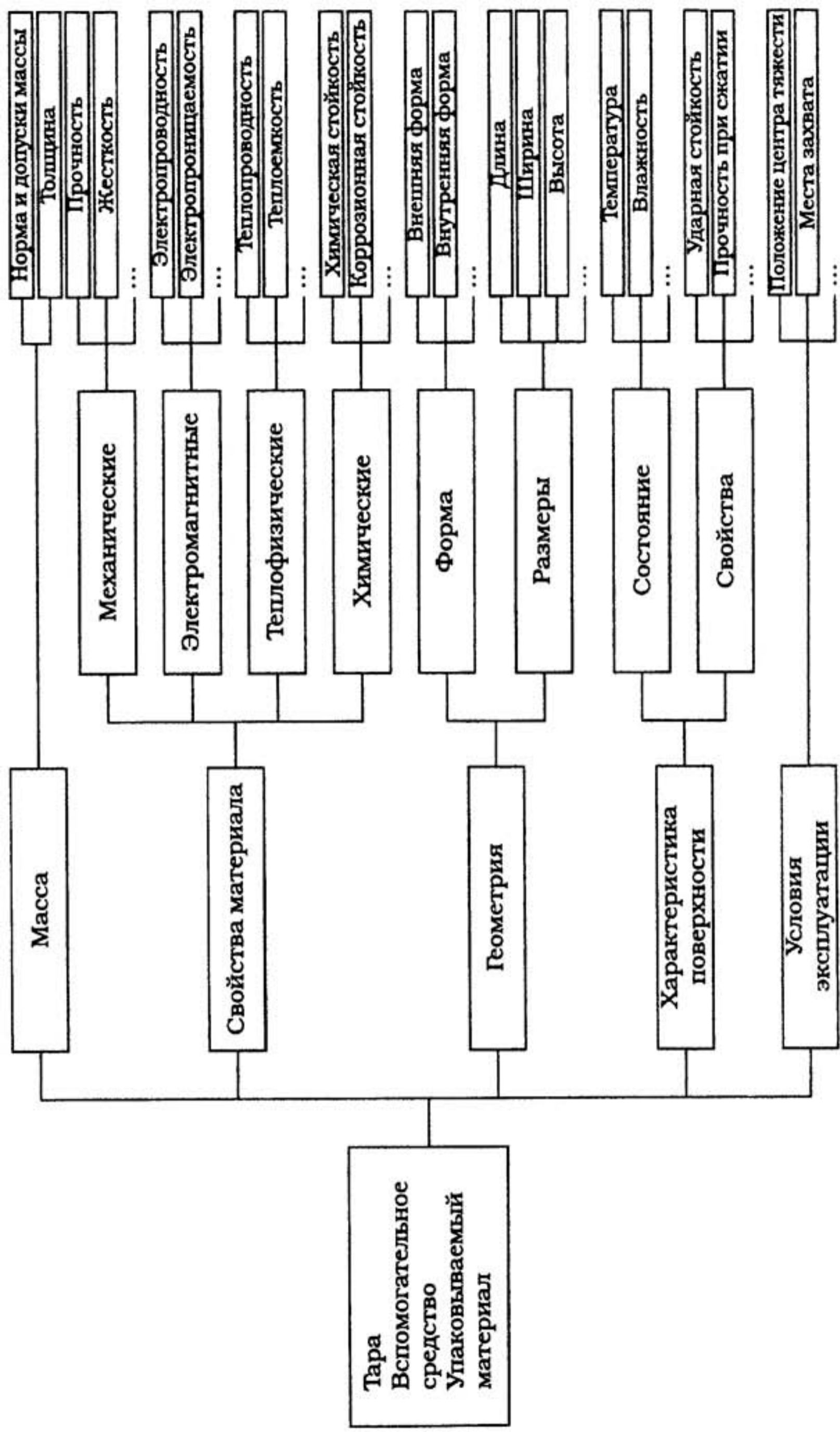


Рис. 3.3. Структура взаимосвязи потребительских свойств тары с нормированными единицами измерения

ние, отслаивание, разрушение упаковки и порчу продукции. Для их устранения необходимы применение морозостойких материалов, теплоизоляция упаковки, а также отопление складских помещений. Под воздействием высоких температур происходит старение, деструкция и деформация упаковки, порча продукции. В этом случае целесообразно использование теплостойких упаковочных материалов. Солнечная радиация вызывает старение и деструкцию материалов, изменение цвета, разложение продуктов. Эффективной защитой является изготовление упаковки из радиационностойких и светонепроницаемых материалов. Агрессивные химические вещества способствуют набуханию, растворению, короблению, растрескиванию, что в конечном итоге приводит к разрушению упаковки и порче продукции. Для предохранения продукции используют химически стойкую герметичную упаковку и средства ее защиты от коррозии. Биологическое воздействие, проявляющееся в развитии грибков, микроорганизмов, появлении насекомых и грызунов, вызывает гниение, разложение и разрушение упаковки и продукции. Для защиты необходимы создание биологически стойкой упаковки, применение средств биологической защиты.

В процессе хранения упакованной продукции при ее штабелировании возникают значительные статические нагрузки. Под их действием в материале упаковки напряжения могут достигать критических значений, приводящих к продавливанию, смятию и разрушению упаковки. Предотвращают эти явления повышением прочности тары и упаковки, применением стоечного оборудования, стеллажей на складах.

При транспортировке, хранении и эксплуатации под действием перепадов температур, повышенной влажности воздуха и т. п. на поверхностях упаковки и упакованной продукции может конденсироваться влага. Она способствует коррозии металлов, старению пластмасс, развитию микроорганизмов. Эти процессы приводят к заклиниванию подвижных соединений механизмов, разрушению деталей, снижению механической прочности, электрическим пробоям диэлектриков, выходу из строя электрических приборов и машин, порче пищевых продуктов. Предохраняют от влияния конденсированной



влаги путем создания герметичной и биологически стойкой упаковки, защитной консервации продукции, применения осушителей, ингибиторов коррозии, средств биологической защиты, защитной среды из инертных газов.

Транспортировка продукции автомобильным, железнодорожным, речным, морским и воздушным видами транспорта непосредственно связана с воздействием комплекса статических и динамических нагрузений. Сочетание механических, вибрационных и ударных нагрузок приводит к явлению усталости материалов, возникновению критических статических и циклических напряжений. Они вызывают разрушение, бой хрупких материалов, поломки приборов и механизмов, вмятины, проколы и разрывы упаковки, приводящие к загрязнению продукции и транспорта. Для исключения этих явлений повышают прочность и используют специальные конструкции и приспособления амортизирующей тары и упаковки, применяют штабелирование упаковки на поддоны с фиксацией различными способами.

Анализ влияния основных функций упаковки и возникающих факторов на характер разрушения приведен в табл. 3.1.

В рамках системы производитель — потребитель можно выделить три основные категории продукции, определяющих различные технические требования и подходы к упаковке:

- 1) товары народного потребления;
- 2) промышленные изделия;
- 3) военная продукция.

Упаковку товаров народного потребления характеризуют малые габариты, большие объемы производства, привлекательный внешний вид. Упаковка промышленных изделий отличается большими габаритами, прочностью, отсутствием требований к привлекательности. К упаковке военной продукции предъявляется целый комплекс специализированных требований, в зависимости от вида продукции практически все элементы упаковки предусмотрены в специальной документации.

В свою очередь, каждую из категорий продукции можно разделить на различные виды. Так, товары народного потребления

### Влияние функций упаковки и возникающих факторов на характер разрушения

Функции упаковки	Влияющие факторы	Изменение свойств материалов упаковки и продукции	Характер разрушения	Способы предохранения продукции
1	2	3	4	5
Защитная Хранения Эксплуатационная	Низкие температуры	Хрупкость	Растрескивание, отслаивание, разрушение	Применение морозостойких материалов
		Замерзание жидких продуктов	Разрушение упаковки, порча продукции	Теплоизоляция упаковки Отапливание складов
	Высокие температуры	Плавление, испарение, разложение, высыхание	Деформация, старение и деструкция упаковки Порча продукции	Применение теплостойких упаковочных материалов
	Солнечная радиация	Снижение прочности, разложение материалов и продуктов	Старение и деструкция материалов, изменение цвета, разложение продуктов	Использование радиационно-стойких и светонепроницаемых упаковочных материалов
	Биологическое воздействие	Развитие грибков, микроорганизмов, появление насекомых и грызунов	Гниение, разложение и разрушение материалов, порча продукции	Биологически стойкая упаковка, применение средств биологической защиты
		Растворение, набухание, коробление, растрескивание, коррозия	Химическая коррозия и разрушение упаковки, порча продукции	Использование химически стойкой, герметичной упаковки, средств защиты от коррозии

1	2	3	4	5
Хранения	Статическая нагрузка при штабелировании	Достижение критических напряжений	Продавливание, смятие упаковки	Повышение прочности тары и упаковки, применение стоечного оборудования на складах
Транс-портная, хранения, эксплуатационная	Конденсация влаги на поверхности	Коррозия металлов	Заклинивание подвижных соединений, разрушение деталей	Герметичная упаковка, консервация продукции, применение осушителей, защитной среды, ингибиторов коррозии
		Снижение прочности, электрический пробой диэлектриков	Старение пластмасс, выход из строя электрических приборов и машин	Герметичная упаковка, защитная среда из инертных газов
Транс-портная	Механические нагрузки при транспортировании	Развитие микроорганизмов	Разложение и разрушение материалов, порча пищевых продуктов	Биологически стойкая упаковка, применение средств биологической защиты
	Механические нагрузки при транспортировании	Возникновение критических напряжений	Бой, поломки Проколы, вмятины, утечки, загрязнения	Повышение прочности тары и упаковки, штабелирование на поддоны с фиксацией различными способами упаковки
	Вибрационные и ударные нагрузки	Усталость материалов, возникновение критических циклических напряжений	Разрушение хрупких материалов, поломка приборов и механизмов	Использование специальной амортизирующей тары и упаковки

включают в себя продовольственные, потребительские фармацевтические средства, косметику, туалетные принадлежности, радиоэлектронную, аудио- и видеотехнику, ЭВМ и т. д. Каждый из этих видов продукции характеризует собственный комплекс свойств, технических требований, что необходимо учитывать при конструировании и создании упаковки.

Предмет упаковывания должен эстетически ассоциироваться с дизайнерской разработкой проекта упаковки. Определить однозначные критерии таких ассоциаций практически невозможно. Как правило, создание определенного стиля упаковки является результатом индивидуального творчества высококвалифицированных специалистов. Под стилем понимается комплекс впечатлений от формы, конфигурации, текстуры материала и полиграфического оформления того или иного пакета. К примеру, можно создать коробочку для косметического изделия, которая являлась бы несомненно женским предметом, тонким и романтичным, выполненную в пастельных тонах с прекрасным типографским исполнением изящного оригинала. В то же время для упаковывания преимущественно мужского изделия, например различной аппаратуры для ЭВМ, предпочтителен смелый, бурный, мощный стиль с сильными темными тонами и смелой печатью.

Соответствующее сочетание размеров, конфигурации и художественного оформления пакета может вызвать различные эмоции: радости и уныния, аппетита или создать атмосферу богатства и роскоши. Таким образом, разработка дизайна упаковки является по своей сути проектированием определенного чувства относительно упаковываемого изделия. В этом процессе важнейшую роль играет понимание меры: не ограничивая изобретательности, не следует выходить за рамки границ, определенных принятой технологией изготовления, транспортировки и продажи. Проект конструкции упаковки необходимо рассматривать с различных позиций: технико-экономического обоснования, материально-технического обеспечения, возможностей производства, продолжительности хранения, удобства отгрузки, транспортировки, продажи и использования.

Размеры и форма являются важнейшими характеристиками упаковки. Ценность изделия может быть подсознатель-

но увеличена от большого размера коробки, что может сыграть решающую роль при выборе покупки. Однако этот фактор не должен противоречить принципу минимальности габаритов при перевозке, складировании и хранении в доме потребителя. Если упаковка лекарства не соответствует полке медицинского кабинета или аптеки, а коробка с печеньем слишком велика для кухни, это может препятствовать повторной покупке.

Выбор формы тары может быть продиктован существующими контейнерами, типом изделия, его конфигурацией, весом и другими факторами. При разработке текста на упаковке необходимо тщательное изучение состояния вопроса. Наиболее действенными являются короткие лаконичные, технически грамотные формулировки. Они размещаются на видных местах и выполняются крупно и ярко.

Наименование товара и подзаголовков поясняющей фразы должны обращаться к естественным желаниям покупателя, обладать способностью убеждения. Выбор шрифта способствует созданию определенного настроения. Различные его стили создают впечатления, влияющие на общее мнение покупателя.

Большое количество элементов типа торговой марки, описания состава продукта, способа применения продукта, обозначения его количества, наименования изготовителя, необходимых для покупателя, размещаются на второстепенных местах и выполняются мелким шрифтом.

По своему содержанию информацию на упаковке можно разделить на произвольную и обязательную. К произвольной информации относят изображение торговых марок, девизов, рекламы, художественное оформление и т. п. Обязательная информация регламентирована соответствующими нормативными документами. Она включает наименование продукта и его фирменное обозначение, список важнейших компонентов, способы идентификации в случае необходимости при чрезвычайных обстоятельствах, предупреждения о возможных противопоказаниях в применении, наименование и адрес изготовителя, дату изготовления и срок использования, номер партии и количество (для удобства складирования и дилеров), инструкцию по использованию, метод применения и т. д.

Некоторые типы упаковки являются изделиями повышенной опасности и при несоблюдении соответствующих мер предосторожности могут привести к несчастным случаям. Так, разбитые стеклянные контейнеры и бутылки могут вызвать отравление разлившимися ядовитыми жидкостями, раны и порезы острыми краями осколков. Металлические канистры иногда имеют острые грани и заусенцы. Проектировщик упаковки должен знать эти опасности и предусмотреть меры по их предотвращению. В случае необходимости на видном месте должны быть размещены соответствующие предупреждения. Сведения о среднегодовых обращениях в больницы США за помощью при травмах, полученных от различных типов упаковки, приведены в табл. 3.2.

Проект упаковки требует различных подходов в зависимости от объема производства продукции. Для изделий с малым объемом производства очень дорого применять специализированное оснащение и сложное автоматизированное оборудование. В этом случае предпочтительнее создавать конструкцию пакета или коробки, технология изготовления которых основана на использовании ручного труда и незначительных несложных приспособлений. Следует отметить, что такие проекты требуют особых знаний, таланта и изобретательности, позволяющих получить максимум прибыли при минимуме затрат на организацию производства. Проекты упаковки для массового производства, как и подготовка производства, наиболее дорогие. Для их выполнения необходимы специальные знания

Таблица 3.2

### Травмы, связанные с упаковкой

Тип упаковки	Количество зарегистрированных случаев *	Оцененная средняя серьезность, усл. ед.
Стеклянные бутылки и фляги	4994	17
Металлические канистры	3160	16
Бумага и картон	736	32
Аэрозольные баллончики	247	68

\* Незарегистрированных случаев, по экспертным оценкам, в 10 раз больше.

и навыки, глубокие научные исследования различных конструктивных и технологических аспектов.

Любой проект упаковки должен содержать расчет затрат, связанных с ее производством. Помимо основных затрат, входящих в понятие себестоимости, в производстве упаковки существует ряд специфических затрат, которые следует учитывать при определении полной стоимости. К ним можно отнести затраты на проведение периодических испытаний, затраты на специальную обработку изготовленной упаковки (стерилизация, герметизация и т. п.), затраты на надзор за упаковкой и выявленный при этом ее мелкий ремонт, затраты на складирование сырья и готовой упаковки, затраты на прогнозируемую порчу и т. п.

**Затраты на упаковку в % от цены изготовителя товаров  
в различных отраслях промышленности США  
для различных видов продукции (ориентировочные)**

Косметика .....	30
Моторные масла .....	28
Лекарства .....	27
Продовольствие .....	22
Игрушки .....	9
Аэрозоли .....	80
Мыло .....	50
Пиво .....	27
Картофельные чипсы .....	17
Женский трикотаж .....	10
Сигареты .....	3

Экономические требования во многом являются определяющими при установлении оптимальных элементов упаковки. Специфика упаковки проявляется в том, что наиболее эффективной считается не самая дешевая в производстве, а обеспечивающая на всех стадиях обращения от изготовления до утилизации наименьшие затраты и наибольшую экономию совокупного труда.

Целый комплекс специальных проблем возникает при создании упаковки для товаров, предназначенных на экспорт. Естественно, что значительно повышаются требования к транспортным условиям, поскольку в пути длительного следования возможны многократные перегрузки товара из грузовиков в железнодорожные вагоны, на палубы и в трюмы морских судов. В некоторых случаях товары бросают, на судах их закрепляют и упаковка воспринимает дополнительные транспортные нагрузки. Разгрузка-погрузка в морских портах имеет свою специфику: прежде чем попасть на причал, грузы нередко перемещаются лихтером; значительная доля ручного труда увеличивает количество повреждений упаковки и мелких краж.

Ряд перечисленных проблем решается путем возрастания использования больших грузовых контейнеров. В этих случаях прочность упаковки должна быть в 2 раза выше, чем в других. Например, одностенные коробки из гофрокартона в экспортном исполнении должны иметь двойные и тройные стенки. Деревянные контейнеры могут быть заменены металлическими рифлеными, а текстильные мешки – многослойными мешками.

Особый подход требуется при маркировке и художественном оформлении. Необходимо учитывать таможенные законы различных стран, традиции иностранных рынков. Некоторые слова и термины могут быть неприемлемыми при переводе на другой язык. Ряд цветов, цифр и символов имеют специальное значение в различных странах. Так, фиолетовый цвет вызывает отрицательные эмоции в Италии и Аргентине. Номера 4 и 9 неблагоприятны в Японии, 14 — в Венесуэле, Совы — проклятие на Мадагаскаре, а изображения собак и свиней нужно избегать в Пакистане. Треугольники отрицательно воспринимаются на Тайване, в Гонконге и Корее, но популярны в Колумбии.

Возможность продажи изделий с помощью торговых автоматов также влияет на конструкцию упаковки. В этом случае предпочтительнее твердые компактные пакеты, коробки или банки. Очень тонкие изделия трудно разделять автоматически, а пакеты больших габаритов практически неприменимы для автоматов.



Наряду с глубокими знаниями материалов, конструктивных особенностей и технологии изготовления упаковки при разработке новых проектов необходимо учитывать целый комплекс различных аспектов. Это особенности процесса упаковывания продукции. К ним относятся различные методы специальной обработки, например, стерилизация ряда продуктов и медицинских изделий. Это и необходимость периодических осмотров изделий при их длительном хранении, например, для чистки и периодической консервации от коррозии гражданской и военной техники, для устранения плесени, насекомых и другой порчи различной продукции. Это и удобство складирования, сортировки и комплектовки для отгрузки грузовиками, вагонами и т. п.

Важной завершающей стадией создания упаковки является разработка соответствующей программы испытаний. Образцы новых пакетов должны пройти комплекс специальных стендовых и натурных испытаний, имитирующих реальные условия изготовления, упаковывания, хранения, отгрузки, транспортировки и использования. Затраты на такие испытания велики, но совершенно оправданны. В случае их недостаточности устранение последствий, выявленных в процессе эксплуатации дефектов упаковки, принесет гораздо бóльшие убытки.

# 4. ОСНОВНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТАРЫ

Для производства тары широко используют такие материалы, как бумага, картон, пластмассы, металл, стекло, керамика и дерево. Среднегодовые объемы их применения в мире, в Европе и в наиболее развитых странах приведены в табл. 2.1.

В данной главе рассмотрены физические, химические, технологические и конструкционные свойства основных упаковочных материалов. Совокупность таких сведений имеет первостепенное значение при выборе материала, разработке конструкции и технологии производства тары и упаковки.

В производстве тары и упаковки используется от 30 до 40% производимых во всем мире пластмасс. В полимерную тару упаковываются продукты питания, напитки, косметическая, фармацевтическая продукция, промышленные товары, химические

Таблица 4.1

**Годовой объем использования пластмасс для упаковки продукции различных отраслей промышленности Англии [52]**

Упаковываемая продукция	Использование пластмасс	
	тыс. т	%
Продукты питания	274,1	21
Напитки	91,4	7
Косметика, фармацевтика	365,5	28
Промышленные товары	78,3	6
Химические и строительные материалы	496,0	38

продукты, строительные материалы и т. д. Объемы использования пластмасс в производстве тары для продукции различных отраслей промышленности Англии приведены в табл. 4.1.

## 4.1. Классификация и общая характеристика

Полимерами называют природные и искусственные химические соединения, в молекулах которых одинаковые звенья повторяются большое число раз. Эти многократно повторяющиеся звенья низкомолекулярного химического вещества — мономера — соединены между собой различными видами химических связей.

В зависимости от характера процессов, сопутствующих формированию изделий, полимеры подразделяют на реактопласты и термопласты.

**Реактопластами** называют материалы, переработка которых в изделия сопровождается химическими реакциями образования трехмерной структуры — отверждением. Отвержденные реактопласты теряют способность переходить в вязкотекучее состояние.

Процесс формирования изделий совмещен с процессом окончательного формирования сетчатого полимера, который протекает в трудно контролируемых условиях. Поэтому молекулярная структура реактопластов трудно воспроизводима.

К **термопластам** относятся полимеры, которые с повышением температуры претерпевают фазовые изменения, переходя из твердого состояния в вязкотекучее. Если при этом температура не превысила того предела, за которым начинается термическое разложение полимера с выделением паро- или газообразных продуктов (мономеров или их составляющих), то при охлаждении термопласт снова переходит в твердое состояние. Такие фазовые переходы с термопластами можно осуществлять многократно. Эта особенность является важнейшим преимуществом термопластов перед реактопластами и обуславливает их широкое применение в упаковочной промышленности.

Формирование молекулярной структуры терпомластов осуществляется на стадии синтеза в строго контролируемых условиях. Благодаря этому возможно получение полимеров с определенной и воспроизводимой молекулярной структурой.

#### 4.1.1. Классификация по химической структуре

Изменение химической структуры, молекулярных характеристик в решающей степени определяет комплекс свойств макромолекул (межмолекулярное взаимодействие, растворимость, термодинамическая и кинетическая гибкость макромолекул, поляризуемость, способность кристаллизоваться и т. д.), от которого зависят свойства полимера. Молекулярные характеристики полимеров, состоящих из линейных или разветвленных макромолекул, определяются химической структурой звеньев, образующих основную цепь, регулярностью построения (пространственной упорядоченностью чередования звеньев и разветвленностью цепи), средним молекулярным весом и полидисперсностью макромолекул.

*По химической структуре звеньев макромолекул различают карбоцепные и гетероцепные полимеры.*

**Карбоцепными** называют полимеры, основная цепь макромолекул которых содержит только атомы углерода. К ним относятся преимущественно полимеры непредельных углеводородов этиленового ряда с различными боковыми заместителями. Свойства этих полимеров закономерно изменяются в зависимости от природы боковых заместителей в мономере. Среди карбоцепных полимеров наибольшее распространение получили полиолефины (полиэтилен, полипропилен, полибутен, полиизобутилен), галогенопроизводные полиолефинов (поливинилхлорид, политетрафторэтилен, политрифторхлорэтилен), а также полистирол, насыщенные полиакрилаты и различные сополимеры.

К **гетероцепным** относятся полимеры, в основной молекулярной цепи которых помимо углерода содержатся атомы других элементов. Наиболее часто такими атомами являются атомы кислорода (простые и сложные полиэферы), азота (поли-

амиды, полиуретаны, аминокальдегидные смолы, полиимиды и др.), серы (полисульфоны), кремния (кремнийорганические смолы) и некоторые другие.

#### 4.1.2. Классификация по методам синтеза

Полимерные материалы получают различными методами синтеза — полимеризацией, поликонденсацией.

**Полимеризацией** называют процесс получения высокомолекулярных веществ, при котором макромолекула образуется путем последовательного присоединения молекул одного или нескольких низкомолекулярных веществ (мономеров) к растущему активному центру.

По числу участвующих в синтезе мономеров различают **гомополимеризацию** (один мономер) и **сополимеризацию** (два и более).

Полимеризация протекает без выделения побочных соединений.

В зависимости от природы активного центра и механизма роста цепи различают **радикальную и ионную полимеризацию**.

При **радикальной полимеризации** активным центром является свободный радикал, а рост цепи является гомолитической реакцией, сопровождающейся разрывом ненасыщенных связей у одинаковых атомов. Получаемые полимеры характеризуются обычно разветвленной структурой макромолекул с высокой полидисперсностью.

При **ионной полимеризации** активным центром являются ионы или поляризованные молекулы, а раскрытие двойной связи (или цикла) происходит гетеролитически, по местам гетероатомов (кислорода, азота, серы). Получаемые ионной полимеризацией на твердых катализаторах полимеры отличаются неразветвленной стереорегулярной структурой с малой полидисперсностью.

**Поликонденсацией** называют процесс синтеза полимеров из би- или полифункциональных соединений, в котором рост макромолекул происходит путем химического взаимодействия молекул мономеров друг с другом и с промежуточными продук-

тами синтеза. Поликонденсация, как правило, сопровождается выделением побочного низкомолекулярного вещества (воды, спирта, галогеноводорода и др.). Получаемые поликонденсацией гетероцепные полимеры обладают неразветвленной линейной структурой макромолекул с довольно высокой полидисперсностью.

Молекулярная масса макромолекул определяется числом повторяющихся звеньев  $n$ , которое называется степенью полимеризации. Однако синтетические полимеры нельзя характеризовать одним определенным значением  $n$  или молекулярной массы. Практически любой полимер в реальности представляет собой набор макромолекул с различной степенью полимеризации (полимергомологов). Это свойство называется полидисперсностью или полимолекулярностью.

Молекулярная масса  $M$  связана с  $n$  соотношением

$$M = m_0 n, \quad (4.1)$$

где  $m_0$  — молекулярная масса повторяющегося звена.

Молекулярная масса полимеров является средней статистической величиной и определяется видом молекулярно-массового распределения. В зависимости от способа усреднения различают среднечисловую, среднемассовую и  $Z$ -среднюю (среднеседиментационную) молекулярные массы.

На практике наиболее часто используют понятие среднечисловой молекулярной массы ( $\overline{M}_n$ ), определяемой отношением общей массы полимера  $M_0$  к общему числу макромолекул  $N_0$ :

$$\overline{M}_n = \sum_{i=1}^N v_i M_i, \quad (4.2)$$

где  $v_i$  — числовая доля фракции макромолекул  $i$ -вида с  $M = M_i$ ;  $N$  — число фракций.

Значение  $\overline{M}_n$  экспериментально определяют методами осмометрии, эбулиоскопии, криоскопии, а также по данным количественного определения концевых групп макромолекул спектроскопическим и химическим методами.

Среднемассовую молекулярную массу  $\overline{M}_w$  выражают уравнением

$$\overline{M}_w = \sum_{i=1}^N \omega_i M_i, \quad (4.3)$$

где  $\omega_i$  — массовая доля фракции макромолекул  $i$ -вида с  $M = M_i$ .

Экспериментально  $\overline{M}_w$  определяют при измерении методом светорассеяния, а также по данным измерения седиментационного равновесия.

Графически  $\overline{M}_n$  и  $\overline{M}_w$  представляют собой абсциссы центров тяжести площадей под кривыми числового и массового (соответственно) распределения  $M$ . Практически всегда для любых полимеров  $\overline{M}_w \geq \overline{M}_n$ .

Молекулярная и надмолекулярная структуры полимеров находятся в прямой зависимости от химической структуры и методами синтеза (табл. 4.2).

### 4.1.3. Классификация по физической структуре

Физическая структура твердых полимеров определяется взаимным расположением (упаковкой) макромолекул и зависит от стереорегулярности и гибкости цепей.

**Стереорегулярными** называют полимеры, макромолекулы которых состоят из звеньев, имеющих одинаковые или различные, но повторяющиеся в определенной периодичности пространственные конфигурации. Наиболее существенным отличием стереорегулярных полимеров от нерегулярных (атактических) является способность первых образовывать трехмерные кристаллы.

Под **гибкостью макромолекул** понимают способность полимерных цепей изменять свою конформацию в результате внутримолекулярного (макроброуновского) теплового движения звеньев (равновесная или термодинамическая гибкость) или же под влиянием внешних механических сил (кинетическая или механическая гибкость). Конформация — это переменное распределение в пространстве атомов и атомных групп, образующих макромолекулу. Формально переход от понятия конфигурации к понятию конформации производится путем учета макроброуновского движения звеньев и боковых групп.

### Методы синтеза и молекулярная структура распространённых полимеров

Полимеры	Условное обозначение	Метод синтеза	Структура мономерного звена	Стереорегулярность	Среднемолекулярный вес, тыс.	Степень разветвления
1	2	3	4	5	6	7
<b>Карбоцепные</b>						
Полиэтилен низкой плотности	ПЭНП	Радикало-цепная полимеризация этилена при высоком давлении (до 150 МПа) и температуре до 473 К	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Нерегулярная структура	25-50	До 20 на 1000 атомов углерода
Полиэтилен высокой плотности	ПЭВП	Ионно-цепная полимеризация этилена	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Стереорегулярная структура	80-400	1,5-5 на 1000 атомов углерода
Полипропилен	ПП	Ионно-цепная полимеризация пропилена	$-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$	То же	80-200	Низкая
Полибутен-1	ПБ-1	Ионно-цепная полимеризация бутена-1	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_2\text{H}_5}{\text{CH}}-$	То же	120-200	То же
Полиметилпентен	ПМП	Ионно-цепная полимеризация метилпентена	$-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}(\text{C}_2\text{H}_5)}{\text{CH}}-\text{C}_2\text{H}_5$	То же	60-120	То же
Поливинилхлорид	ПВХ	Радикало-цепная полимеризация винилхлорида в эмульсии, реже — в суспензии или в среде мономера	$-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$	Зависит от метода и условий синтеза	30-150	1,7-5 на 1000 атомов углерода
Политетрафторэтилен	ПТФЭ	Радикало-цепная полимеризация тетрафторэтилена в эмульсионном методе при давлении до 10 МПа	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	Регулярная линейная структура	140-960	Низкая



1	2	3	4	5	6	7
Политрифторхлорэтилен	ПТФХЭ	Радикало-цепная эмульсионная полимеризация трифторхлорэтилена	$\begin{matrix} \text{Cl} \\   \\ -\text{CF}_2-\text{C}- \\   \\ \text{F} \end{matrix}$	То же	56-100	То же
Полистирол	ПС	Радикало-цепная полимеризация стирола в блоке, эмульсии или суспензии	$\begin{matrix} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{matrix}$	Нерегулярная структура	80-100	Высокая
Полиметилметакрилат	ПММА	Радикало-цепная полимеризация метилметакрилата в блоке или суспензии	$\begin{matrix} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\   \\ \text{C}=\text{O} \\   \\ \text{O}-\text{CH}_3 \end{matrix}$	Нерегулярная структура	35-75	То же
<b>Гетероцепные</b>						
Простой алифатический полиэфир-пентаглас	ПТП	Ионная полимеризация 3, 3'-бис-(хлорметил) оксациклобутана	$\begin{matrix} \text{CH}_2\text{Cl} \\   \\ -\text{O}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2- \\   \\ \text{CH}_2\text{Cl} \end{matrix}$	Стереорегулярная структура	—	Низкая
Простые ароматические полиэфир-полиэфир-оксид	ПФО	Дегидрополиконденсация 2, 6-диметилфенола	$\begin{matrix} \text{CH}_3 \\   \\ \text{C}_6\text{H}_3 \\   \\ \text{O} \\   \\ \text{CH}_3 \end{matrix}$	Низкая степень регулярности	25-35	То же
Полисульфон	ПСФ	Поликонденсация солей дифенилпропана с 4, 4'-дихлордифенилсульфоном	$\begin{matrix} \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 \\   & &   \\ \text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{S}-\text{C}_6\text{H}_4 \\   & &   \\ \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 \end{matrix}$	Стереорегулярная структура	30-60	То же
Смешанный простой полиэфир-полиоксифир	ПОЭ	Ионная полимеризация диглицидного эфира дифенилопропана	$\begin{matrix} \text{CH}_2 \\   \\ \text{CH}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}- \\   \\ \text{OH} \end{matrix}$	Нерегулярная структура	25-40	То же

1	2	3	4	5	6	7
Полиацетали						
Полиформальдегид	ПФ	Ионная полимеризация формальдегида или его циклического триоксиана	-CH <sub>2</sub> -O-	Стереорегулярная структура	30-100	То же
Сложные ароматические полиэфир						
Полиарилат Д	ПАД	Гетерофазная поликонденсация хлорангидридов терефталевой кислоты с солями двухатомного фенола		То же	50-100	То же
Поликарбонат	ПК	Поликонденсация в растворе или на границе раздела фаз хлорангидрида угольной кислоты (фосгена) с дифенилолпропаном		Регулярная структура	20-35	То же
Полиамиды						
Алифатические						
Поликапроамид	ПА-6	Ионная полимеризация капролактама	-NH-C(=O)-(CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> -	То же	36-40	То же
Полигексаметиленадипамид	ПА-6,6	Поликонденсация гексаметилендиамина и адипиновой кислоты	-NH-C(=O)-(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> -C(=O)-NH-(CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> -	То же	40-45	То же
Ароматические						
Фенилон	ФН	Гетерофазная поликонденсация м-фенилендиамина и изофталевой кислоты		Регулярная структура	20-70	То же

Гибкость макромолекул обусловлена тем, что мономерные звенья при тепловом или ином другом движении вращаются вокруг простых (одиночных) связей основной цепи. Любое изменение конформации макромолекул сопряжено с серией таких элементарных поворотов. Главным ограничителем свободы поворотов являются силы взаимодействия боковых групп соседних звеньев.

*Термопласты могут иметь кристаллическую или аморфную физическую структуру.*

Стереорегулярные макромолекулы с высокой гибкостью цепей кристаллизуются чаще всего с образованием пластинчатых кристаллов — ламелей. Ламели в свою очередь участвуют в образовании более крупных и разнообразных по форме структур, морфология которых зависит от условий кристаллизации.

Для аморфной структуры характерен лишь ближний порядок расположения, соблюдающийся на расстояниях, соизмеримых с размером мономерного звена.

Кристаллическую структуру характеризуют большие размеры упорядоченного расположения цепей, соизмеримые с размерами макромолекул (дальний порядок).

Кристаллические полимеры обладают большей прочностью, жесткостью, меньшей деформационной способностью, текучестью. Аморфные полимеры отличаются высокой прозрачностью, пластичностью, способностью к образованию высокоориентированных структур.

Особенностью кристаллической структуры полимеров является ее высокая дефектность, вплоть до возникновения аморфных участков, образующих самостоятельную фазу. Это объясняется нарушениями стереорегулярности отдельных макромолекул, наличием ответвлений от основной цепи, присутствием низкомолекулярных фракций и различных примесей. На практике структура термопластов преимущественно смешанная, содержащая как кристаллическую, так и аморфную фазы. Соотношение фаз характеризует степень кристалличности, которая показывает объемную долю кристаллов в общем объеме полимера. Степень кристалличности зависит от технологии получения материала, режимов его переработки в изделие, от температурно-силовых воздействий, от времени и других факторов.

Термопласты могут находиться в двух агрегатных состояниях — твердом и жидком. Парообразного состояния у них не существует: они разлагаются при нагревании задолго до того, как смог бы образоваться пар.

**Твердое состояние** полимеров характеризуется тем, что перемещение молекулярных цепей и отдельных звеньев отсутствует, а тепловое движение проявляется лишь в колебании атомов.

По мере нагревания появляется определенная подвижность отдельных участков полимерной молекулы, в то время как молекула в целом еще лишена возможности перемещаться. Переход в такое промежуточное между твердым и жидким состояние полимеров аморфной структуры называется **релаксационным переходом**.

Важнейшим релаксационным переходом, называемым первичным или  $\alpha$ -переходом, является переход в высокоэластичное состояние, при котором относительную подвижность приобретают большие сегменты полимерной цепи. Большинство термопластов в этом состоянии становятся мягкими, упругими и напоминают резину. В таком состоянии их часто называют резинообразными. Разделяет температурную шкалу твердого, иначе называемого стеклообразным, и высокоэластичного состояний температуры стеклования  $T_c$ . При охлаждении полимера ниже  $T_c$  происходит фиксирование неравновесной упаковки макромолекул — застекловывание, отверждение полимера. При дальнейшем понижении температуры происходит последовательное замораживание различных форм внутримолекулярного теплового движения, что характеризуется так называемыми вторичными релаксационными переходами в стеклообразном состоянии и сопровождается изменениями физических свойств полимера. По мере понижения температуры различают следующие виды вторичных релаксационных переходов:

- а)  $\beta$ -переход, связанный с замораживанием подвижности боковых групп;
- б)  $\gamma$ -переход, вызванный прекращением кооперативной подвижности нескольких атомов основной цепи;
- в)  $\delta$ -переход, обусловленный утратой подвижности концевых звеньев в основной цепи и ответвлениях.

При нагревании релаксационные переходы расположены в обратном порядке и при этом говорят не о замораживании, а о размораживании подвижности определенных участков полимерной цепи.

Выше  $T_c$  у аморфных полимеров возможно проявление подвижности макромолекул в целом — макроброуновского движения, что приводит к появлению текучести. По сути, это дополнительный релаксационный переход, характеризующийся температурой текучести  $T_{\text{тек}}$ .

**Важнейшим фазовым переходом** является плавление кристаллической структуры полимеров. Температуру верхней границы завершения процесса плавления кристаллов называют температурой плавления  $T_{\text{пл}}$ . Значение  $T_c$  аморфной фазы кристаллических полимеров всегда ниже  $T_{\text{пл}}$ . Как правило,  $T_c$  составляет от  $1/2$  до  $2/3$   $T_{\text{пл}}$ . С повышением степени кристалличности  $T_c$  аморфной фазы снижается.

Принципиальное различие между фазовым и релаксационным переходами заключается в том, что фазовый переход является термодинамически равновесным переходом, а релаксационный — неравновесным, зависящим от временного фактора.

Изучают фазовые и релаксационные переходы методами, основанными на определении температурной зависимости термодинамических параметров — удельного объема (дилатометрия), удельной теплоемкости, или энтальпии (калориметрия, дифференциальный термический анализ). Кроме того, проводят и прямое изучение деформируемости полимеров в широком интервале температур при заданном режиме нагружения и нагрева (термомеханические исследования).

Дилатометрические исследования показывают, что фазовые и релаксационные переходы в полимерах связаны с изменением только свободного объема. Под свободным объемом  $V_c$  понимают разность между реальным объемом тела  $V$  и «занятым» объемом, т. е. суммарным объемом плотно упакованных молекул данного тела  $V_0$ :

$$V_c = V - V_0. \quad (4.4)$$

Таким образом, свободный объем определяется совокупностью микрополостей размером порядка размеров отдельных

атомов или небольших групп атомов. Наличие  $V_c$  связано с нерегулярностью упаковки молекул.

В полностью кристаллическом полимере при фазовом переходе — плавлении в области температуры  $T_{пл}$  — наблюдается скачок в изменении свободного объема (рис. 4.1, кривая 2, г). В полностью аморфном полимере при релаксационном переходе наблюдается перелом на прямолинейном графике зависимости  $V_c$  от температуры (кривая 1, а). В реальных аморфно-кристаллических полимерах характер изменения  $V_c$  от температуры является промежуточным между характером изменения  $V_c$  полностью аморфных и полностью кристаллических полимеров (кривые 2, б, в).

Экспериментально установлено, что для большинства полимеров при  $T_c$  объемная доля свободного объема  $f_c$  одинакова и составляет

$$f_c = \frac{V_c}{V} = 0,025 + 0,003. \quad (4.5)$$

На основании этого получено эмпирическое соотношение между  $T_c$  и коэффициентами объемного температурного рас-

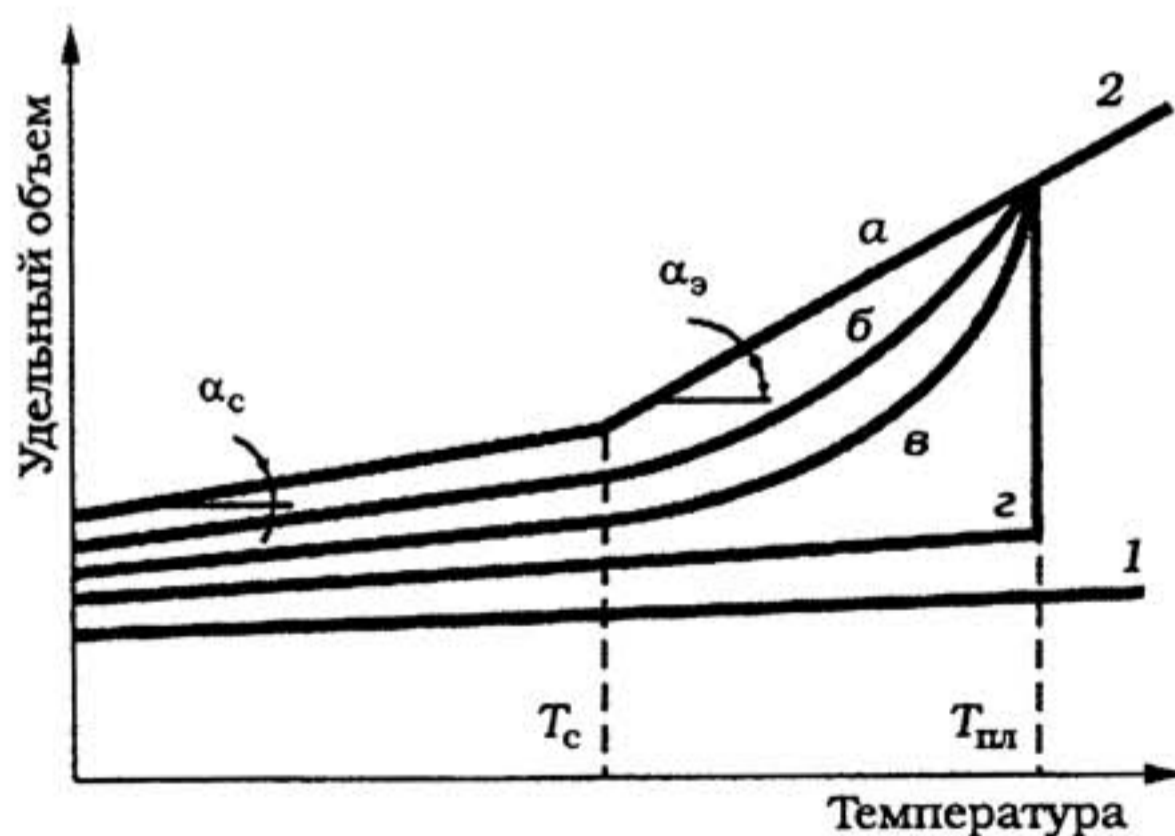


Рис. 4.1. Температурная зависимость удельного объема термопластичных полимеров:

1 — занятого; 2 — свободного (а — полностью аморфные полимеры, б, в — аморфно-кристаллические с различной степенью кристаллическости, г — полностью кристаллические)

ширения в стеклообразном  $\alpha_c$  (при  $T < T_c$ ) и высокоэластическом  $\alpha_3$  (при  $T > T_c$ ) состояниях (правило Бойера-Симхи):

$$(\alpha_3 - \alpha_c)T_c = 0,113. \quad (4.6)$$

Низкая интенсивность изменения свойств при многих релаксационных переходах требует для их исследования применения методов, более чувствительных к изменению подвижности макромолекул. Такими методами являются динамический механический, диэлектрический, ядерного магнитного резонанса, радиотермолюминесцентный и др. Наибольшее практическое значение получили динамические механические, в том числе акустические, испытания. По их результатам определяют температурные зависимости таких важных показателей механических свойств, как динамический модуль упругости, скорость распространения звука, модуль потерь, тангенс угла механических потерь, логарифмический декремент затухания и т. д.

Типичные температурные зависимости модуля упругости и показателя (тангенса угла) механических потерь аморфного полимера представлены на рис. 4.2. Степень снижения модуля упругости или величина максимума механических потерь харак-

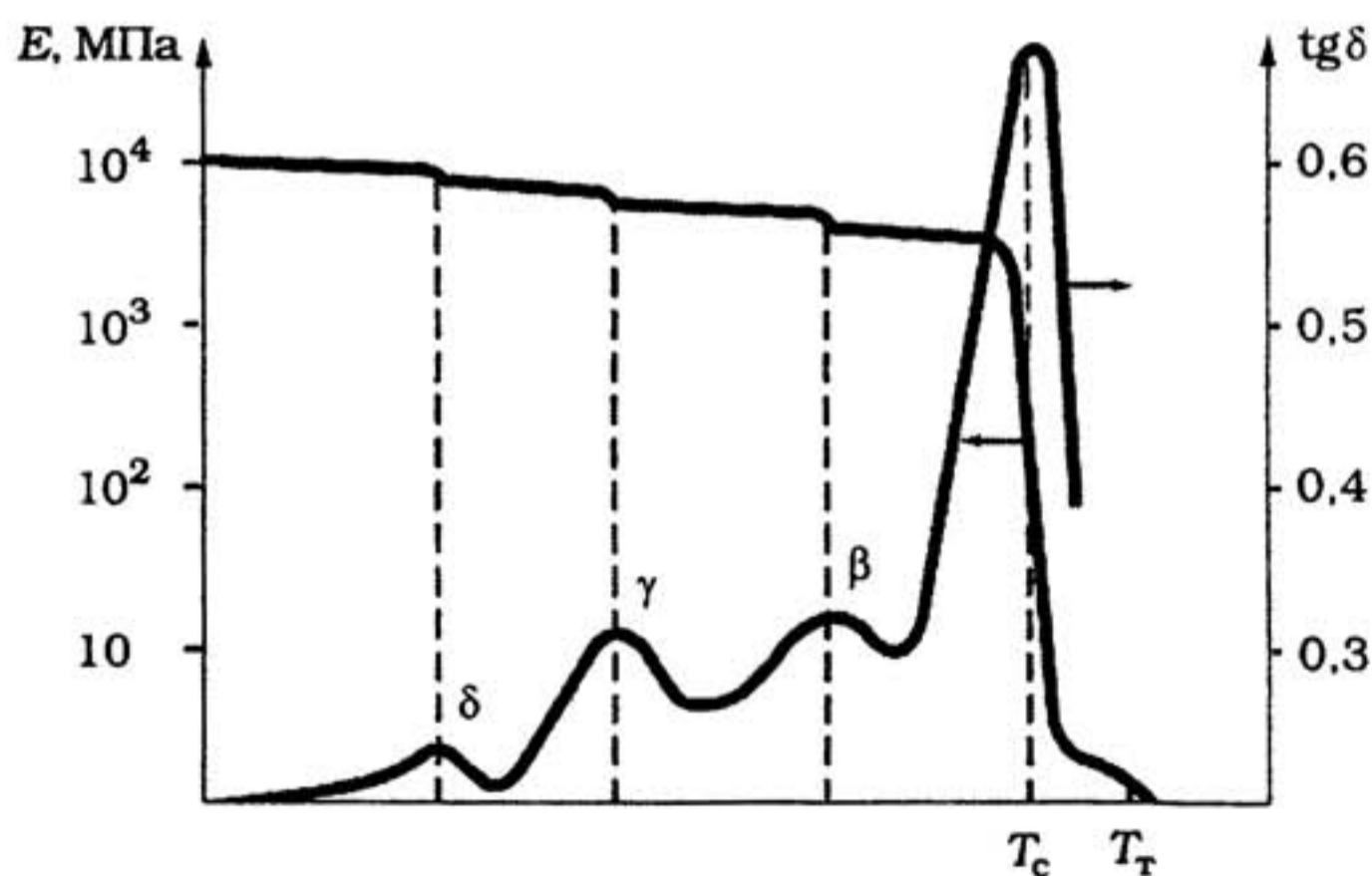


Рис. 4.2. Температурные зависимости динамического модуля упругости  $E$  и тангенса угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  аморфного полимера

теризует интенсивность соответствующего релаксационного перехода. В области вторичных релаксационных переходов модуль упругости изменяется незначительно, а в области температуры стеклования уменьшается на несколько десятичных порядков.

Температурная зависимость механических свойств кристаллических полимеров в значительной степени определяется соотношением кристаллической и аморфной фаз (рис. 4.3).

Анализ структуры и физических переходов наиболее важных в производстве упаковки термопластичных полимеров позволяет разделить их на три основные группы (табл. 4.3) [38].

Первую группу составляют аморфные или трудно кристаллизующиеся полимеры с жесткими макромолекулами. Их максимальная степень кристалличности не превышает 25%, а  $T_c$  значительно превосходит комнатную температуру. Это карбоцепные полимеры со стереонерегулярным строением макромолекул — полистирол, полиметилметакрилат, поливинилхлорид, их статистические сополимеры с небольшим числом звеньев другого мономера и ароматические гетероцепные полимеры — простые полиэферы (полифениленоксид, полисуль-

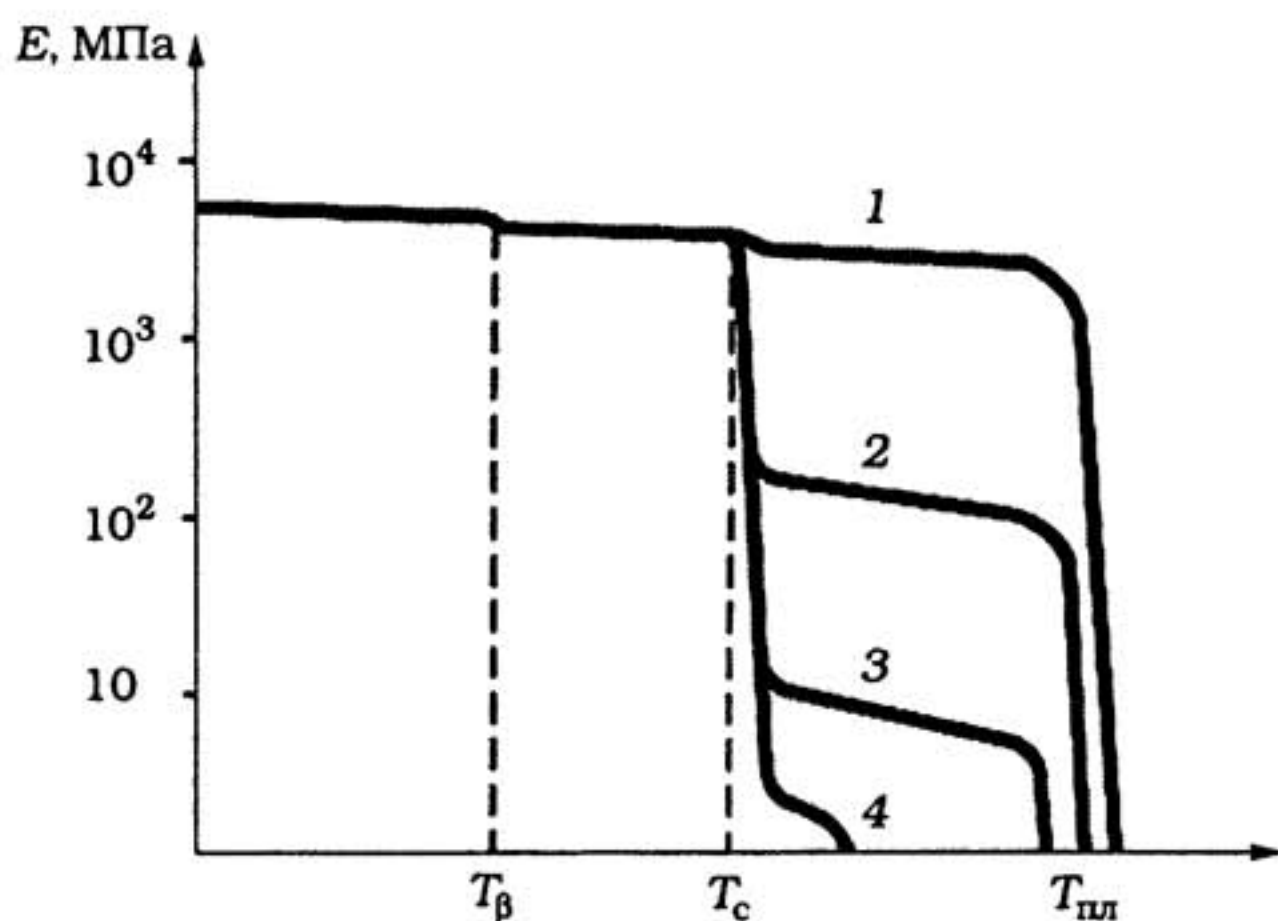


Рис. 4.3. Температурная зависимость динамического модуля упругости кристаллических полимеров с высокой (1), средней (2), низкой (3) степенью кристалличности и аморфного полимера (4)



**Степень кристалличности  
и температурные переходы термопластичных полимеров,  
используемых для производства упаковки**

Группа	Полимер	Максимальная степень кристалличности, %	$T_c$ , °C	$T_{пл}$ , °C	Дополнительные релаксационные переходы, °C
1	Полистирол	0	90–110	—	20–60
	Полиметилметакрилат	0	100–115	—	5–20
	Поливинилхлорид	10–25	70–90	175–310	–30–10
	Полифениленоксид	20	200–210	267	–100
	Полисульфон	10	180–190	—	–100
	Поликарбонат	25	140–150	275	–100–80
	Полиарилат Д	—	155–175	275	—
	Фенилон	—	270	430	—
	Поли(дифенилоксид)пиромеллитимид	10	300–350	—	230
2	Полиметилпентен	40–65	30–50	245	—
	Политрифторхлорэтилен	30–40	50–70	208–210	–50–40
	Пентапласт	30	8	180	—
	Поликпроамид (полиамид 6)	50–70	50–70	225	–70–50; –120
	Полигексаметиленадипамид (полиамид 6,6)	50–75	50–65	264	–70–50; –120
3	Полиэтилен				
	низкой плотности	55–67	–110–90	120	50; –5
	высокой плотности	75–90	–120–110	124–131	70; –20
	Полипропилен	80–95	–20–5	165–170	60; –70
	Полибутен-1	70–80	–25	135	—
	Политетрафторэтилен	50–95	–110–80	327	125–135
Полиформальдегид	75–96	–80–70	165–180	130	

фон), сложные полиэфиры (поликарбонаты, полиакрилаты), полиамиды (фенилон). При комнатной температуре это жесткие упругие материалы (полимерные стекла), верхний температурный предел эксплуатации ограничен  $T_c$ . Формование изделий осуществляется при температуре выше  $T_{тек}$  в случае литья под давлением или экструзии или при температуре выше  $T_c$  в случае термоформования.

Ко второй группе относятся кристаллизующиеся полимеры со средней степенью кристалличности,  $T_c$  которых близка к комнатной температуре. В эту группу входят полиметилпентен, политрихлорфторэтилен, пентапласт, алифатические полиамиды. Верхний температурный предел эксплуатации таких полимеров определяется степенью кристалличности и может колебаться от  $T_c$  аморфной фазы до  $T_{пл}$  кристаллической, а переработка в изделия производится при температуре выше  $T_{пл}$ .

Третью группу составляют кристаллизующиеся полимеры с высокой степенью кристалличности,  $T_c$  аморфной фазы которых значительно ниже комнатной. К этой группе относятся полиэтилен, полипропилен, полибутен-1, политетрафторэтилен и полиформальдегид. В нормальных условиях в этих полимерах сочетаются свойства, присущие аморфной фазе, находящейся в высокоэластическом состоянии и жесткой кристаллической фазе. Поэтому в области температур от  $T_c$  до  $T_{пл}$  их поведение в решающей мере определяется степенью кристалличности. Верхний температурный предел эксплуатации ограничивается  $T_{пл}$ . Ниже  $T_c$  эти термопласты становятся жесткими и хрупкими полимерными стеклами. Переработка в изделия литьем под давлением или экструзией осуществляется при температуре выше  $T_{пл}$ , а термоформованием — вблизи  $T_{пл}$ .

Таким образом, технологические и эксплуатационные свойства полимеров каждой группы предопределены их структурой и температурными физическими переходами. Физико-механические свойства материалов каждой группы при обычных условиях довольно близки.

## 4.2. Механические свойства

Механические свойства полимеров зависят от условий их получения, способа переработки и предварительной обработки. Общий характер механического поведения конкретного полимера определяется тем, в каком физическом состоянии он находится. Наибольшее распространение получило мнение, что линейные и разветвленные полимеры могут находиться в трех со-

стояниях — стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем [10]. Трехмерные, или пространственно сшитые, полимеры могут находиться лишь в первых двух состояниях. Ряд ученых выделяют пять и более основных состояний полимеров — хрупкое, вынужденно-эластическое, высокоэластическое, вязкотекучее, кристаллическое и ориентированное [7, 8].

**Хрупкое состояние** присуще полимерам в области температур ниже  $T_{хр}$ . При этом стеклообразные аморфные и кристаллические полимеры разрушаются по хрупкому механизму при малых деформациях, соблюдается закон Гука о пропорциональности между силой и деформацией. Механизм разрушения подчиняется теории Гриффита.

**Вынужденно-эластическое стеклообразное состояние** наблюдается у полимеров в области температур от  $T_{хр}$  до  $T_c$  (зона I, рис. 4.4). Деформации при растяжении в этом состоянии представляют собой сложный процесс. На начальном участке I (рис. 4.5) деформации примерно пропорциональны напряжению. В точке А, когда напряжение достигает значения  $\sigma_B$ , на-

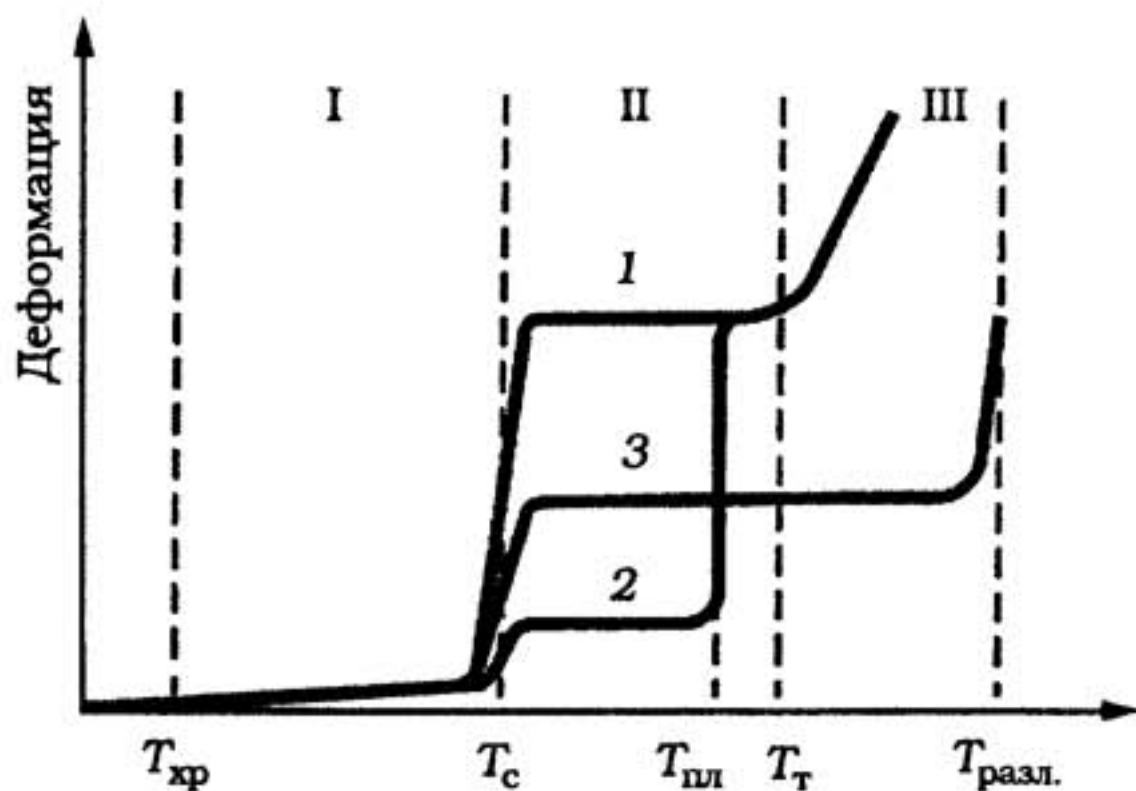


Рис. 4.4. Типичные термомеханические кривые аморфного (1), кристаллического (2) и сшитого сетчатого (3) полимеров; I, II, III — области стеклообразного, высокоэластического и вязкотекучего состояний соответственно.  $T_{хр}$  — температура хрупкости;  $T_c$  — стеклования;  $T_{пл}$  — плавления;  $T_T$  — текучести;  $T_{разл.}$  — начала химического разложения

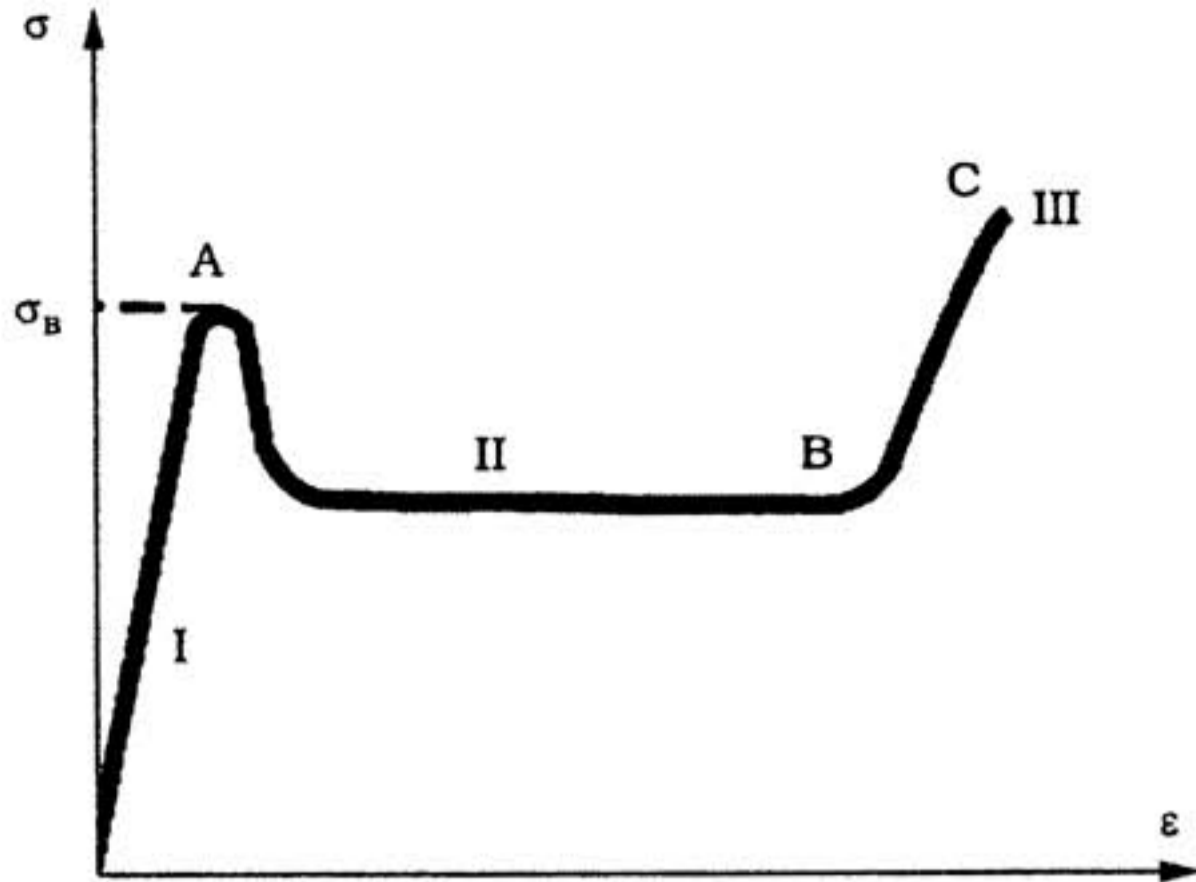


Рис. 4.5. Типичная диаграмма растяжения аморфного стеклообразного полимера

зываемого пределом вынужденной эластичности, в наиболее слабом месте образца возникает так называемая «шейка». «Шейка» проявляется в виде местного сужения и утонения материала. При дальнейшем растяжении реализуются большие значения эластических деформаций до тех пор, пока «шейка» не распространится на всю рабочую часть образца (точка В). Такие большие деформации по своей природе являются высокоэластическими, поскольку связаны с изменением конформаций макромолекул. На участке III в образце развивается множество микротрещин, которые приводят к разрушению в точке С.

В **высокоэластическом состоянии** полимер находится в зоне II (см. рис. 4.4), расположенной между  $T_c$  и  $T_T$ . Его молекулярная подвижность становится настолько большой, что структура в ближнем порядке успевает перестраиваться вслед за изменением температуры, как это наблюдается в жидкостях. Таким образом, разрыву предшествует обратимая высокоэластическая деформация, связанная с ориентацией звеньев цепей макромолекул, а также надмолекулярных образований.

В **вязкотекучем состоянии** (зона III) выше  $T_T$  происходят необратимые пластические деформации, связанные с проскальзыванием макромолекул друг относительно друга.

Отличительной особенностью поведения полимеров является их ярко выраженная зависимость от скорости приложения нагрузки, температуры и длительности нагружения. Под действием механических сил все тела испытывают напряжения и деформации. При их критическом значении или длительном воздействии происходит разрушение. В соответствии с этим различают деформационные и прочностные свойства.

Механические свойства материалов определяют проводимыми по определенным методикам механическими испытаниями. Испытания различают по типам деформации (одноосное и двухосное растяжение и сжатие, всестороннее сжатие, изгиб, сдвиг, кручение, вдавливание и др.), а также по режимам нагружения (постоянная нагрузка или деформация, циклическая нагрузка, удар и др.).

#### 4.2.1. Деформационные свойства

Деформация полимеров имеет вязкоупругий характер. Наибольшее развитие в описании деформационных свойств полимеров получила теория вязкотекучести, которая рассматривает вязкоупругое тело как комбинацию идеально упругого и идеально вязкого элементов. Поведение идеально упругой составляющей в терминах классической теории упругости выражается обобщенным законом Гука и характеризуется по крайней мере двумя упругими константами — модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ . Другие константы — модуль упругости при сдвиге  $G$  и модуль объемного сжатия  $K$  — связаны с  $E$  и  $\mu$  следующими соотношениями:

$$G = \frac{E}{1 + \mu}; \quad (4.7)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}; \quad (4.8)$$

$$D = \frac{1}{E}; \quad I = \frac{1}{G}, \quad (4.9)$$

где  $D$  и  $I$  — податливость при растяжении-сжатии и сдвиге соответственно. Сжимаемость

$$\beta = \frac{1}{K}. \quad (4.10)$$

Поведение идеально вязкой составляющей деформации выражают законом Ньютона для идеально вязкой жидкости и характеризуют вязкостью при сдвиге  $\eta$ .

Упругая деформация в твердом теле связана с деформацией валентных углов и связей между атомами. Поскольку отклонения в длинах связей и искажения валентных углов не могут быть большими, чисто упругая деформация по величине не может быть большой. При снятии нагрузки она мгновенно исчезает.

Природа эластической деформации связана с изменением формы макромолекул, обусловленной наличием определенной свободы вращения отдельных групп относительно валентных связей в главной цепи полимера при сохранении валентных углов и длин этих связей. Эластические деформации могут быть большими. Они характеризуются ярко выраженным комплек-

сом релаксационных явлений, приводящих к постепенному их развитию и медленному исчезновению.

Многочисленные физические модели деформации полимеров под нагрузкой предусматривают моделирование упругой деформации пружиной с модулем  $E_1$ , а эластической деформации — соединенными параллельно пружиной с модулем  $E_2$  и демпфером с жидкостью вязкостью  $\eta_2$  (модель Кельвина-Фойхта-Мейера). Соединенные последовательно упругая пружина и эластический элемент Кельвина-Фойхта-Мейера моделируют упругую и эластическую деформации полимера (рис. 4.6) [2]. Полная деформация такой модели составляет

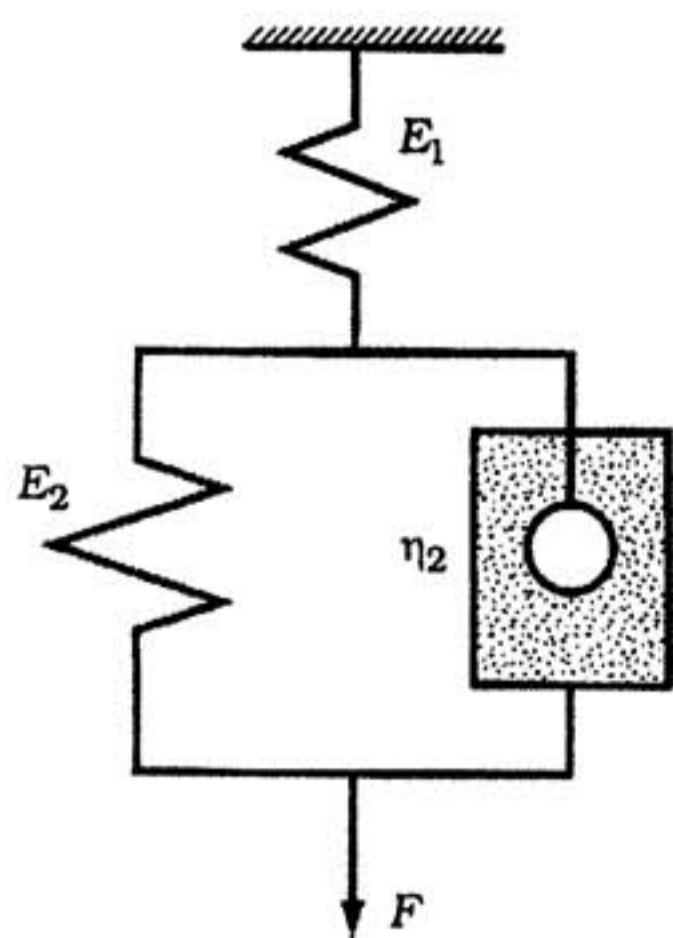


Рис. 4.6. Простейшая модель полимерного тела, учитывающая упругие и эластические деформации

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_1} + \frac{1}{\eta_2} \int_0^t e^{-\frac{(t-\tau)}{\Theta}} \sigma(\tau) d\tau, \quad (4.11)$$

где  $\tau$  — текущее время;  $\Theta$  — время запаздывания.

Параметр  $\Theta$  соответствует времени, по истечении которого деформация в образце будет составлять  $(1-1/e)$  часть от равновесной:

$$\Theta = \frac{\eta_2}{E_2}. \quad (4.12)$$

В частном случае при  $\sigma = \text{const}$  соотношение (4.11) преобразуется в уравнение Александрова–Лазуркина

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right). \quad (4.13)$$

Первый член этого уравнения отражает упругую часть деформации, а второй — эластическую.

Следует заметить, что подобное моделирование позволяет представить механизм деформирования лишь в общем виде и не отражает всего комплекса сложных процессов, протекающих в полимере. Даже в области малых упругих деформаций модуль Юнга, моделируемый модулем упругости пружины  $E_1$ , непостоянен. Измерение модуля Юнга на звуковых и ультразвуковых частотах при малых амплитудах динамической силы и деформации с учетом изменения геометрии образца при его растяжении, т. е. в условиях, когда измеряемая величина  $E$  отражает только упругую реакцию и подавлены эффекты, связанные с релаксацией напряжения, показало, что при малых деформациях (до  $E = 2-3\%$ ) модуль упругости убывает [26]. При деформациях более 3%, после перехода через «предел вынужденной эластичности», модуль начинает возрастать. На этих обоих участках изменение модуля линейно связано с деформацией [13]:

$$E = E_0 + B\varepsilon \quad \text{или} \quad \frac{E}{E_0} = 1 + \frac{B}{E_0} \varepsilon, \quad (4.14)$$

где  $E_0$  — «начальный» модуль Юнга;  $B$  — коэффициент изменения модуля Юнга.

Обычно вязкоупругие свойства полимеров исследуются в нескольких простейших режимах нагружения. Основные из них — переходные режимы ползучести и релаксации напряжения, а также динамические режимы.

Под ползучестью понимают процесс нарастания во времени деформации в режиме постоянного истинного напряжения. Ползучесть проявляется даже у весьма жестких полимеров и обусловлена развитием вынужденно-эластических и пластических деформаций.

В режиме ползучести к образцу прикладывается напряжение  $\sigma_0$ , которое поддерживается постоянным в процессе испытаний:  $\sigma_0 = \text{const}$ . Вязкоупругое поведение полимера выражается в том, что деформация  $\epsilon$  не сразу достигает постоянного значения (если оно существует), а возрастает с течением времени по закону [48]

$$\epsilon(t) = \left[ I_0 + \frac{t}{\eta_2} + \psi(t) \right] \sigma_0, \quad (4.15)$$

где  $I_0$  — мгновенная упругая податливость ( $I_0 = 1/E_0$ );  $t/\eta_2$  — функция течения при произвольной длительности воздействия  $\sigma_0$ ;  $\psi(t)$  — функция ползучести, характеризующая нарастание обратимой деформации. Учитывая, что

$$\epsilon_0 = I_0 \sigma_0, \quad (4.16)$$

где  $\epsilon_0$  — мгновенно развивающаяся начальная упругая деформация, замеренная непосредственно в момент нагружения образца, т. е. при  $t = 0$ , уравнение (4.15) можно представить в виде

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \epsilon_{\text{п}} = \epsilon_0 + \epsilon_{\text{р}} + \epsilon_{\text{н}}, \quad (4.17)$$

где  $\epsilon_{\text{п}}$  — деформация ползучести;  $\epsilon_{\text{р}} = \epsilon_{\text{вэ}}$  — вынужденно-эластическая деформация;  $\epsilon_{\text{н}}$  — остаточная необратимая деформация.

После снятия напряжения  $\sigma_0$  протекает процесс восстановления образца — уменьшение деформации во времени. Деформация практически мгновенно уменьшается на величину  $\epsilon_0$ . Вынужденно-эластическая деформация уменьшается во вре-



мени ( $\epsilon_p = \psi_2(t)$ ), достигая равновесного значения при  $\epsilon = \epsilon_H$ . Общий вид кривой ползучести и восстановления простейшей модели полимерного тела показан на рис. 4.7.

В режиме релаксации напряжения испытания проводят при поддерживаемой постоянной деформации:  $\epsilon_{оп} = \text{const}$ . Вследствие вязкоупругости среды напряжение, развивающееся в образце, постепенно уменьшается (релаксирует) по закону

$$\sigma(t) = [E_\infty + \varphi(t)]\epsilon_{оп}, \quad (4.18)$$

где  $E_\infty$  — равновесный модуль, равный отношению напряжения после завершения релаксации к начальной деформации;  $\varphi(t)$  — функция релаксации;  $t$  — заданное время, отсчитываемое от момента начала нагружения.

Моноotonно убывающую функцию  $\varphi(t)$  и моноotonно возрастающую функцию  $\psi(t)$  обычно выражают в виде

$$\varphi(t) = \int_0^\infty F(\Theta') e^{\frac{-t}{\Theta'}} d\Theta', \quad \psi(t) = \int_0^\infty f(\Theta) e^{\frac{-t}{\Theta}} d\Theta, \quad (4.19)$$

где  $\Theta$  и  $\Theta'$  — время запаздывания и релаксации;  $f(\Theta)$  и  $F(\Theta')$  — функции распределения времени запаздывания и релаксации.

При представлении релаксационных данных наиболее распространена логарифмическая шкала времени, поэтому обыч-

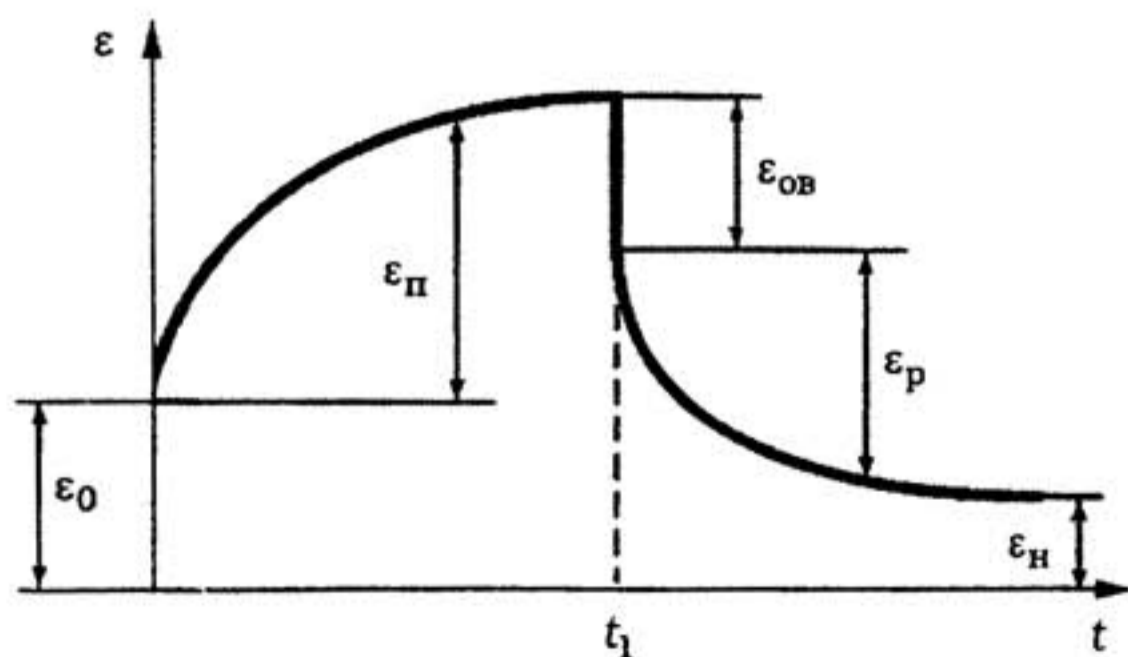


Рис. 4.7. Схема зависимости деформации от времени при постоянном напряжении

но функции  $F(\Theta')$  и  $f(\Theta)$  заменяют функциями  $H(\Theta') = \Theta' F(\Theta')$  и  $L(\Theta) = \Theta f(\Theta)$ . В этом случае формулы (4.19) записываются следующим образом:

$$\varphi(t) = \int_0^{\infty} H(\Theta') \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta'}} \right) d \ln \Theta', \quad \psi(t) = \int_0^{\infty} L(\Theta) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) d \ln \Theta. \quad (4.20)$$

В теории линейной вязкоупругости к полимерам применим принцип временной суперпозиции Больцмана, а деформации (или напряжения) связаны с предысторией нагружения (или деформирования) уравнением Больцмана–Вольтерры:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(t) &= \int_{-\infty}^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left[ I_0 + t \frac{\tau}{\eta_2} + \psi(t-\tau) \right] d\tau, \\ \sigma(t) &= \int_{-\infty}^t \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \left[ E_{\infty} + \varphi(t-\tau) \right] d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

В режиме динамических испытаний задают изменяющиеся по гармоническому или затухающему закону с частотой  $\omega$  деформации или напряжения и определяют частотные зависимости действительных ( $G'$  и  $I'$ ) и мнимых ( $G''$  и  $I''$ ) составляющих комплексного модуля упругости  $G^*(\omega)$  и комплексной податливости  $I^*(\omega)$ :

$$G^*(\omega) = G'(\omega) + iG''(\omega), \quad (4.22)$$

$$I^*(\omega) = \frac{1}{G^*(\omega)}. \quad (4.23)$$

Эти характеристики могут быть выражены через релаксационный спектр материала:

$$\begin{aligned} G'(\omega) &= \int_0^{\infty} F(\Theta') \frac{\omega^2 (\Theta')^2}{1 + \omega^2 (\Theta')^2} d\Theta', \\ G''(\omega) &= \int_0^{\infty} F(\Theta') \frac{\omega \Theta'}{1 + \omega^2 (\Theta')^2} d\Theta'. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Действительная составляющая комплексного модуля упругости  $G'(\omega)$  называется динамическим модулем упругости. Он характеризует величину накопленной в теле упругой энергии. Мнимая часть комплексного модуля  $G''(\omega)$  называется модулем потерь и характеризует потери механической энергии на вязкое трение, связанные с рассеянием энергии при упругих и эластических деформациях. Механические потери в вязкоупругом теле обычно характеризуют тангенсом угла механических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ , коэффициентом поглощения  $\alpha_{\Pi}$  или декрементом затухания  $D$ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G''}{G'}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{2\alpha_{\Pi}}{\omega}; \quad D = \frac{2\pi\alpha_{\Pi}}{\omega}. \quad (4.25)$$

Функции  $\varphi(t)$ ,  $\psi(t)$ ,  $G'(\omega)$ ,  $G''(\omega)$ , а также константы  $I_0$ ,  $\eta_2$ ,  $E_{\infty}$  называют основными реологическими характеристиками вязкоупругих материалов. Они определяются релаксационными свойствами материала и могут быть выражены через функции распределения времен релаксации и запаздывания. Поэтому все реологические характеристики не являются независимыми, а связаны между собой математическими соотношениями. В наиболее простой форме эти соотношения имеют следующий вид [38]:

$$G_p(t) = G e^{\frac{-t}{\Theta'}}; \quad (4.26)$$

$$I_{\Pi}(t) = I \left( 1 - e^{\frac{-t}{\Theta'}} \right); \quad (4.27)$$

$$G'(\omega) = G \frac{\omega^2 (\Theta')^2}{1 + \omega^2 (\Theta')^2}; \quad (4.28)$$

$$G''(\omega) = G \frac{\omega \Theta'}{1 + \omega^2 (\Theta')^2}. \quad (4.29)$$

Качественной характеристикой деформационных свойств является понятие жесткости (мягкости) материала. К жестким обычно относят полимерные материалы, имеющие модуль Юнга  $E > 10^3$  МПа. При  $E < 10^3$  МПа материалы считаются мягкими.

Влияние температуры на реологические характеристики связано с температурной зависимостью времен релаксации:

$$\Theta' = t_0 e^{\frac{-\Delta E}{RT}}, \quad (4.30)$$

где  $t_0$  — константа;  $\Delta E$  — энергия активации;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

В случае релаксационных переходов, связанных с повышением температуры динамических испытаний, на кривой температурной зависимости  $G'$  наблюдается перегиб, а на графиках температурных зависимостей  $G''$  и  $\text{tg } \delta$  — максимумы. При этом частота  $\omega$  связана с температурой релаксационного перехода  $T_p$  зависимостью

$$\ln \omega = -\frac{\Delta E}{RT_p}, \quad (4.31)$$

$$\Theta' = \frac{1}{\omega}. \quad (4.32)$$

Отношение времен релаксации при температуре  $T$  и выбранной «стандартной» температуре  $T_0$  называют фактором сдвига или температурным коэффициентом сдвига  $a_T$ :

$$a_T = \frac{\Theta'(T)}{\Theta'(T_0)}. \quad (4.33)$$

Коэффициент сдвига является универсальной функцией температуры и выражается уравнением Вильямса–Лэндела–Ферри (ВЛФ)

$$\lg a_T = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}, \quad (4.34)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные, зависящие от  $T_0$ .

Принцип температурно-временной суперпозиции устанавливает эквивалентность влияния на реологические характеристики временных и температурных условий нагружения. Использование метода приведенных переменных позволяет значительно расширить температурный и временной интервалы исследуемых характеристик без проведения дополнительных экспериментов.

#### 4.2.2. Прочностные свойства

Прочностью называют свойство твердого тела сохранять целостность при действии нагрузок. Прочностные свойства, как правило, характеризуют пределом прочности  $\sigma_p$  — напряжением, при котором происходит разрушение образца.

По способу определения различают кратковременную и длительную прочность.

**Кратковременную прочность** выражают пределом прочности  $\sigma_p$ . Его определяют методом одноосного растяжения на разрывных машинах при заданной скорости нагружения или скорости деформации, обычно в пределах 1–10% в секунду [48, Т. 3]. При выборе скорости нагружения руководствуются правилом: время от момента приложения нагрузки к образцу до момента его разрушения должно составлять не менее 1 мин при испытании материалов, не имеющих предела текучести [37]. Наибольшее распространение получили следующие скорости нагружения: 5, 25 и 100 мм/мин.

Одновременно с  $\sigma_p$  определяют относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_p$ .

Под **длительной прочностью** понимают максимальное напряжение, вызывающее разрушение образца после заданной длительности действия нагрузки.

В зависимости от условий получения материалов и проведения испытаний различают теоретическую, предельно достижимую и техническую прочность [48, Т. 3].

*Теоретической прочностью* называют напряжение, при котором происходит одновременный разрыв химических связей между всеми атомами, расположенными по обе сто-

роны от поверхности разрушения в условиях нагружения при нулевой температуре по Кельвину ( $\sigma_{\text{теор}}$ ). Теоретическая прочность является максимально возможной прочностью твердого тела с идеальной структурой. Ее можно получить, например, при растяжении идеального монокристалла в направлении оси его вытянутых цепей в области температур, близких к нулевой (по Кельвину) или при малых временах нагружения.

*Предельно достижимой* прочностью называют прочность идеальной полимерной структуры при данных температуре и времени (или скорости) деформирования образца.

Одним из методов расчета теоретической прочности  $\sigma_{\text{теор}}$  является определение напряжения, при котором происходит одновременный разрыв химических связей молекулярных цепей, приходящихся на единицу площади поперечного сечения полимера с идеальной структурой.

Предельно достижимую прочность часто рассчитывают по экспериментальным зависимостям напряжения разрушения от степени ориентации и степени кристалличности с

Таблица 4.4

**Теоретическая и предельно достижимая прочность некоторых полимеров**

Полимер	Теоретическая прочность $\sigma_{\text{теор}}$ , ГПа	Предельно достижимая прочность $\sigma_{\text{п}}$ , ГПа
Полиэтилен	26–27	4,0–6,5
Полипропилен	11–12,5	2,0–3,5
Полиакрилонитрил	15,5–16,0	2,7–4,0
Поливинилхлорид	14–17	2,7–4,0
Поливиниловый спирт	22–23	4,0–7,0
Поликапроамид	23–27	3,5–5,5
Полиформальдегид	21,5–22,5	3,5–5,5
Полиэтилентерефталат	21–22	3,5–6,0
Целлюлоза	16–26	2,7–7,0
Триацетат целлюлозы	8–13	1,4–3,5
Поли(дифенилоксид)пиромеллитимид	10–12	—

последующей экстраполяцией до значений, соответствующих 100%-ной ориентации и кристалличности. Рассчитанные этими методами значения теоретической и предельной достижимой прочности для некоторых полимеров приведены в табл. 4.4 [48, Т. 3].

*Технической прочностью*  $\sigma_{\text{техн}}$  называют прочность реальных материалов в стандартных условиях испытаний.

Реальные материалы разрушаются при значительно более низких напряжениях  $\sigma_{\text{техн}}$ , чем  $\sigma_{\text{п}}$ . Это объясняется их неоднородной структурой, наличием локальных напряжений, микротрещин и других дефектов.

Одной из фундаментальных характеристик прочностных свойств материалов является *долговечность*, под которой понимают продолжительность времени от момента нагружения до разрушения при заданном постоянном напряжении. Долговечность полимеров зависит от напряжения и температуры.

*При динамических (циклических) нагружениях прочность характеризуют усталостной прочностью и выносливостью.*

*Усталостной прочностью* называют значение амплитуды напряжения, при котором разрушение наступает после заданного числа циклов нагружений.

*Выносливостью* называют число циклов нагружения до разрушения при заданном значении амплитуды напряжения.

Числовые значения показателей прочности зависят от вида напряженного состояния (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб и др.), скорости нагружения, температуры и других факторов.

Применительно к полимерам решение основных задач теории прочности — создания методов прочностных расчетов конструкций — базируется на многочисленных экспериментальных данных о поведении полимеров в разнообразных схемах и режимах нагружения, имитирующих условия эксплуатации. Наибольшее распространение в теории прочности получили механический, термодинамический и кинетический подходы.

При **механическом подходе** процесс появления пластических деформаций и разрушения в различных напряженных состояниях анализируют по значениям характеристик

прочности, полученных для простых видов напряженного состояния. Напряженное состояние в любой точке тела представляется в виде тензора напряжений, состоящего в общем случае из шести независимых компонент. Если известны значения всех компонент тензора, можно рассчитать нормальные и касательные напряжения, действующие на любую плоскую площадку, проходящую через рассматриваемую точку. Разрушение происходит при различных комбинациях значений компонент тензора напряжений. Каждая из этих комбинаций определяет предельное (критическое) состояние материала. Критерием прочности является функция, описывающая все предельные состояния при различных видах напряженного состояния. Геометрически такой критерий прочности представляют в виде поверхности предельных состояний в пространстве. Существует несколько теорий предельных состояний, по которым определяют форму предельных поверхностей. Это теории максимального нормального напряжения, максимального удлинения, предельного значения упругой энергии деформирования и др.

При **термодинамическом подходе** разрушение рассматривают как процесс достижения критического (предельного) значения энергии, запасенной в твердом теле при деформировании. Из первого начала термодинамики следует, что изменение запасенной упругой энергии  $\delta W$  напряженного образца в процессе деформирования и роста трещины частично расходуется на увеличение свободной поверхностной энергии  $dE$ , а частично необратимо рассеивается в виде тепловых механических потерь  $\delta Q$ :

$$\delta W = dE + \delta Q.$$

При разрушении твердых тел различают следующие виды механических потерь: деформационные, динамические, рассеяние упругой энергии при деформации и разрыве межатомных связей.

Для полимеров главными являются деформационные потери, обусловленные внутренним трением при обратимых и



пластических деформациях. Они связаны с различными релаксационными процессами и объясняются многообразными формами теплового движения — сегментальной подвижностью, подвижностью элементов надмолекулярной структуры и др. Деформационные потери особенно велики в вершинах микротрещин, на границах дефектов и в других местах перенапряжений.

Динамические потери вызваны переходом части упругой энергии деформирования в кинетическую энергию движения стенок растущей трещины.

Эти два вида потерь происходят в объеме материала. Потери от рассеяния упругой энергии относят к поверхностным потерям. Они локализованы у вершин микротрещин на границе перехода от свободной поверхности к сплошной среде и связаны с тем, что разрыву химических связей предшествует квазистатический процесс их растяжения. При этом значение квазиупругой силы межатомных связей возрастает до предельного разрывного значения. При разрыве связей атомы оказываются на свободной образовавшейся поверхности стенок микротрещины и рассеивают избыточную энергию в виде неравновесных тепловых колебаний.

При температурах ниже температуры хрупкости  $T_{хр}$  разрушение полимеров происходит по механизму, изложенному в теории хрупкого разрушения упругих сил. Очагами разрушения обычно являются микротрещины начальным размером более 0,1 мкм, служащие концентраторами напряжений. Напряжение  $\sigma$ , необходимое для развития трещины в упругом теле до критической длины, после чего тело мгновенно разделяется на части, связано со свойствами тела и размерами трещины уравнением Гриффита

$$\sigma = \sqrt{\frac{2EU_{\Pi}}{\pi L}}, \quad (4.35)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $U_{\Pi}$  — удельная энергия разрушения, связанная с поверхностной энергией тела;  $L$  — половина длины трещины.

В области температур выше  $T_{хр}$  существенную роль в разрушении начинают играть релаксационные процессы. Благодаря появившейся сегментальной подвижности макромолекул акту разрыва связей может предшествовать локальная вынужденная высокоэластическая деформация, снижающая перенапряжение в областях, прилегающих к микротрещине. Такая локальная деформация сопровождается процессом местной ориентации цепей макромолекул. Возникают зоны деформационного микрорасслоения материала на высокоориентированные пучки цепей макромолекул (тяги) и на участки с меньшей плотностью (рис. 4.8, б). Эти зоны получили название «трещины серебра» [8]. По своей сути «трещины серебра» не являются настоящими трещинами, поскольку не имеют раскрытых створок и не приводят к образованию поверхности разрушения. Тяжи не позволяют раскрыться «трещине серебра», поэтому напряжение у ее вершины не возрастает по мере углубления такой трещины в материал, а нагрузка распределяется практически равномерно по сечению образца. Полимер с «трещинами серебра» может иметь высокую долговечность.

При более высоких значениях напряжения  $\sigma$  начинается процесс последовательного термофлуктуационного разрыва

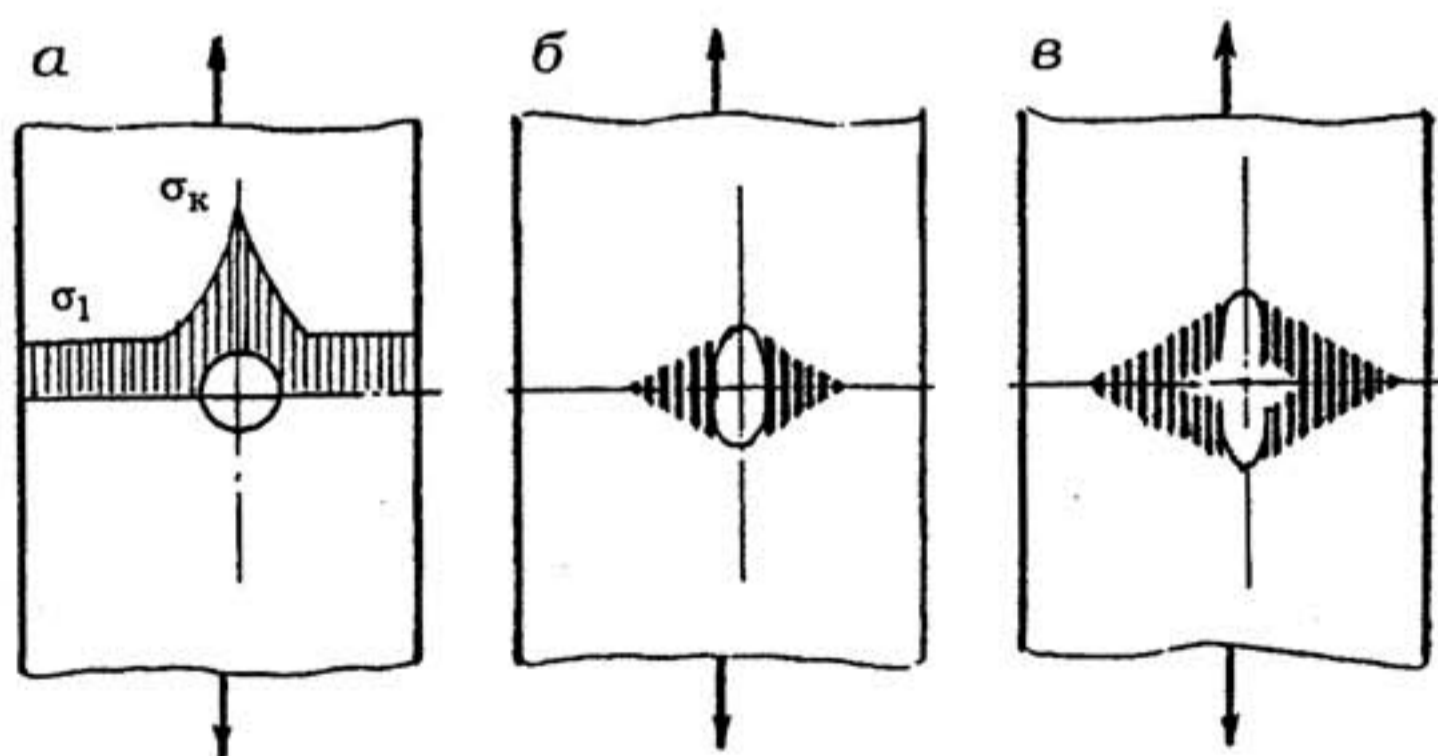


Рис. 4.8. Схема возникновения и развития «трещин серебра»: а — концентрация напряжений в районе микротрещины; б — локальная деформация материала и образование «трещины серебра»; в — рост «трещины серебра» и разрывы микротяжей

тяжей и увеличения размеров микротрещины (рис. 4.8, в). На поверхности образующихся створок микротрещины возникает семейство бороздок от разрушенных тяжей [7, 8]. Трещина разрушения развивается обычно вслед за «трещиной серебра». При достижении трещиной критического размера наступает завершающаяся стадия — мгновенное лавинное разрушение с разделением материала на части.

Развитая на основе **кинетической теории разрушения** термофлуктуационная теория прочности полимеров позволяет установить количественную связь между долговечностью  $\tau$ , напряжением  $\sigma$  и температурой  $T$ , получившую название уравнения Журкова [38]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{KT}\right), \quad (4.36)$$

где  $\tau_0$  — предэкспоненциальный множитель, имеющий размерность времени и характеризующий скорость тепловых колебаний атомов;  $U_0$  — энергия активации процесса разрушения, примерно соответствующая энергии активации разрыва связей при термодеструкции;  $\gamma$  — коэффициент снижения энергии активации разрыва химических связей при действии приложенного напряжения.

### *4.2.3. Стандартные показатели механических свойств*

Показанное влияние характера деформирования (условий нагружения — скорости, температуры, длительности и т. д.) на механизм разрушения полимеров приводит к тому, что по имеющимся показателям прочностных и деформационных свойств, установленных в определенных условиях нагружения, очень сложно прогнозировать поведение материала в других условиях.

Для сравнительной оценки различных материалов разработана система стандартных показателей механических свойств полимеров. При низких скоростях нагружения в стандартных условиях определяют кратковременный модуль упругости, твердость, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочно-

сти при растяжении и относительное удлинение при разрыве. При высокоскоростных нагрузках определяют удельную ударную вязкость, температуру хрупкости. Стандарты ведущих стран на методы определения важнейших механических показателей полимерных материалов приведены в табл. 4.5 [48, Т. 1].

**Кратковременным модулем упругости** называют отношение напряжения при растяжении  $\sigma$  к соответствующему относительному удлинению в пределах пропорциональности между напряжением и деформацией. Его определяют как начальный модуль  $E_0$  по углу наклона касательной, проведенной из начала координат к кривой  $\sigma$ - $\epsilon$ , полученной в стандартных условиях.

Модулем упругости при изгибе  $E_{\text{и}}$  называют отношение напряжения при изгибе к соответствующей деформации в пределах пропорциональности между напряжением и деформацией.

**Твердость** характеризует устойчивость материала к деформации внедрения других тел. При одинаковой принципиальной схеме многочисленные методы определения твердости пластмасс различаются по значениям нагрузки, глубины внедрения, времени приложения нагрузки и форме внедряемого индентора.

В России и в большинстве Европейских стран стандартизовано определение твердости по Бринеллю путем вдавливания стального шарика в материал. *Твердость по Бринеллю (НВ)* выражается отношением приложенной нагрузки к площади сферической поверхности отпечатка. Испытания проводят шариком из закаленной стали с полированной поверхностью. Стандартные диаметры шариков — 2,5; 5; 10 мм. В режиме заданной нагрузки до 50 кгс (для материалов, имеющих твердость до 20 кгс/мм<sup>2</sup>) или до 250 кгс (для более твердых материалов) производится выдержка в течение 60 с. После снятия нагрузки измеряется диаметр отпечатка с помощью микроскопа и вычисляется твердость НВ по формуле

$$\text{НВ} = \frac{P}{\pi D h} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} + K, \quad (4.37)$$

где  $P$  — усилие, прикладываемое к шарiku;  $D$  — диаметр шарика;  $d$  — диаметр отпечатка;  $h$  — глубина отпечатка;  $K$  — температурная поправка.

**Стандарты на методы определения важнейших  
механических показателей полимерных материалов**

Показатель	ГОСТ (Россия)	ASTM (США)	DIN (Германия)
Прочность и деформируемость при растяжении для материалов листовых и формовочных пленочных	11262-68 14236-69	D638, D882 D1923	53455 —
Прочность и деформируемость при сжатии при изгибе при срезе	4651-68 4648-71 17302-71	D695, D1621 D790 D732	53454 53452 —
Модуль упругости при растяжении, сжатии или изгибе  при сдвиге (динамический, статический)	9550-71  —	D638, D747, D790  D2236	53455  —
Твердость по Бринеллю при заданной нагрузке при заданной глубине	4670-77 13323-77	— —	53456 —
Твердость по Роквеллу	—	D785	—
Твердость по Шору	—	D2240	—
Ударная вязкость по Шарпи по Динстату по Шору при растяжении при ударе падающим шариком (для пленок и листов)	4647-80 14235-69 — — —	D256 — D256 D1822 D1709	53453 53453 — 53448 —
Теплостойкость по Мартенсу по Вика  по ASTM	15089-69 15065-69, 15088-69 12021-66	— D1525 D648	53458 53460 53461
Температура хрупкости при изгибе	16782-71, 16783-71	D746	—
Ползучесть	—	D674	—
Износостойкость по закрепленному абразиву	11012-69	D1044, D1242	53516
Коэффициент трения по стали	11629-65	D1894	—

Условия проведения испытаний обозначаются в таком порядке: диаметр шарика (мм), нагрузка (кгс), выдержка (с). Например: НВ (2,5/62,5/30); НВ (5/250/60).

При определении *твердости по Роквеллу* также вдавливают стальной шарик в материал. Сначала осуществляют предварительную нагрузку силой 10 кгс, а затем – основную нагрузку 60 кгс с шариками диаметрами 12,7 или 6,35 мм (шкалы прибора R и D соответственно) либо 40 кгс с шариками диаметрами 6,35 или 3,17 мм (шкалы прибора M и E соответственно). Твердость оценивают прямо по шкале прибора как разность между числом 150 и числом делений шкалы (цена деления 0,002 мм), показывающей глубину внедрения шарика.

*Твердость по Шору* определяют с помощью прибора, в котором индентором является затупленная игла, имеющая форму усеченного конуса. Игла вдавливается в материал под действием силы, создаваемой стандартной пружиной. Твердость определяют по условной шкале прибора (из 90 делений), показывающей глубину проникновения иглы в материал.

**Коэффициентом Пуассона** называют отношение поперечной деформации  $\epsilon_{\text{поп}}$  (сжатие) к продольной деформации  $\epsilon_{\text{прод}}$  (удлинение) при растяжении образцов в пределах пропорциональности между напряжением и деформацией:  $\mu = \epsilon_{\text{поп}} / \epsilon_{\text{прод}}$ .

**Теплостойкость** является важнейшей теплофизической характеристикой полимеров, позволяющей определить диапазон их работоспособности. Теплостойкость характеризует способность пластмасс сохранять свои механические свойства при непрерывном повышении температуры. Она выражается значением температуры, при которой под действием заданной нагрузки деформация достигает определенного значения.

Наиболее распространены методы определения теплостойкости по Мартенсу ( $T_M$ ), по Вика ( $T_V$ ), по ASTM.

Метод определения *теплостойкости по Мартенсу* применим для наиболее жестких и теплостойких материалов. Он заключается в установлении температуры, при которой свободный конец образца длиной 120 мм, шириной 15 мм и толщиной 10 мм перемещается на 6 мм в условиях консольного изгиба при напряжении около 5 МПа.

Метод определения *теплостойкости по Вика* основан на установлении температуры, при которой цилиндрический индентор сечением  $1 \text{ мм}^2$  или полусферический индентор с диаметром сферического сегмента  $1,13 \text{ мм}$  под действием нагрузки  $1 \text{ кгс}$  или  $5 \text{ кгс}$  вдавится в образец на глубину  $1 \text{ мм}$ . Этот метод применим главным образом для пластмасс, состоящих из эластичных малонаполненных полимеров. Для пластмасс, содержащих более  $30\%$  наполнителя, и для армированных композиционных материалов использовать такую методику нельзя.

*Теплостойкость по ASTM* определяют путем непрерывного нагрева со скоростью  $2 \text{ град/мин}$  образца с размерами, аналогичными размерам образцов при определении теплостойкости по Мартенсу. К образцу, помещенному на две опоры, расположенные друг от друга на расстоянии  $100 \text{ мм}$ , посередине приложена изгибающая нагрузка. Она выбирается в зависимости от структуры и морфологии полимера из расчета обеспечения четырех значений изгибающих напряжений:  $0,45$ ;  $1,81$ ;  $4,9$ ;  $7,4 \text{ МПа}$ . Температуру, при которой происходит прогиб образца на  $0,33 \text{ мм}$ , считают температурой размягчения при изгибе.

**Пределом прочности при растяжении** называют отношение нагрузки, при которой происходит разрушение образца, к начальной площади его поперечного сечения.

Разрушающую нагрузку и соответствующее относительное удлинение при разрыве определяют в процессе статического растяжения образцов на разрывной машине со скоростью  $5,25$  или  $50 \text{ мм/мин}$ .

Определение **удельной ударной вязкости** основано на измерении количества работы, затраченной на разрушение образца при испытании его на изгиб ударной, однократно приложенной нагрузки. В качестве оборудования используют маятниковый копер. Скорость движения маятника в момент удара составляет от  $2$  до  $4 \text{ м/с}$ .

*Испытание по Шарпи* заключается в ударном изгибе образца, свободно лежащего на двух опорах, ударом молота посередине образца.

*Испытание по Динстату* состоит в ударе молотом по пластине размером  $10 \times 15 \text{ мм}$  толщиной  $1,5\text{--}4,5 \text{ мм}$  вдоль линии ее

закрепления в зажиме. При этом происходит ударное растяжение образцов, не разрушающихся при изгибе.

При испытании по Изоду осуществляют ударный изгиб консольно закрепленного образца с надрезом.

**Хрупкость** характеризует способность материала разрушаться под действием нагрузки без существенной деформации. Под **температурой хрупкости** понимают температуру, при которой материал начинает разрушаться, не достигнув заданной деформации.

Стандартные значения модуля упругости при растяжении, удельной жесткости, твердости и теплостойкости для трех групп термопластичных полимеров приведены в табл. 4.6.

Аморфные и низкокristаллические полимеры группы I имеют высокие и довольно близкие значения модуля упругости и твердости. По мере приближения к  $T_c$  модуль упругости полимеров этой группы плавно снижается, поэтому показатели их теплостойкости довольно близки к  $T_c$ .

Значения модуля упругости и твердости у полимеров группы III характеризуются как большим разбросом для одного и того же типа полимера, так и большим различием у полимеров разной природы. Это объясняется существенно разной степенью кристалличности. Показатели теплостойкости этих полимеров приближаются к их  $T_{пл}$ .

Полимеры группы II средней степени кристалличности имеют  $T_c$  аморфной фазы, незначительно отличающуюся от комнатной температуры. Поэтому они характеризуются высокой чувствительностью к незначительным колебаниям температуры и к изменению степени кристалличности. Такая особенность приводит к большим различиям в показателях модуля упругости и твердости как для полимеров одного типа, так и для полимеров разной природы.

Стандартные показатели прочности термопластичных полимеров приведены в табл. 4.7.

Наиболее высокими значениями  $\sigma_p$  и  $\sigma_T$  обладают полимеры группы I. Эти показатели последовательно уменьшаются для полимеров групп II и III. Самые большие значения  $\epsilon_p$  характерны для полимеров группы III и последовательно уменьшаются для полимеров групп II и I.



**Стандартные значения кратковременного модуля упругости, удельной жесткости, твердости и теплостойкости термопластичных полимеров [14; 18; 35; 38; 48, Т. 1, Т. 2]**

Группа	Полимер	Кратковременный модуль упругости при 20 °С, 10 <sup>2</sup> МПа	Удельная жесткость E/p, 10 <sup>4</sup> м	Твердость по Бринеллю, кгс/мм <sup>2</sup>	Теплостойкость, °С			
					по Мартенсу (T <sub>M</sub> )	по Вика (T <sub>B</sub> )	По ASTM	
I	Полистирол	28-35	27-33	14-16	75-85	85-100	Т 4,6 90-100	Т 18,6 70-100
	Полиметилметакрилат	30-35	26-27	13-14	80-90	90-110	90-100	65-90
	Поливинилхлорид	30-40	21-28	13-16	60-70	70-90	70-80	55-65
	Полифениленоксид	25-27	24-26	16-17	185-190	190-220	190-210	190-193
	Полисульфон	22-27	20-22	15-17	—	—	—	170-175
	Поликарбонат	22-26	20-22	15-16	120-140	—	130-135	110-130
	Полиарилат	26-30	25-26	13-14	—	210	—	—
	Фенилон	35-40	27-31	—	—	260-270	—	—
II	Полиметилпентен	10-11	12-13	—	—	180	—	—
	Полифторхлорэтилен	10-16	5-8	—	—	—	—	160-170
	Пентапласт	12-13	9-11	—	—	160-170	—	80-100
	Полиамид 6	18-23	16-20	10-12	50-60	190-200	150-160	150-155
	Полиамид 6,6	10-31	9-27	—	—	—	—	75
III	Полиэтилен:							
	низкой плотности	1,5-2,5	1,6-2,8	1,4-2,5	—	85-90	50-60	45-50
	высокой плотности	5,5-12	5,8-12	4,5-6,0	—	125-130	75-90	45-50
	Полипропилен	7-12	8-13	6-7	85-100	145-150	130-140	60-70
	Полибутен-1	2-3,3	2,5-4	—	—	113	—	—
	Политетрафторэтилен	5-9	2,5-4	3-4	—	110-120	120-140	110-120
Полиформальдегид	26-35	20-25	16-17	120	160	150-170	110-125	

**Стандартные значения прочности термопластичных полимеров при 20°C**  
**[14; 18; 35; 38; 48, Т. 1, Т. 2]**

Группа	Полимер	Разрушающее напряжение, МПа			Предел текучести при растяжении ( $\sigma_T$ ), МПа	Относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon_p$ ), %
		при растяжении ( $\sigma_p$ )	при сжатии ( $\sigma_{сж}$ )	при изгибе ( $\sigma_{из}$ )		
I	Полистирол	30-56	80-110	55-105	—	1,5-2,4
	Полиметилметакрилат	45-85	70-120	60-110	40-60	2-5
	Поливинилхлорид	40-60	80-160	80-120	35-56	10-15
	Полифениленоксид	60-84	105-115	100-125	70-80	20-100
	Полисульфон	55-80	100-110	108-120	70-80	10-100
	Поликарбонат	50-75	80-120	80-110	56-63	60-100
	Полиарилат	80-90	—	—	—	10
	Фенилон	80-120	—	—	—	15
II	Полиметилпентен	—	—	—	28-32	15
	Полифторхлорэтилен	38-40	—	50-56	37-38	140
	Пентапласт	42-46	—	—	—	28
	Полиамид 6	60-90	50-65	90-140	77-85	150-400
	Полиамид 6,6	70-92	110	—	49	40-280
	Полиэтилен:					
III	низкой плотности	12-16	—	12-17	9-10	500-700
	высокой плотности	23-40	21-28	20-25	22-26	400-800
	Полипропилен	25-40	35-56	50-56	15-25	200-800
	Полибутен-1	—	—	—	27	350
	Политетрафторэтилен	14-25	5-15	11-14	7-10	250-500
Полиформальдегид	65-70	35-50	80-110	50-75	15-40	

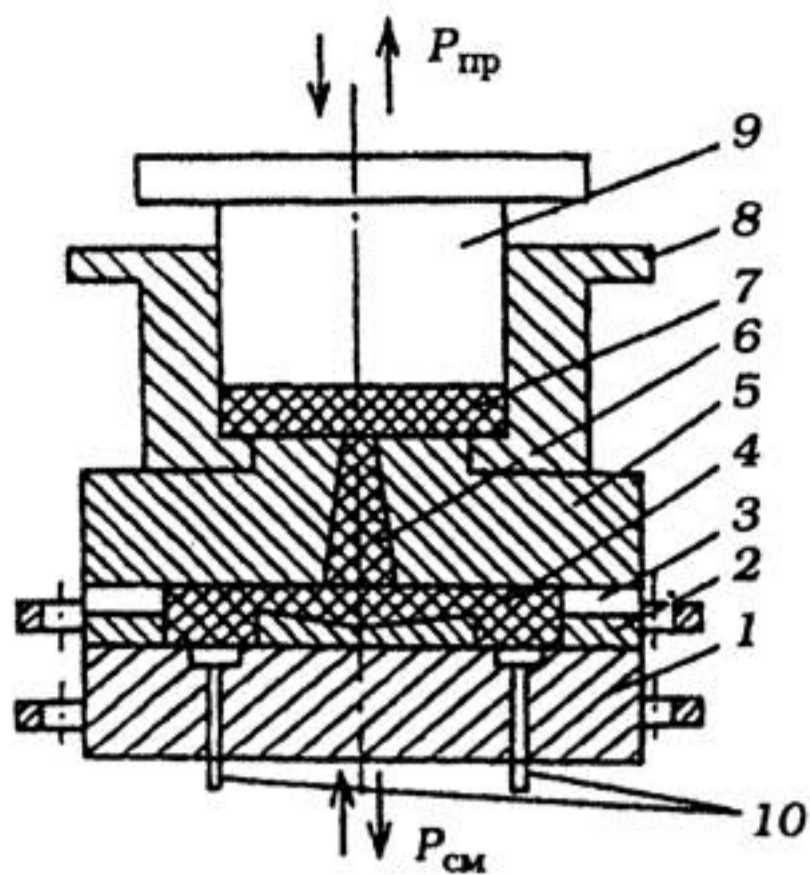


Рис. 4.10. Схема изготовления тары методом литьевого прессования: 1 — нижняя плита; 2 — матрица; 3 — воздушные каналы; 4 — изделие; 5 — верхняя плита; 6 — литниковые каналы; 7 — пресс-остаток; 8 — загрузочная камера; 9 — шток; 10 — выталкиватель

оформляющую полость пресс-формы, уплотняется и выдерживается под давлением до полного отверждения. После окончания выдержки пресс-форму раскрывают и с помощью выталкивающего устройства изделие извлекают из формы.

Литьевое прессование отличается от компрессионного тем, что пресс-форма имеет загрузочную камеру 8 со штоком 9 (рис. 4.10). Загрузочная камера соединена с формующей полостью пресс-формы литниковыми каналами. Предварительно подогретый материал подают в нагретую до требуемой температуры загрузочную камеру 8. Под действием штока 9 материал через литниковые каналы под давлением 80–120 МПа поступает в оформляющую полость пресс-формы. При прохождении материала через литниковые каналы происходит его дополнительный разогрев и гомогенизация. После заполнения оформляющей полости в пресс-форме давление возрастает до 25–30 МПа и происходит уплотнение материала.

Экструзия представляет собой непрерывный процесс формования в экструдере изделий или полуфабрикатов неограниченной длины путем продавливания расплава полимера через формующую головку с каналами необходимого профиля. В экструдере происходит разогрев полимера до вязкотекучего состояния и продавливание его через формующую головку соответствующей конструкции. Для получения изделия требуемого профиля выходящую из формующей головки заготовку охлаждают, калибруют и выполняют другие необходимые операции. В производстве тары экструзию часто совмещают с последую-

Экструзия представляет собой непрерывный процесс формования в экструдере изделий или полуфабрикатов неограниченной длины путем продавливания расплава полимера через формующую головку с каналами необходимого профиля. В экструдере происходит разогрев полимера до вязкотекучего состояния и продавливание его через формующую головку соответствующей конструкции. Для получения изделия требуемого профиля выходящую из формующей головки заготовку охлаждают, калибруют и выполняют другие необходимые операции. В производстве тары экструзию часто совмещают с последую-

щим раздувом цилиндрической заготовки в специальной пресс-форме.

Из полимерных пленок и листов тару производят методами термоформования, сварки и склеивания.

Технологический процесс **термоформования** включает операции: подготовки заготовки требуемого размера; разогрева листа или пленки до температуры высокоэластического состояния полимера; приложения давления, обеспечивающего облегание листом или пленкой оформляющей поверхности формы; охлаждения отформованного изделия; съема его с формы и механической обработки до заданных размеров. В зависимости от метода приложения формирующего давления различают следующие способы термоформования: механическое, вакуумное, пневматическое, гидравлическое, паровое и комбинированное.

Технологическая схема **сварки** состоит из последовательности операций: подготовка свариваемых поверхностей (очистка от механических загрязнений, жиров, масел, оксидных пленок и т. п.); приведение поверхностей в контакт друг с другом; воздействие на контактирующие поверхности давлением прижатия, нагреванием, растворителями, химическими реагентами и т. п.; охлаждение; механическая обработка (при необходимости).

Анализ технологических операций, общих для перечисленных процессов производства тары и упаковки, показывает, что к важнейшим технологическим свойствам пластмасс можно отнести их теплофизические и реологические свойства.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА** отражают поведение полимеров при воздействии температуры. Основными теплофизическими характеристиками полимеров являются теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, тепловое расширение, теплостойкость, термостойкость, температуры хрупкости, стеклования, плавления и работоспособности.

Под *теплопроводностью* полимеров понимают способность переносить тепло от более нагретых элементов тела к менее нагретым. Количественной характеристикой теплопроводности является коэффициент теплопроводности  $\lambda$ . Он служит коэффициентом пропорциональности между плотностью потока тепла  $Q$  и градиентом температуры:

$$Q = -\lambda \text{ grad } T. \quad (4.38)$$

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  характеризует количество теплоты, которое проходит в 1 с через поверхность площадью  $1 \text{ см}^2$  при разности температур  $1^\circ\text{C}$ . Соотношение  $\lambda$  в различных системах следующее:

$$\lambda = 1 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}} = 418,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} = 418,68 \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}.$$

Методы определения теплопроводности основаны на решении дифференциального уравнения, связывающего временные и пространственные изменения температуры, обусловленные тепловым потоком. В общем случае при отсутствии внутренних источников тепла уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4.39)$$

где  $a$  — температуропроводность;  $t$  — время.

*Температуропроводность*  $a$  характеризует скорость распространения температуры под действием теплового потока в нестационарных температурных условиях. Коэффициент температуропроводности  $a$  определяется отношением коэффициента теплопроводности  $\lambda$  к произведению удельной теплоемкости при постоянном давлении  $C_p$  и плотности тела  $\rho$ :

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho} \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]. \quad (4.40)$$

Температуропроводность полимеров возрастает с повышением их молекулярной массы, степени кристалличности и давления.

*Теплоемкость полимеров*  $C$  — количество теплоты, затрачиваемое для изменения температуры тела на  $1^\circ\text{C}$ :

$$C = \frac{\partial Q}{\partial T}. \quad (4.41)$$

В СИ размерность  $C$  [Дж/(кг · К)] или [Дж/(моль · К)]. В первом случае выражена удельная теплоемкость — отношение теплоемкости к единице количества вещества, а во втором случае — молярная теплоемкость, когда количество вещества выражено в молях. Часто удельную и молярную теплоемкость выражают, соответственно, в [кал/(г · °С)] и [кал/(моль · °С)].

Теплоемкость при постоянном давлении  $C_p$  называют изобарной, а при постоянном объеме  $C_V$  — изохорной:

$$C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p, \quad (4.42)$$

$$C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V, \quad (4.43)$$

где  $H$  и  $U$  — энтальпия и внутренняя энергия соответственно. Значения  $C_p$  и  $C_V$  связаны соотношением

$$C_p - C_V = \frac{\beta_0^2 V T}{\chi}, \quad (4.44)$$

где  $\beta_0$  — температурный коэффициент объемного расширения;  $V$  — объем;  $\chi$  — коэффициент изотермического сжатия.

Учитывая, что энтропия системы  $dS = dQ/T$ , выражения (4.42) и (4.43) можно представить в виде

$$C_p = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p, \quad (4.45)$$

$$C_V = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_V. \quad (4.46)$$

Теплоемкость полимеров зависит от морфологии, физического состояния, давления и температуры. Установлен линейный характер зависимости  $C_p$  от температуры. Для твердых полимеров температурный коэффициент  $\partial C_p / \partial T \approx 3 \cdot 10^{-3}$ , для

расплавов  $\partial C_p / \partial T \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ . Зная  $C_p$  при температуре, например, 298 К, можно оценить  $C_p$  при других температурах.

Тепловое расширение полимеров характеризуется температурным коэффициентом линейного  $\alpha$  и объемного  $\beta_0$  расширения:

$$\alpha = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_p, \quad (4.47)$$

где  $l$  – линейный размер тела в заданном направлении;

$$\beta_0 = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \quad (4.48)$$

Температурный коэффициент  $\beta_0$  связан с другими характеристиками полимеров соотношением

$$\beta_0 = \gamma \frac{C_V \chi T}{V}, \quad (4.49)$$

где  $\gamma$  — константа полимера.

Температурные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta_0$  зависят от морфологии, физического состояния и ориентации полимеров. Для твердых изотропных полимеров  $\beta_0 = 3\alpha$ . Эти коэффициенты являются важными характеристиками при изготовлении высокоточной и армированной тары из полимеров.

Значения рассмотренных теплофизических свойств основных полимерных материалов, применяемых для производства тары и упаковки, приведены в табл. 5.2.

Под *теплостойкостью полимеров* понимают способность не изменять свою форму и геометрические размеры изготовленных из них изделий. Характеристикой теплостойкости является температура, при которой в условиях воздействия постоянной нагрузки деформация образца достигает заданной величины. Для стеклообразных аморфных и аморфно-кристаллических полимеров теплостойкость не может превышать температуру стеклования  $T_c$ , а для кристаллизующихся полимеров — температуру плавления  $T_{пл}$ .

Существуют следующие пути повышения теплостойкости полимеров:

увеличение содержания в макромолекулах полярных групп и ароматических соединений;

упорядочение надмолекулярной структуры путем ориентации макромолекул;

повышение степени кристалличности;

увеличение степени сшивания;

введение термостойких наполнителей [37].

*Термостойкостью полимеров* называют способность сохранять неизменным химическое строение при повышении температуры. Изменение химического строения полимеров при нагревании может быть связано с процессами деструкции и структурирования.

Деструкция полимеров — это процесс разрушения макромолекул, их химических связей, под действием тепла, света, кислорода, проникающей реакции, механических напряжений и других факторов [48, Т. 1].

Минимальная температура, при которой наблюдается процесс термического разрушения химических связей, называется температурой начала термодеструкции полимера. При этой температуре нельзя перерабатывать полимеры в изделия. Тем более, что на материал одновременно воздействуют тепло, кислород и большие механические напряжения. Процесс деструкции полимеров сопровождается структурной неоднородностью, возникновением остаточных внутренних напряжений, снижением механических и эксплуатационных свойств, например долговечности.

*Плавлением полимеров* называют процесс перехода из твердого агрегатного состояния в текучее без изменения химического состава и строения. Процесс плавления кристаллизующихся полимеров протекает в диапазоне между температурами плавления  $T_{пл}$  и текучести  $T_T$ .

У полимеров различают две температуры плавления — равновесную  $T_{пл}^0$  и экспериментальную  $T_{пл}$ , которую обычно называют просто температурой плавления.



Равновесная температура плавления соответствует точке фазового равновесия монокристаллов полимера и определяется термодинамическим соотношением

$$T_{\text{пл}}^0 = \frac{\Delta H_{\text{пл}}}{\Delta S_{\text{пл}}}, \quad (4.50)$$

где  $\Delta H_{\text{пл}}$  и  $\Delta S_{\text{пл}}$  — теплота и энтропия плавления соответственно.

Кристаллизация полимеров, в отличие от низкомолекулярных веществ, проходит обычно не полностью. Кристаллические образования различаются по форме, размерам и другим параметрам. Поэтому при нагревании полимеры плавятся в некотором интервале температур, иногда до десятков градусов. На практике верхнюю границу этого интервала принимают за экспериментальную температуру плавления  $T_{\text{пл}}$ , которая обычно ниже  $T_{\text{пл}}^0$  примерно на 5–20 °С.

Зависимость  $T_{\text{пл}}$  от размеров кристаллов определяют соотношением

$$T_{\text{пл}} = T_{\text{пл}}^0 \left( 1 - \frac{2\sigma_{\text{т}}}{\Delta H_{\text{пл}} h_{\text{кр}} \rho_{\text{кр}}} \right), \quad (4.51)$$

где  $\sigma_{\text{т}}$  — поверхностная энергия кристаллов;  $h_{\text{кр}}$  и  $\rho_{\text{кр}}$  — толщина и плотность кристаллов соответственно.

Температура плавления существенно зависит от степени полимеризации полимера:

$$\frac{1}{T_{\text{пл}}} - \frac{1}{T_{\text{пл}}^0} = \frac{2R}{\Delta H_{\text{пл}} X_{\text{п}}}, \quad (4.52)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $X_{\text{п}}$  — среднечисловая степень полимеризации.

Для аморфно-кристаллических полимеров при увеличении давления уменьшается свободный объем, увеличивается межмолекулярное взаимодействие и возрастает  $T_{\text{пл}}$ :

$$T_{\text{пл}} = T_{\text{пл}}^0 \frac{(V_{\text{ам}} - V_{\text{кр}})(P - 1)}{\Delta H_{\text{пл}}}, \quad (4.53)$$

где  $V_{ам}$  и  $V_{кр}$  — удельные объемы аморфной и кристаллической фаз;  $p$  — гидростатическое давление.

Числовые значения температур стеклования  $T_c$ , плавления  $T_{пл}$  и дополнительных релаксационных переходов термопластичных полимеров, используемых для производства упаковки, приведены в табл. 4.3.

Формование тары и упаковки обычно осуществляют в диапазоне между  $T_c$  и температурой начала деструкции  $T_d$ . Чем шире интервал между этими температурами, тем больше выбор способов и условий формования. Выбор температурных условий формования в этом интервале производится в каждом конкретном случае экспериментально с учетом особенностей материала, оборудования, технологической оснастки, конфигурации и других требований к таре. Температурные интервалы переработки основных термопластичных полимеров приведены в табл. 4.8.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА полимеров отражают особенности течения и деформации в состояниях, характеризующихся структурной вязкостью среды. В процессе получения расплава, его гомогенизации, при заполнении формы полимер подвергается интенсивному воздействию высокой температуры и сдвиговых напряжений. Это воздействие происходит в услови-

Таблица 4.8

**Температурные интервалы переработки основных термопластичных полимеров при производстве тары и упаковки**

Группа	Полимер	Минимальная температура формования, °С	Температура начала деструкции ( $T_d$ ), °С	Интервал формования, $T_d - T_n$
I	Полистирол	90–110	310	220–200
	Полиметилметакрилат	100–115	280	180–165
	Поливинилхлорид	70–90	170	100–80
	Полифениленоксид	267	320	53
	Полисульфон	190	420	230
	Поликарбонат	275	330	55
II	Поликапроамид	225	360	135
III	Полиэтилен	120–130	320	200–190
	Полипропилен	170	300	130
	Политетрафторэтилен	327	400	73

ях контакта с кислородом воздуха и металлическими поверхностями формующего оборудования и оснастки.

Вязкое течение расплавов полимеров не подчиняется закону Ньютона — прямой пропорциональности между напряжением сдвига  $\tau$  и скоростью сдвига  $\dot{\nu}$ . Часто зависимость  $\tau$  от  $\dot{\nu}$  выражают формулой

$$\tau = k \dot{\nu}^n, \quad (4.54)$$

где  $k$  и  $n$  — константы, зависящие от природы полимера, молекулярного веса и температуры.

Сопротивление полимеров вязкому течению количественно характеризуют эффективной вязкостью  $\eta_{\text{эф}}$ :

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{\tau}{\dot{\nu}}. \quad (4.55)$$

Наибольшее влияние на  $\eta_{\text{эф}}$  термопластичных полимеров оказывают их молекулярный вес и температура.

В интервале температур  $T_c < T < T_c + 100$  °С для аморфных полимеров справедливо соотношение

$$\lg \eta_{\text{эф}} = \frac{\eta_T T_0}{\eta_{T_0} T} = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2(T - T_0)}, \quad (4.56)$$

где  $\eta_T$  — эффективная вязкость при температуре  $T$ ;  $\eta_{T_0}$  — эффективная вязкость при стандартной температуре  $T_0$ ;  $C_1$  и  $C_2$  — константы, зависящие от выбора  $T_0$ .

$$\text{При } T_0 = T_c \quad C_1 \approx 17,44; \quad C_2 \approx 51,6,$$

$$\text{При } T_0 = T_c - 50^\circ\text{C} \quad C_1 \approx 8,86; \quad C_2 \approx 101,6.$$

В интервале температур  $T > T_c + 100$  °С ( $T > T_{\text{тек}}$ ) для аморфных полимеров и  $T > T_{\text{пл}}$  для кристаллических полимеров температурная зависимость  $\eta_{\text{эф}}$  хорошо отражается экспоненциальным уравнением, выведенным на основе активационной теории течения:

$$\eta_{\text{эф}} = A e^{-\frac{\Delta E_\tau}{RT}}, \quad (4.57)$$

где  $A_0$  — константа, зависящая от типа полимера;  $\Delta E_T$  — энергия активации течения. Значения энергии активации течения  $\Delta E_T$ , найденные экспериментально для ряда полимеров (в ккал/моль), приведены ниже [38].

Полистирол .....	22–23
Поливинилхлорид .....	35
Поликарбонат .....	36
Полисульфон .....	40
Полиэтилен	
низкой плотности .....	12
высокой плотности .....	7
Полипропилен .....	11

Экспериментально **текучесть полимеров** оценивают с помощью вискозиметров различных конструкций, главным образом капиллярных и ротационных. Стандартизован метод оценки текучести расплавов полимеров с помощью капиллярного вискозиметра (рис. 4.11) по показателю индекса расплава (ИР), иногда его называют показателем текучести расплава (ПТР).

Под индексом расплава ИР понимают массу полимера (в граммах), выдавливаемую через стандартный капилляр при заданных температуре и перепаде давления в течение 10 мин.

Условия определения ИР регламентированы ГОСТ 11645–73. Стандартные размеры капилляра: длина  $(8,000 \pm 0,025)$  мм; диаметр  $(2,095 \pm 0,005)$  мм; внутренний диаметр цилиндра

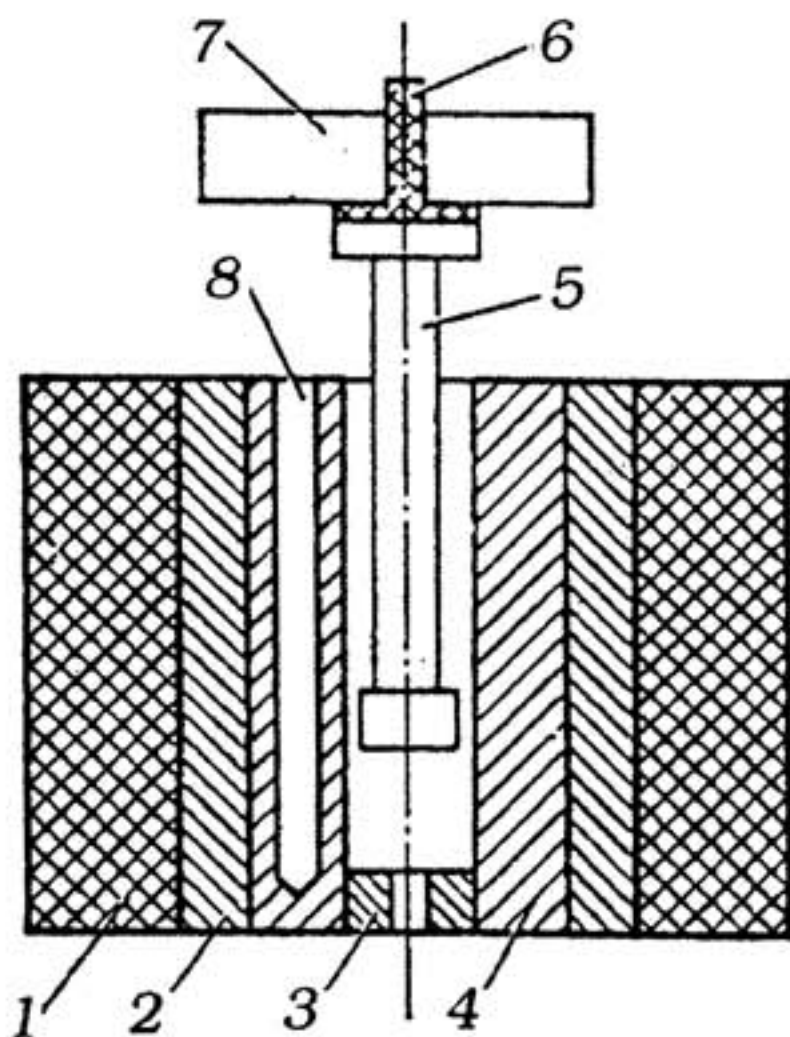


Рис. 4.11. Вискозиметр для измерения индекса расплава:  
 1 — наружная изоляция;  
 2 — нагреватель; 3 — капилляр;  
 4 — цилиндр; 5 — поршень;  
 6 — изолирующая втулка;  
 7 — груз; 8 — отверстие для термодатчика

вискозиметра ( $9,54 \pm 0,016$ ) мм. Рекомендуемые нагрузки 2,16; 5; 10 кгс; температуры испытаний кратны  $10^\circ\text{C}$ .

В США ИР определяют по ASTM D 1238–62Т, рекомендуемые нагрузки от 0,325 до 21,6 кгс, температуры — от  $125$  до  $275^\circ\text{C}$ . Наиболее часто ИР определяют при  $190^\circ\text{C}$  и нагрузке 2,16 кгс. В этих условиях напряжение сдвига на стенке капилляра составляет  $13,5\text{--}16 \text{ кН/м}^2$ .

По значению ИР можно оценить эффективную вязкость расплава термопласта в условиях испытаний по формуле

$$\eta_{\text{эф}} = 0,5 \frac{G\rho}{\text{ИР}} \left[ \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2} \right], \quad (4.58)$$

где  $G$  — нагрузка на поршень, Н;  $\rho$  — плотность расплава,  $\text{кг/м}^3$ . Или по формуле

$$\eta_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^4 \frac{G\rho}{\text{ИР}} [\text{П}], \quad (4.59)$$

где  $G$  и  $\rho$  выражены в кгс и  $\text{г/см}^3$  соответственно.

Для изготовления тары методами литья под давлением используют термопластичные полимеры с ИР = (2–30) г/10 мин.

Из маловязких расплавов невозможно получить сплошную экструзионную заготовку в виде пленки, трубы, профиля. Для экструзии применяются материалы и режимы переработки, при которых ИР составляет (0,3–12) г/10 мин.

Области использования полимеров в упаковочной индустрии в зависимости от значения ИР приведены ниже.

Область упаковочной индустрии	ИР, г/10 мин
Производство термоусадочных пленок .....	0,4–0,2
Упаковка тяжелых грузов .....	0,2–0,6
Изготовление пакетов .....	0,6–2,0
Выпуск мешков для мусора .....	0,8–2,0
Для ламинированных материалов .....	0,8–3,0
Упаковка замороженных продуктов .....	0,8–2,0
Тонкие пленки (толщиной до 15 мкм) .....	3,0–6,0
Для медицинской промышленности .....	2,0–4,0
Пленки бытового назначения .....	2,0–3,0
Пленки с повышенной прозрачностью .....	0,2–0,6

Упаковка строительных материалов .....	0,2–0,6
Для сельского хозяйства .....	0,2–0,4
Выпуск пленок плоскощелевым методом .....	2,5–4,0
Производство тары литьем под давлением .....	6,0–50
Выпуск рукавных пленок .....	0,8–25
Производство тары из компаундов .....	2,0–50
Производство вспененной тары .....	0,6–60
Изготовление профильных элементов тары методом экструзии .....	3,0–10
Изготовление экструзионных покрытий .....	0,2–0,6
Пленки электротехнического назначения .....	0,2–2,0

## **4.4. Полимерные пленочные материалы**

Важнейшим достоинством полимеров является их способность к пленкообразованию.

К полимерным пленкам относят листовую или рулонный материал, т. е. сплошные слои полимеров толщиной до 0,2–0,3 мм и шириной более 100 мм. Узкие пленки называют лентами. Такое определение является достаточно формальным. Практически термин «пленки» установился для тонких листовых материалов такой толщины, при которой сохраняется их гибкость. Пленки характеризует малая толщина (и, следовательно, малая масса) при большой поверхности.

Пленки занимают как бы промежуточное положение между компактными твердыми телами и дисперсными системами. Отличительной особенностью пленок как сплошных тонких слоев вещества является определенное соотношение между массой и поверхностью. В отличие от твердых компактных тел пленки характеризуются большой поверхностью при относительно малой массе и при этом поверхность пленки в отличие от дисперсий непрерывная, сплошная.

Способность полимеров к пленкообразованию — специфическое отличие полимеров от низкомолекулярных веществ. Эта характерная особенность полимеров как материи обусловлена

строением из молекул, а именно чрезвычайно большой их длиной, в тысячи раз превышающей поперечный размер. Анизотропией формы и гибкостью макромолекул полимеров обуславливается возможность возникновения в процессе пленкообразования разнообразных структурных образований, определяющих комплекс физико-механических свойств пленок.

Гибкостью макромолекул обуславливается возможность существования специфического для полимеров ориентированного состояния, не имеющего места в мире низкомолекулярных тел. Это состояние характеризуется расположением осей цепных макромолекул вдоль одного направления или в одной плоскости, что приводит к анизотропии свойств материала, прежде всего механических.

Особенностью ориентированного состояния является то, что структура различных по химическому строению ориентированных полимерных материалов оказывается однотипной и характеризуется наличием нитеподобных образований диаметром порядка 100–200 Å, ориентированных в направлении действия силового поля. Характер ориентации макромолекул полимерных пленок при этом определяется внешним силовым полем и текстура ориентированной пленки может меняться от одноосной до плоскостной. В последнем случае оси всех макроцепей лежат в плоскости пленки, но преимущественного направления ориентации в плоскости пленки могут и не иметь.

Структурные особенности полимерных пленок определяются также специфическим состоянием их поверхностных слоев, имеющих отличные от свойств полимеров в массе физико-механические свойства. И эти особенности определяются характеристическими размерами пленки, ее толщиной, при которой отношение площади поверхности пленки к ее объему очень велико.

Из общих термодинамических представлений следует, что поверхностные слои любого материала являются более плотными вследствие нескомпенсированности сил взаимодействия молекул поверхностного слоя, наличия избыточной поверхностной энергии, поверхностного натяжения. Поэтому пленочные материалы характеризует целый ряд преимуществ перед одноименными полимерами в толстом блочном состоянии. Пленки имеют более высокие физико-механические свойства. При

практически одинаковой плотности они превосходят полимеры в блоке по разрушающему напряжению при растяжении на 60–360%, по относительному удлинению при разрыве на 25–150% (табл. 4.9). Температура стеклования многих пленочных материалов, например ароматических полиамидов и полиарилатов, выше, чем у одноименных полимеров в блоке.

Таблица 4.9

**Свойства полимеров в виде пленок толстых материалов (в блоке)**

Параметр	Полиамид 6		Полиэтилентерефталат	
	Литьевой ГОСТ 6-06-09-76	Пленки неориентированные ТУ 6-09-255-84	Литьевой ТУ 6-05-830-76	Пленка ГОСТ 24234-80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,13	1,13	1,39	1,39
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	60	$\frac{63-140}{100}$	$\frac{50-70}{60}$	$\frac{140-290}{215}$
Относительное удлинение при разрыве, %	$\frac{150-400}{275}$	$\frac{250-550}{400}$	$\frac{2-4}{3}$	$\frac{70-120}{85}$
Модуль упругости, 10 <sup>3</sup> МПа	$\frac{1,2-1,5}{1,35}$	—	—	$\frac{3,5-4,5}{4,0}$
Электрическая прочность, МВ/м	22	$\frac{52-60}{56}$	$\frac{12-17}{14,5}$	$\frac{140-250}{195}$

Параметр	Поликарбонат		Полиимид	
	Литьевой ТУ 6-05-901-73	Пленка Macrolon, тип N	Прессовочный ТУ 95-1449-86	Пленка ТУ 6-19-121-85
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,20	1,23	1,40	1,42
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	$\frac{56-70}{67}$	$\frac{80-90}{85}$	—	$\frac{150-170}{160}$
Относительное удлинение при разрыве, %	$\frac{50-110}{80}$	$\frac{100-120}{110}$	—	$\frac{70-100}{85}$
Модуль упругости, 10 <sup>3</sup> МПа	$\frac{2,2-2,4}{2,3}$	—	—	$\frac{2,0-3,0}{2,5}$
Электрическая прочность, МВ/м	$\frac{15,5-21,0}{18}$	170	—	$\frac{200-250}{225}$

**Примечание.** В числителе дроби указан интервал значений параметра, в знаменателе — его среднее значение.



#### 4.4.1. Основные виды полимерных пленок

Полимерные пленки производят из природных, искусственных и синтетических полимеров.

К первой группе относятся пленки, изготавливаемые из белков, натурального каучука, целлюлозы и некоторых других **природных полимеров**. наибольшее распространение в этой группе получили гидратцеллюлозные пленки, из них широко используется в упаковке целлофан.

Вторую группу составляют пленки из **искусственных полимеров** — продуктов химической модификации природных полимеров. Это пленки, полученные на основе простых и сложных эфиров целлюлозы: ацетата целлюлозы, ацетобутирата целлюлозы, ацетопропионата целлюлозы, нитрата целлюлозы и этилцеллюлозы. К этой группе относятся и пленки из натурального или синтетического изопренового каучука, предварительно подвергнутого гидрохлорированию, — гидрохлорид-каучуковые пленки.

Третью, самую обширную, группу составляют пленки из **синтетических полимеров**, подавляющее их большинство — термопласты.

Основные виды полимерных пленок, применяемых в упаковочной промышленности, приведены в табл. 4.10. Кроме указанных в таблице для упаковки применяется множество других пленок: ацетобутиратцеллюлозные, нитратцеллюлозные, хлорфторэтиленовые, этиленбутеновые, фторкарбонатные, полиуретановые, силиконовые, поливинилфторидные, полиэтиленоксидные, полиимидные и т. д.

При обозначении большинства пленок принята их маркировка по толщине, измеряемой в миллиметрах или микрометрах.

В США принято измерять толщину пленок в милах:

$$1 \text{ мил} = 0,001 \text{ дюйма} = 25,4 \text{ мкм.}$$

При маркировке используют номера в 100 раз больше — пленка № 200 имеет толщину 2 мила.

Целлофан обозначают иначе. В США — уменьшенной в 100 раз площадью пленки (дюйм<sup>2</sup>) весом в 1 фунт (1 дюйм = 25,4 мм; 1 фунт = 453,6 г). Так, 1 фунт пленки площадью

## Основные виды полимерных пленок, применяемых в упаковочной промышленности

Материал	Название пленки	Условное обозначение		Фирменное название	Изготовитель
		иностранное	русское		
1	2	3	4	5	6
Регенирированная целлюлоза	Целлофан Водостойкий целлофан				E. J du Pont de Nemours & Co; Olin Mathieson Chemical Corp.; Rhodia Inc. (США); British Cellophane Ltd. (Канада); Transparent Paper Ltd. (Англия)
Эфиры целлюлозы	Диацетатцеллюлозные Триацетатцеллюлозные Ацетобутиратные Этилцеллюлоза	CDA CAB CAL	ДАЦ ТАЦ АЦБ ЭЦ	Эскаплен	Dow Chemical Co.; Hercules Inc. (США)
Гидрохлорид каучука	Гидрохлоридкаучуковые		ГК	Piiofilm Snug-Pak	Goodyear Tire & Rubber Co. Tee-Pak Inc. (США)
Полиолефины	Полиэтиленовые		ПЭ	Bexphane Bicor Dynaflm	BXL Industrial Products Group, Ltd.; Mobil Chemical Co.; Alamo Industrials, Inc.
	Полипропиленовые	PP, OPP	ПП	FRF Olefane Propafilm Relpro Vupro Моплен Гостален Данлай, донбанд	Eastman Chemical Products, Inc.; Avisun Corp.; Imperial Chemical Industries, Ltd.; Reliance Plastic & Chemical Corp.; W. R. Grace & Co. (США) Италия Германия Япония

1	2	3	4	5	6
Поливинилхлорид	Жесткие и пластифицированные (мягкие) поливинилхлоридные	PVC	ПВХ	Сюрапе Cobex Fandflex Koroseal Kipex Oriex Panta-Pak Resinite Reynolon Rucoam Sumilite Velon Vitafilm Watahyde	Cloray Corp.; BXL Industrial Products Group, Ltd.; Rand Rubber Co.; B. F. Goodrich Chemical Co.; Rohm & Haas Co.; Nixon Baldwin Chemical, Inc.; Pantasote Co.; Borden Chemical Co.; Reynolds Metals Co.; Rubber Corp. Of America; Sumitomo Bakelite Co., Ltd. (Япония) Firestone Plastics Co.; Goodyear Tire & Rubber Co.; Harte & Co., Inc. (США)
Поливинилденхлорид	Поливинилденхлоридные	PVDC	ПВДХ	Daran Saran Wrap Weston Курихалон	
Поливиниловый спирт	Винилоновые Водорастворимые	PVAL	ПВС	—	—
Полиметил-метакрилат		PMMA	ПММА	—	—
Полиэферы	Полиэтилентерефталатные	PET, PET	ПЭТФ	Maylar Hostofan, Nalofan Lumirror Meinex, Terilen Terfan Лавсан Poliester	Du Pont de Nemours Co. (США)  Kalle (Германия) Toyo Ind. Ltd. (Япония) ICI (Великобритания) Rhone Poulenc (Франция) Россия Engineering Polymer Ltd.

1	2	3	4	5	6
	Поликарбонатные	PC	ПК	Lexan Макроfol Макларон Sumicolayt Sunloid	Бayer (Германия) General Electric Co. (США) Bayer (Германия) Sumitomo Sagaki (Япония) Nuchement Corp. (Япония)
Полистирол	Полистирольные	PS	ПС	Стирофлекс Norflex Poliflex Styronil	Великобритания, Россия Германия США Франция
Полиамид	Поликапроамидные	PA	ПА-6	Найлон Capran Rilsan Zytel	Allied Chemical Corp.; Organico-Rilsan; E.J. du Pont de Nemours & Co. (США)
	Полигексаметиленадипамидные (полиамид 66)		ПА-6,6		
	Полиамид 11		ПА-11		
	Полиамид 12		ПА-12		
Ароматический полиамид	Фенилоновые		АПА	Сопех HM-50	E.J. du Pont de Nemours & Co. (США) Tajin (Япония)
Простой алифатический полиэфир	Пентагласовые				
Простой ароматический полиэфир	Полифениленоксидные		ПФО	Арилокс PPO, Noril	Россия США
	Полисульфоновые		ПСУ		
Фторсодержащие смолы	Поливинилфторидные		ПВФ		
	Политетрафторэтиленовые		ФП		
Ароматические полиимиды	Полиимидные		ПИ	Каптон ПМ	E.J. du Pont de Nemours & Co. (США) Россия

22 000 дюйм<sup>2</sup> условно обозначают: целлофан-220. После цифр следуют буквенные обозначения различных качеств целлофана, расшифровка которых приведена ниже.

### Принятая в США буквенная маркировка целлофана

A или B .....	вид упаковки
C .....	окрашенный
D .....	производство Du Pont, с пониженной влагонепроницаемостью
L .....	средней влагонепроницаемости
M .....	влагонепроницаемый
O .....	одна сторона с покрытием
P .....	гладкая поверхность
R .....	покрытие виниловое
S .....	способность к термопечати
T .....	прозрачный
V, X или K .....	тип полимерного покрытия
WO .....	белый непрозрачный

В Европе и Японии номер целлофана означает максимальный вес 1 м<sup>2</sup> пленки в граммах, увеличенный в 10 раз. Например, 1 м<sup>2</sup> целлофана № 300 весит 30 г.

#### *4.4.2. Основные способы производства полимерных пленок*

От способа производства полимерных пленок зависят многие их свойства, в особенности физико-механические, технологические, а также экономические показатели. Как правило, для каждого полимера оптимальным и наиболее часто применяемым на практике является какой-либо один метод получения пленки, но в ряде случаев встречаются и различные методы. Более того, и в одинаковых методах получения пленки могут быть использованы различные дополнительные операции, оснащение и приспособления в зависимости от свойств полимера и специфических особенностей назначения продукции.

Существуют следующие промышленные методы изготовления полимерных пленок: экструзия расплава полимера; полив раствора полимера или форполимера на полированную металлическую или другую поверхность (в некоторых случаях раствор полимера подают в осадительную ванну); полив дисперсий полимера на полированную поверхность; каландрирование; прессование; строгание заготовок.

**Экструзией** называют метод формирования изделий или полуфабрикатов неограниченной длины в экструдере продавливанием расплава полимера через формующую головку с каналами необходимого профиля.

Основным оборудованием для переработки пластмасс методом экструзии являются экструдеры — шнековые машины, называемые также червячными прессами. Гранулированный полимер из загрузочного бункера с помощью вращающегося червячного шнека 4 (рис. 4.12) последовательно перемещается по технологическим зонам материального цилиндра. В зоне питания I происходит уплотнение и сжатие гранул, в зоне сжатия II — пластикация и частичное плавление, в зоне дозирования III — окончательное плавление остатков твердого полимера, гомогенизация, усреднение вязкости и температуры расплава. Необходимые температуры по зонам цилиндра обеспе-

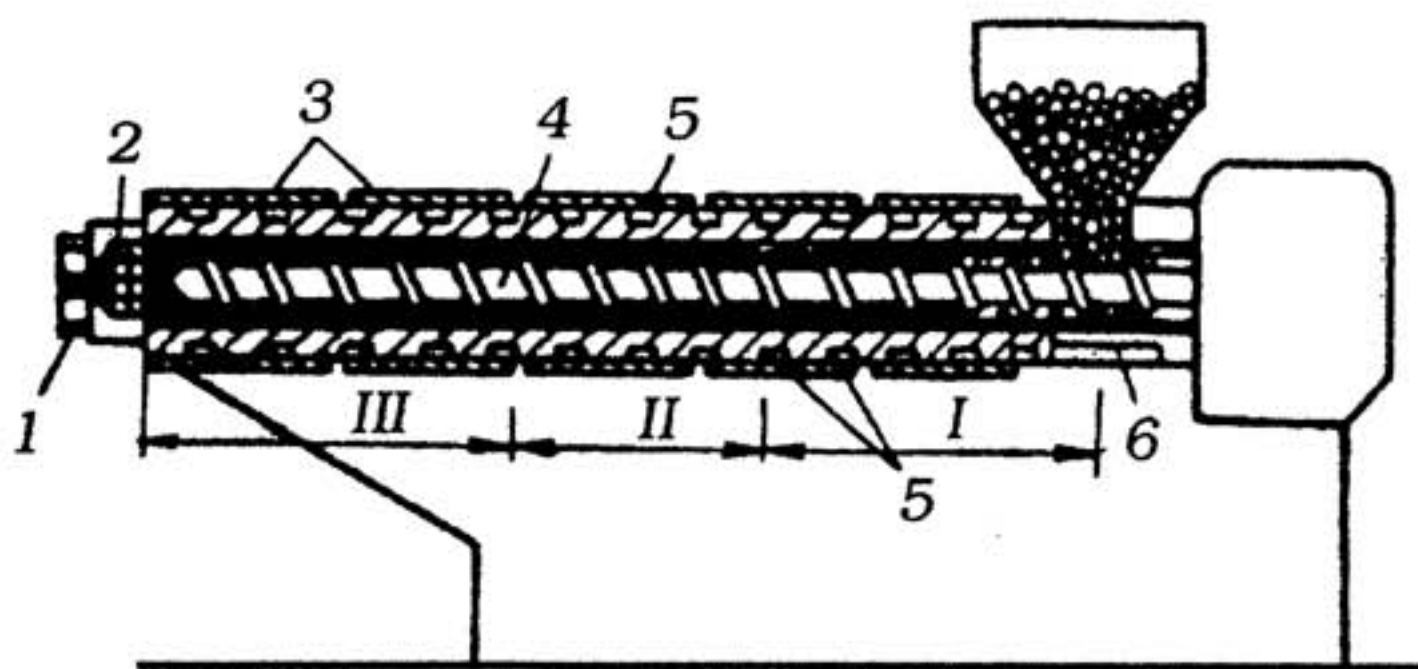


Рис. 4.12. Схема одношнекового экструдера:

- 1 — формующая головка; 2 — фильтр; 3 — обогрев; 4 — червяк;  
 5 — охлаждающий змеевик; 6 — охлаждающая рубашка;  
 I — зона питания; II — зона сжатия; III — дозирующая зона

чиваются системами обогрева 3 и охлаждения 5, 6. Расплав полимера через фильтр 2, представляющий набор металлических сеток, закрепленных в решетке, под остаточным давлением  $p = 5,0-35$  МПа продавливается через формующую головку 1, приобретая определенный профиль, и под очень небольшим избыточным давлением выходит из фильерной части головки.

Методом экструзии расплава полимера выпускают пленки двух типов — рукавные и плоские.

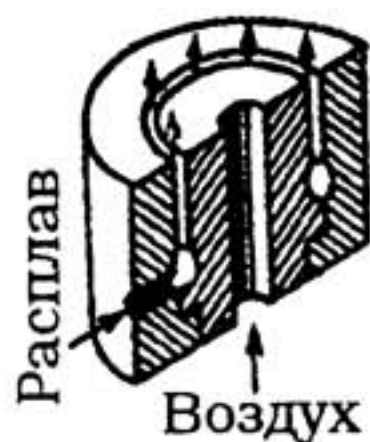


Рис. 4.13. Пример конструкций формующих кольцевых головок

Рукавные пленки формируют способом раздува с помощью сжатого воздуха цилиндрической заготовки, полученной экструзией расплава полимера через формующую кольцевую головку, принципиальная схема которой приведена на рис. 4.13. Для обеспечения равномерности температуры, давления, толщины и других параметров цилиндрической заготовки применяют разнообразные конструкции кольцевых головок со

сложной системой каналов подачи расплавленного полимера. Наиболее высокое качество пленок получают с использованием вращающихся элементов головки.

Изготовление рукавных пленок является непрерывным технологическим процессом. Расплав полимера выдавливается экструдером 15 (рис. 4.14) через экструзионную головку 7 в виде цилиндрической рукавной заготовки 8. Внутри заготовки от воздуходувки 13 через ресивер 14 и шланг 11 подается сжатый воздух под давлением  $p = 0,12-0,13$  МПа, который раздувает заготовку до нужного размера. Рукав охлаждается воздухом, принудительно подаваемым через систему 9 с регулировочным вентилем 10 в специальные сопла в охлаждающем кольце 6, и складывается с помощью направляющих щек 5. Тянущие валки 4 плотно зажимают заготовку и препятствуют утечке воздуха из внутренней полости рукава. В случае необходимости режущим приспособлением 2 производится обрезка кромок рукава и его разделение на два плоских полотна пленки, которые разглаживаются направляющим валком 3 и наматываются на приемные катушки 12.

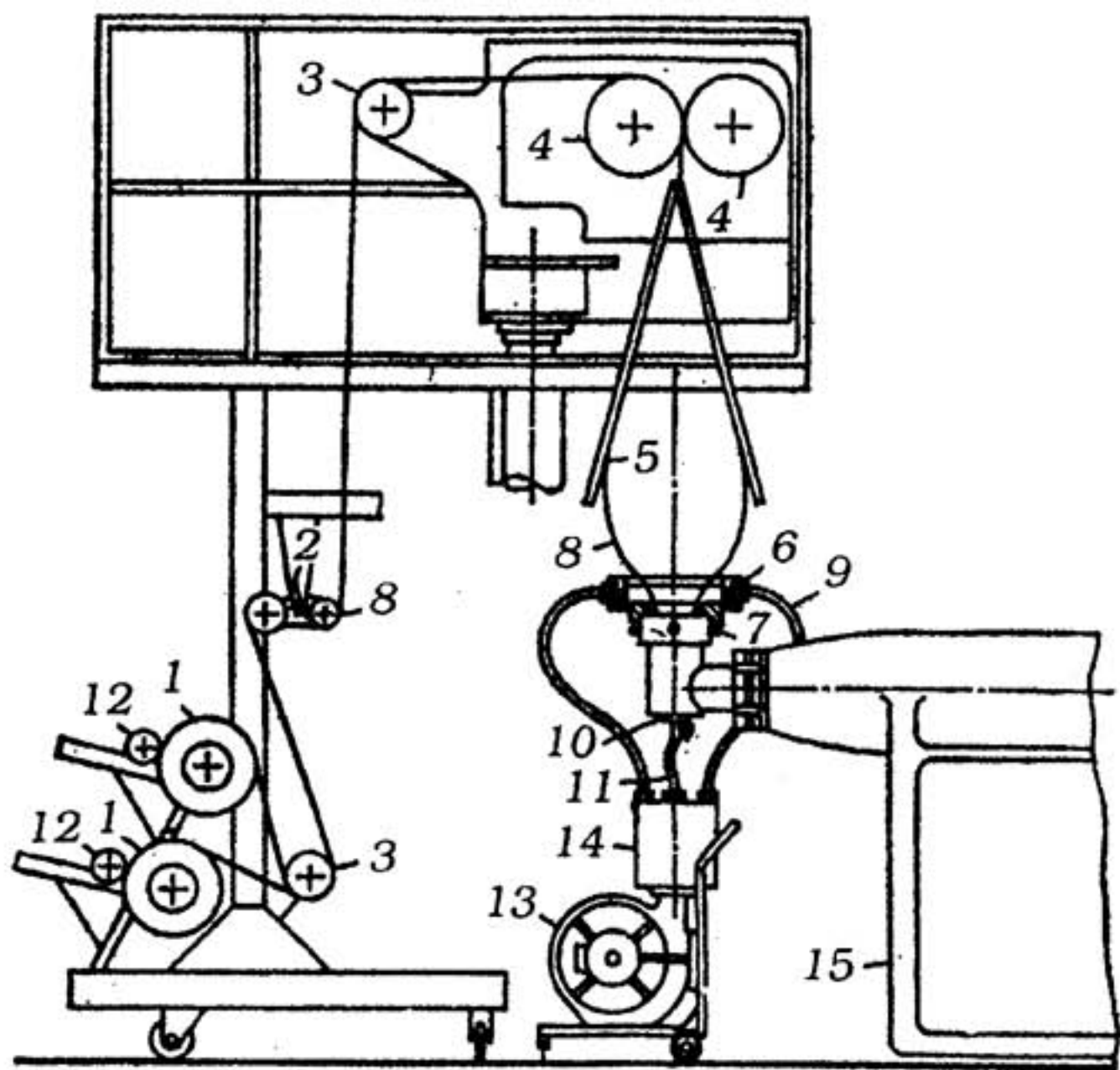


Рис. 4.14. Схема установки получения рукавных пленок раздувом

Технология и оборудование для производства рукавных пленок относительно просты и получили широкое распространение в изготовлении пленок ПЭ, ПП, ПВХ, ПВДХ, ПК, АЦ и др. К недостаткам этого способа относятся:

- низкая эффективность воздушного охлаждения, снижающая производительность и прозрачность (особенно ПП) пленок;
- неравномерная толщина пленок;
- склонность к складкообразованию пленок.

Плоские пленки получают методом экструзии расплава полимера через плоскощелевую формующую головку, принципиальная схема которой показана на рис. 4.15. В зависимости от способа охлаждения заготовок различают два варианта этого метода: с охлаждением заготовки на охлаждающих барабанах и в водяных ваннах.



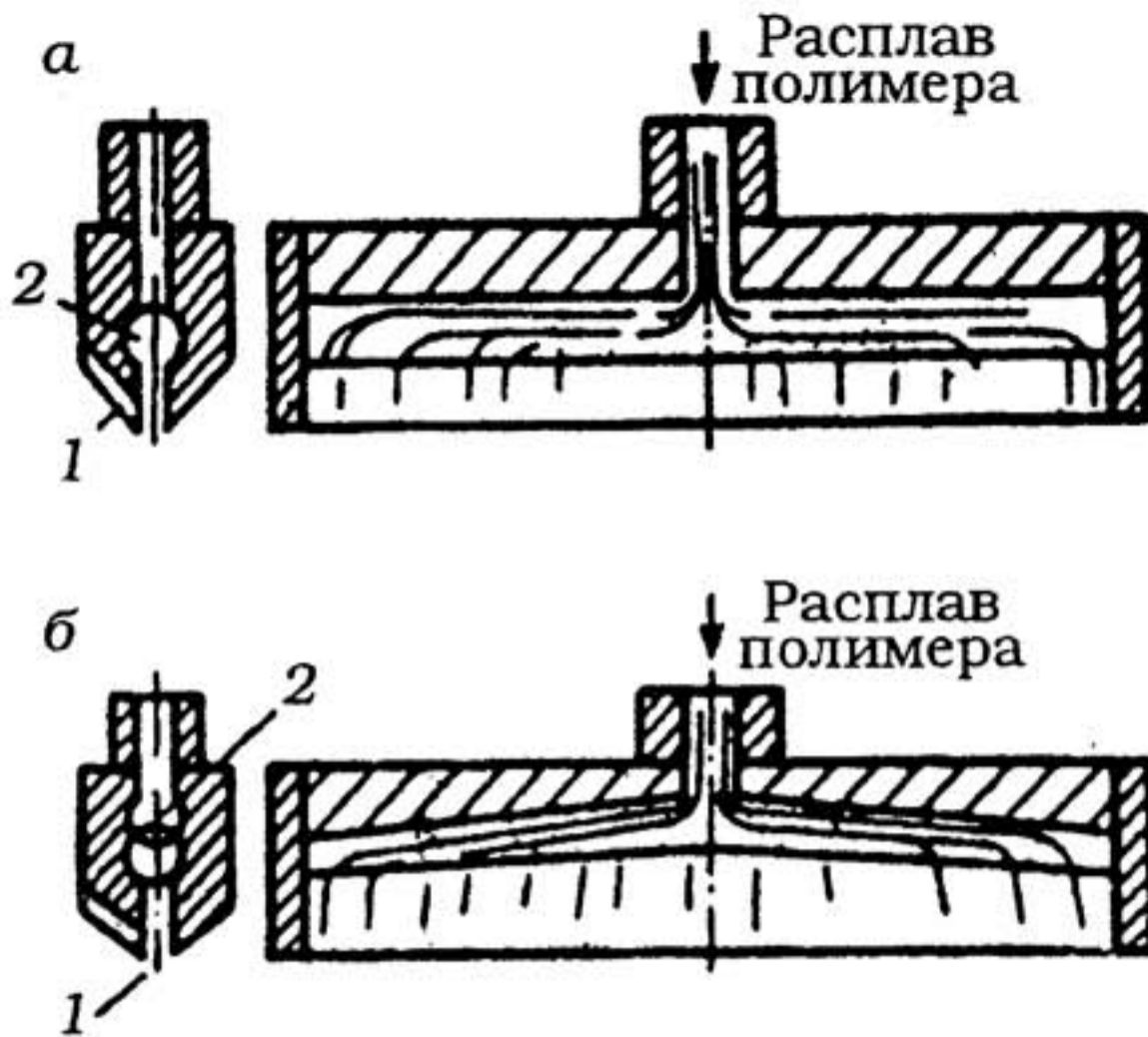


Рис. 4.15. Принципиальная схема плоскощелевой головки:  
 а — коллектор прямой (с постоянным сечением);  
 б — коллектор скошенный (с уменьшающимся сечением);  
 1 — нож; 2 — коллектор

Схема производства плоских пленок экструзией через плоскую щель с охлаждением на барабанах приведена на рис. 4.16. Расплав полимера из экструдера 1 выдавливается через плоскощелевую формующую головку 2 на охлаждающие барабаны 4. Их охлаждение осуществляется водой, глицерином или термостойкими маслами. Под действием потока воздуха из специального коллектора 3, называемого воздушным ножом, пленка плотно прилегает к охлаждающим барабанам и равномерно охлаждается. Затем после прохождения системы роликов и обрезки кромок ножевым устройством 5 пленка наматывается на приемный барабан 6. Отрезанные продольные кромки могут наматываться на специальный барабан или непосредственно подаваться на режущие устройства для получения крошки, которая снова возвращается в производство.

Схема получения плоских пленок с охлаждением в воде показана на рис. 4.17. Расплав полимера из плоскощелевой формующей головки экструдера 1 в виде плоской ленты поступает в ван-

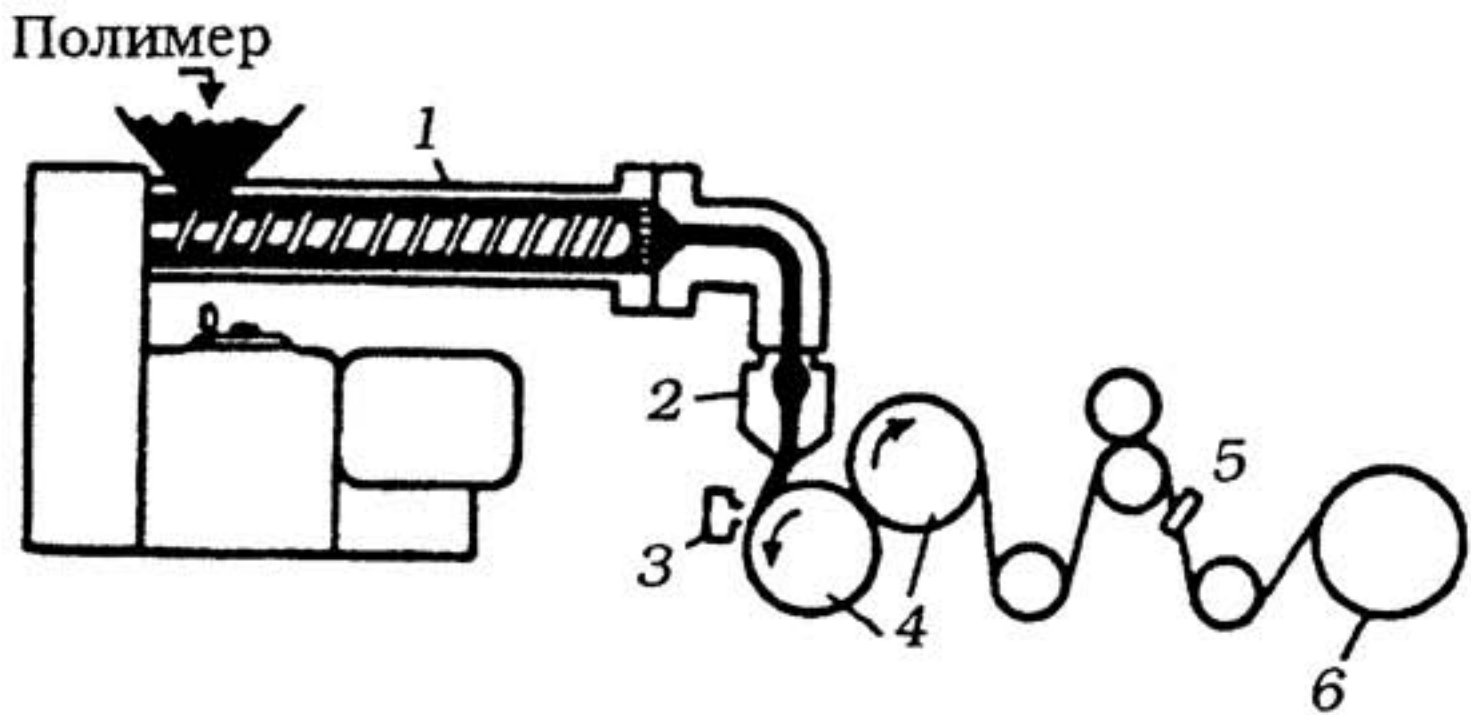


Рис. 4.16. Схема производства пленок экструзией через плоскую щель с охлаждением на барабанах

ну с холодной водой. Остывшая пленка осушается с помощью водоснимателя 3 и посредством тянущих валков подается на режущее приспособление 4 для обрезки продольных кромок. Готовая пленка наматывается на барабан приемного устройства 5.

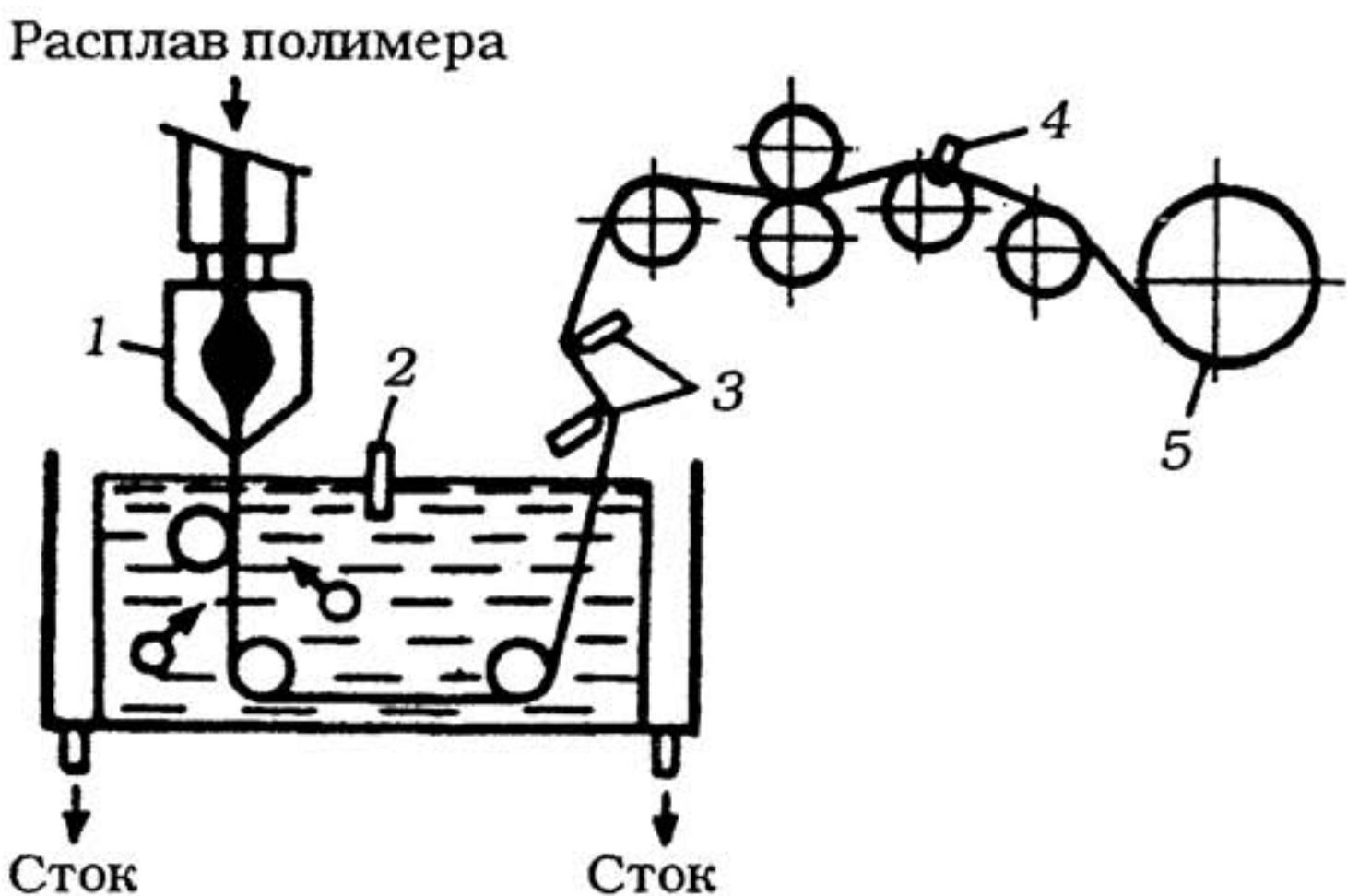


Рис. 4.17. Схема производства пленок экструзией через плоскую щель с охлаждением в водяной ванне:  
 1 — формующая головка; 2 — волногаситель;  
 3 — водосниматель; 4 — нож; 5 — намоточный барабан

Пленки, охлажденные на барабанах, отличаются равномерностью физико-механических свойств и повышенной прозрачностью. Охлажденные в воде пленки характеризуют сильный блеск и большая жесткость.

Предпочтение плоским пленкам отдают в тех случаях, когда от упаковки требуются повышенная прозрачность, четкая маркировка и другая информация, а также высокие и стабильные прочностные свойства. При упаковке на автоматических линиях удобнее использовать рукавные пленки.

**Метод полива раствора полимера или форполимера** на металлическую поверхность применяется для получения пленок из легко растворимых полимеров или форполимеров, которые нестойки в расплавленном состоянии или разлагаются при нагревании ниже температуры плавления, например, ПВХ, ПК, полиимиды.

Метод полива состоит из нескольких стадий: приготовление раствора полимера; полив раствора полимера на гладкую полированную поверхность; отделение растворителя от полимера.

Стадия приготовления раствора полимера включает операции растворения, фильтрования и деаэрации. Растворение осуществляют в емкостях с различными устройствами для перемешивания и подогрева. Как правило, в смесители загружают вместе с полимером и растворителем также пластификатор, стабилизатор, краситель и другие необходимые добавки. Концентрация растворов колеблется в пределах 10–35%. Для получения прозрачных пленок обычно используют смеси из нескольких растворителей. Очистку растворов от разнообразных примесей проводят фильтрованием в фильтрах различных конструкций с использованием сложных фильтрующих систем. Качество фильтрации во многом определяет качество получаемых пленок. Отделение раствора от воздушных включений осуществляют в деаэраторах, различных по конструкции и принципу действия.

Формование пленки происходит на стадии полива. В зависимости от вида полированной поверхности подложки различают методы полива на барабан, на бесконечную ленту, в осадительную ванну (мокрое формование).

Система нанесения раствора на движущуюся подложку должна обеспечивать формирование равномерного по ширине и длине слоя пленки. Наиболее часто эти функции выполняет фильера с щелевым прямоугольным отверстием внизу, размеры которого могут регулироваться перемещением подвижной стенки 4 (рис. 4.18). Раствор, вытекающий из фильеры самотеком, равномерно распределяется по поверхности движущейся подложки ножом 6 с отшлифованной и полированной нижней кромкой. Толщина и равномерность слоя пленки зависят от зазора между подвижной 4 и неподвижной 5 стенками, расстояния между ножом 6 и подложкой 9, уровня раствора в емкости фильеры и скорости движения подложки. Для производства тонких пленок фильера снабжается калибрующим вращающимся валиком 7. При нанесении высоковязких растворов форполимеров, например раствора полиамидокислоты в производстве полиимидных пленок, стенки фильеры могут иметь систему подогрева.

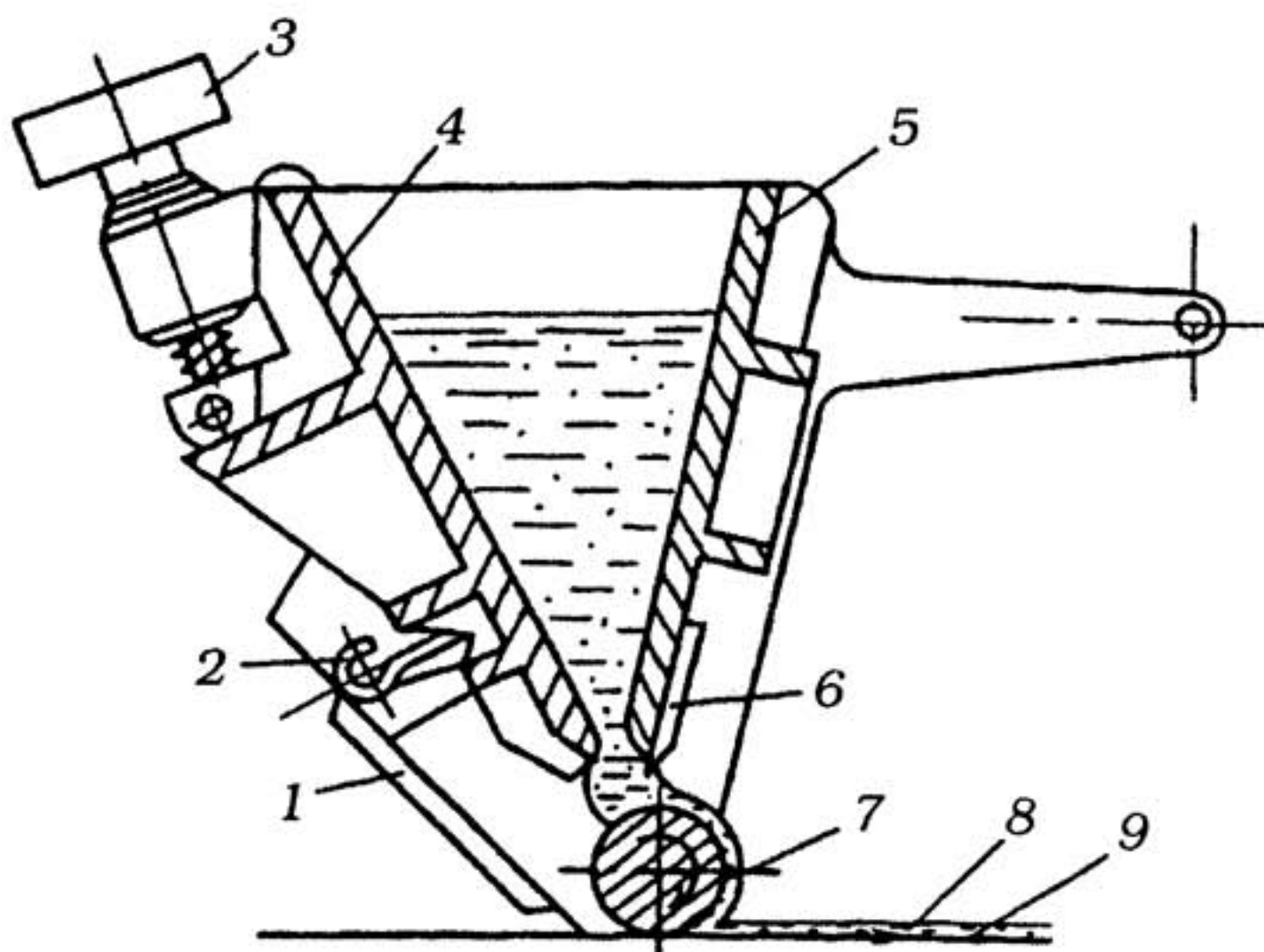


Рис. 4.18. Фильера с валиком для отливки пленок из раствора:  
 1 — задняя планка (стекло); 2 — пружина, прижимающая стекло;  
 3 — кронштейн с винтом для регулирования щели; 4 — подвижная стенка; 5 — неподвижная стенка; 6 — передняя планка (нож);  
 7 — вращающийся валик; 8 — пленка; 9 — подложка

Формование пленок методом полива на барабан осуществляют следующим образом. Приготовленный раствор полимера из питателя 2 подается в фильеру, откуда равномерным слоем наносится на вращающийся нагретый отливочный (сушильный) барабан (рис. 4.19). Металлический барабан шириной 1,2–2,6 м и диаметром 1,5–5,4 м имеет гладкую полированную поверхность (не ниже 9-го класса чистоты), обогревается теплым воздухом, горячей водой или паром. Для облегчения съема сформованной и подсушенной пленки на поверхность барабана наносят тонкое твердое антиадгезивное покрытие, например раствор отверждающихся кремнийорганических соединений. Высушенная на барабане пленка приобретает самонесущую способность, становится формоустойчивой. При помощи съемного вала пленка отделяется от барабана и подается в сушильную камеру 3 для окончательной досушки, откуда

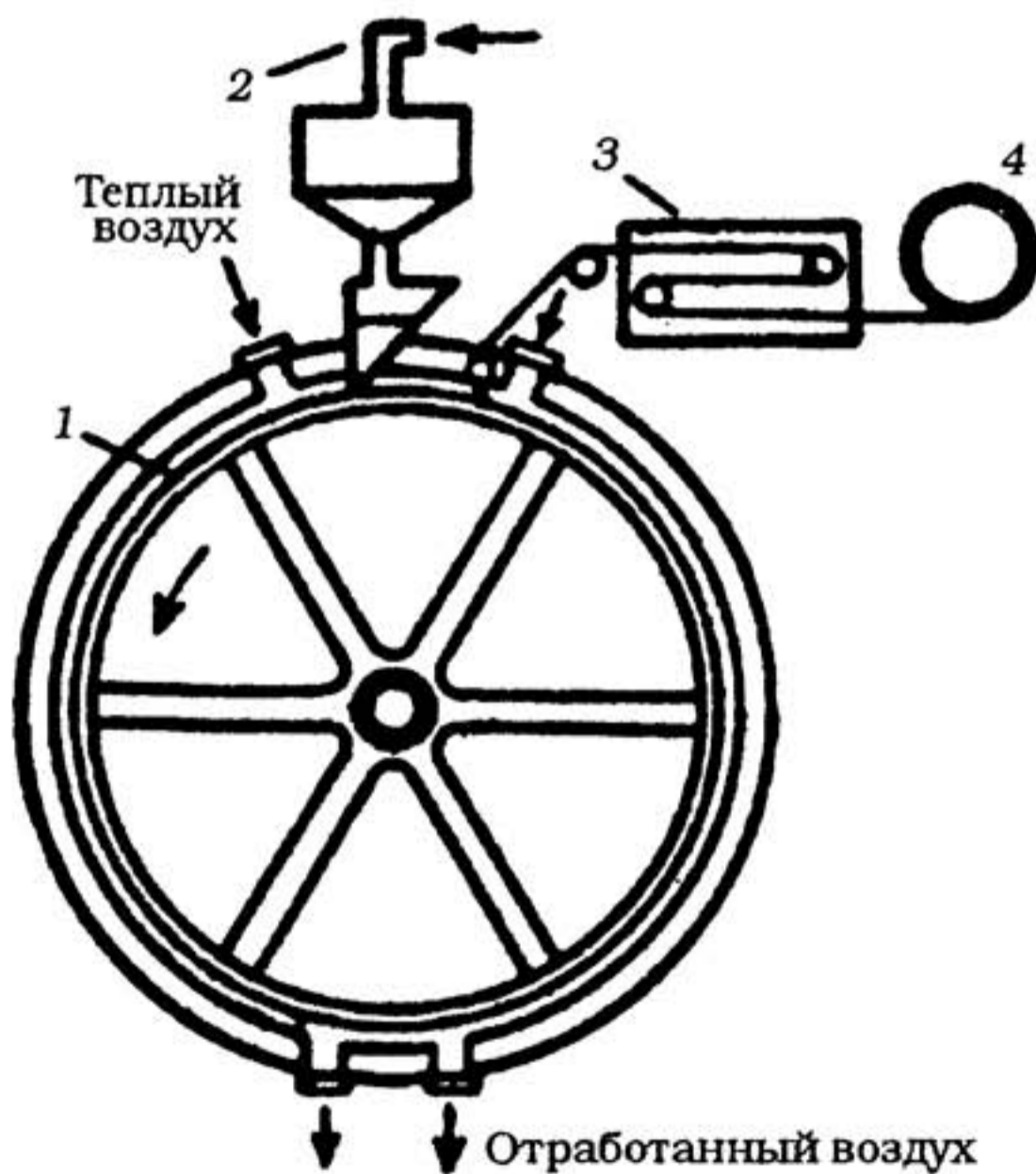


Рис. 4.19. Схема производства пленок методом полива на барабан:  
 1 — металлический барабан; 2 — питательный патрубок с фильерой; 3 — сушильный шкаф;  
 4 — намоточный барабан

куда проходит через резальное устройство для обрезки кромок и поступает на намоточный станок 4. Испарившаяся парогазовая смесь растворителей из барабана и сушильной камеры конденсируется в конденсаторе и направляется в специальный сборник.

Формование пленок методом полива на бесконечную ленту наибольшее применение нашло в производстве ТАЦ-пленок, технологическая схема которого приведена на рис. 4.20. Приготовленный в смесительном аппарате 2 раствор частично омыленного ТАЦ в смеси растворителей — метилхлорида с метиловым или этиловым спиртом в соотношении 9:1, а также с пластификаторами (смесь фталатов с фосфатами 1–2,5%), стабилизаторами, красителями и прочими добавками, отфильтрованный на многоступенчатых (2–4 ступени) фильтр-прессах 3, очищенный от воздушных включений в деаэраторе нагревания 4, подается в емкость фильеры 5, из которой ровным слоем наносится на поверхность движущейся непрерывной ленты отливочной машины 6. Отливочная машина состоит из двух барабанов, на которые натянута бесконечная поли-

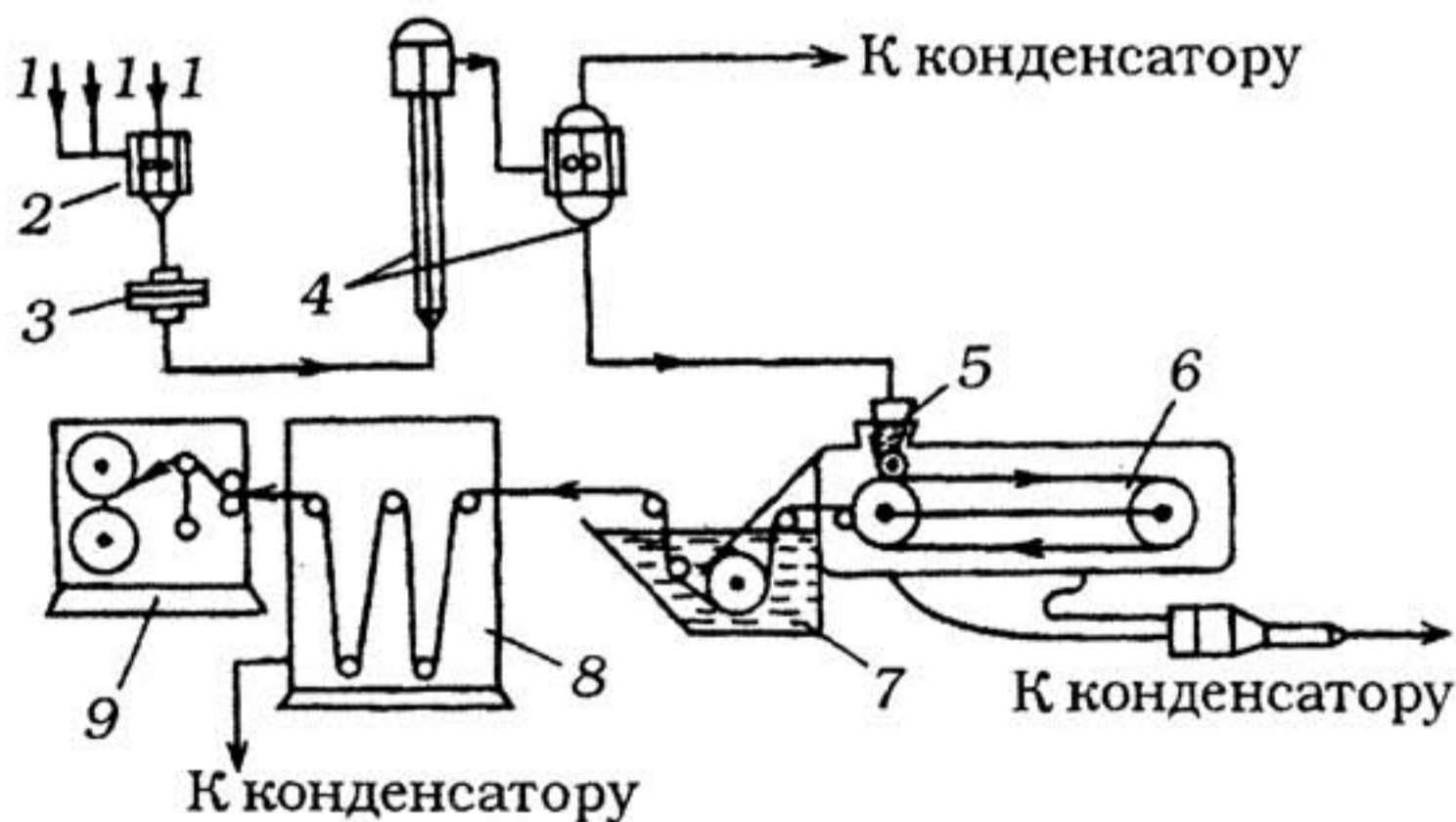


Рис. 4.20. Схема производства ТАЦ-пленки методом полива на бесконечную ленту:

- 1 — мерники-дозаторы; 2 — смесительный аппарат;
- 3 — фильтр-пресс; 4 — деаэратор; 5 — фильера;
- 6 — отливочная машина; 7 — гидравлический затвор;
- 8 — камера досушки; 9 — приемное устройство

рованная лента шириной 0,7–1,4 м и длиной 28–86 м. Оба барабана заключены в герметичный кожух, который образует вдоль бесконечной ленты сушильные каналы. В отливочной машине пленка высушивается до остаточного содержания растворителя 15–20%, затем с помощью съемного валка отделяется от подложки и через гидравлический затвор 7 подается в камеру досушки 8, где сушится нагретым воздухом при температуре от 100°C в первой зоне до 125°C в последней зоне сушки. После этого пленка режется по ширине и наматывается в рулоны в приемном устройстве 9.

Методом полива в осадительную ванну (мокрым формованием) получают преимущественно целлофан. Вискозу из хранилища-танка 1 (рис. 4.21) насосом 2 через фильтр 3 равномерно подают в фильеру, нижняя часть которой на 20–25 мм погружена в осадительную ванну 4, где происходит формование пленки вследствие охлаждения ксантогената целлюлозы и его омыления. Наибольшее распространение получил однованный способ осаждения, когда оба процесса проводят одновременно. Осадительная ванна в этом случае содержит 16% серной кислоты, 14–16% сульфата натрия и 68–70% воды. Длина щели фильеры должна быть больше заданной ширины готовой пленки, поскольку при формовании и последующей обработке пленка усаживается на 40–45%. Формование оболочек

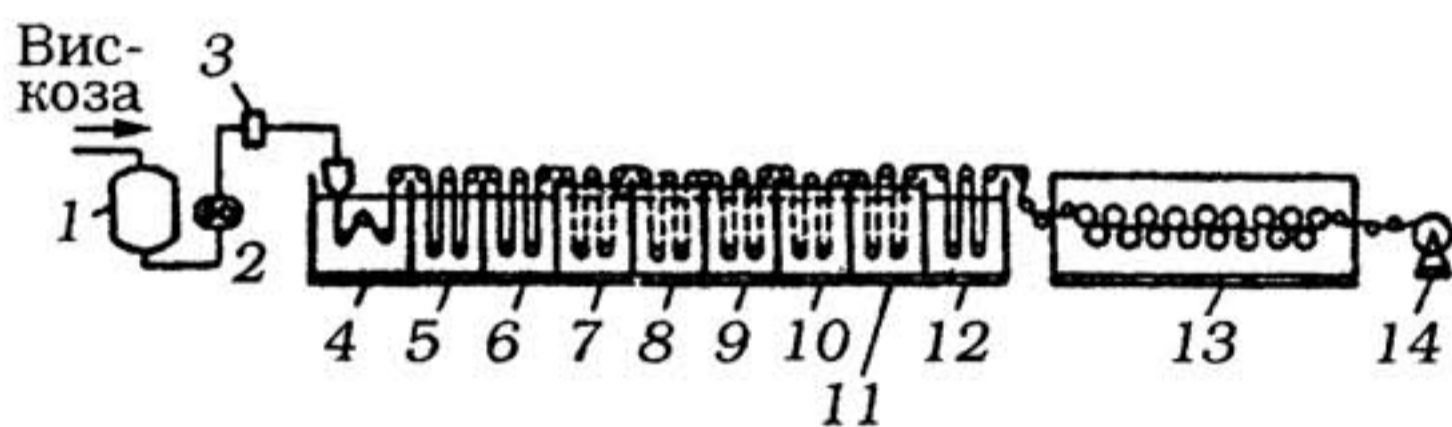


Рис. 4.21. Схема производства целлофана

методом полива в осадительную ванну (мокрое формование):

- 1 — танк; 2 — насос; 3 — фильтр; 4–12 — ванны; 4 — осадительная;  
 5 — регенерационная; 6, 8, 11 — для водной промывки;  
 7 — для обезвоживания; 9 — для отбеливания;  
 10 — для обессоливания; 12 — для умягчения;  
 13 — сушилка; 14 — намоточный барабан

для колбасных изделий осуществляют в фильерах скольцевой щелью, при этом состав осадительной ванны подается дополнительно через фильеру внутрь получаемых рукавных пленок. Из осадительной ванны пленка подается в регенерационную ванну 5 с 7–10%-ным водным раствором серной кислоты, где превращается в полностью регенерированную целлюлозную пленку. Затем пленка проходит через последовательно расположенные емкости 6–12, в которых циркулируют различные растворы, и подвергается промывке, десульфурации, пластификации. Иногда перед пластификацией пленку отбеливают и красят. Пластификатором обычно служит глицерин. В сушилке 13 пленку сушат на полых цилиндрах (сушильных барабанах), обогреваемых изнутри горячей водой. Снаружи пленка дополнительно обдувается горячим воздухом.

К достоинствам пленок, полученных методом полива раствора полимера, относятся равномерная толщина, повышенная прозрачность, отсутствие нерастворимых примесей, практически полная изотропность свойств.

Недостатками метода являются низкая производительность, трудность изготовления толстых пленок, пожароопасность применяемых органических растворителей, сложность их регенерации, что существенно повышает расходы на оборудование и себестоимость выпускаемой пленки.

**Метод полива дисперсии полимера на полированную поверхность** по своей сути и аппаратному оформлению мало отличается от метода полива раствора полимера. Главным и принципиальным отличием является применение коллоидных систем (например, латексов), в которых дисперсионной средой служит вода, а дисперсной фазой – частицы полимера. Это обуславливает достоинства способа:

- а) отпадает необходимость применения дорогостоящих, токсичных и огнеопасных растворителей;
- б) возникает возможность непосредственного использования эмульсий и суспензий, полученных в результате эмульсионной и суспензионной полимеризации без промежуточной операции выделения полимера.



Основным недостатком метода является сложность слипания полимерных частиц в процессе высыхания дисперсии, что затрудняет получение структурно-однородных монолитных пленок.

Метод полива дисперсии полимера используют главным образом при получении пленок для санитарно-гигиенической упаковки изделий, а также для покрытий полимерных пленок, бумаги и тканей.

**Каландровый метод** получения пленок основан на принципе непрерывного формирования пленок из расплава полимерного материала при последовательном его пропускании через несколько зазоров (обычно два или три) между параллельно расположенными и вращающимися навстречу друг другу полыми цилиндрами-валками, являющимися главной рабочей частью каландров.

Наиболее распространенные схемы расположения валков в каландрах для производства пленок приведены на рис. 4.22: трехвалковые вертикально в линию и четырехвалковые L-, Z- и S-образные.

Полимерные пленки каландровым методом изготавливают следующим образом. Предварительно тщательно перемешанная смесь мелко диспергированных компонентов (полимер, пластификатор, стабилизатор, краситель) подается на вальцы 1 (рис. 4.23), где подвергается пластификации. Пластификация обеспечивает равномерный разогрев смеси до температуры переработки, растворение жидких и низкомолекулярных

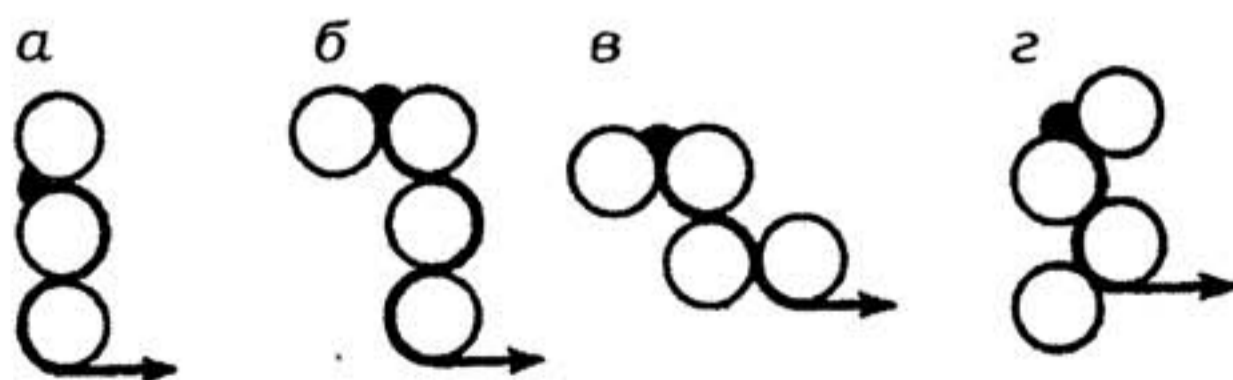


Рис. 4.22. Схемы расположения валков в каландрах для производства полимерных пленок:  
а — трехвалковый; б — L-образный;  
в — Z-образный; г — S-образный

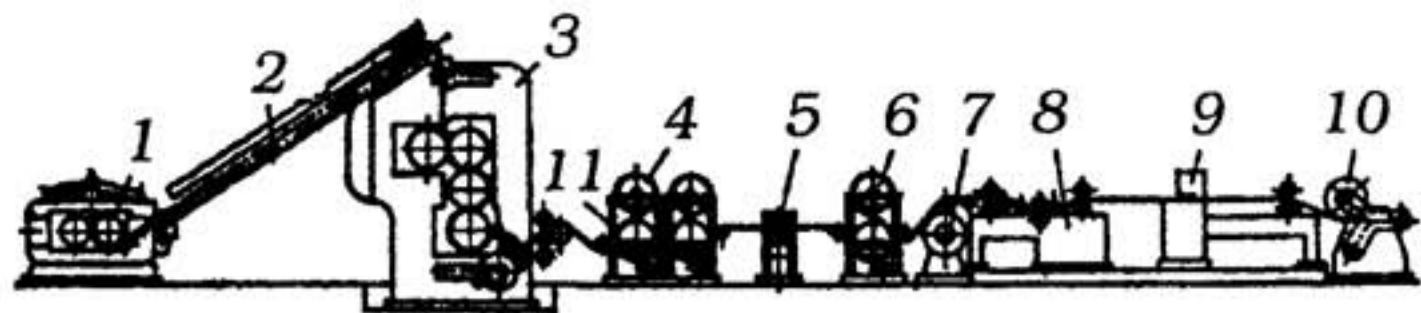


Рис. 4.23. Схема получения пленок каландровым методом:  
 1 — вальцы; 2 — транспортерная лента; 3 — каландр;  
 4, 6 — охлаждающие барабаны; 5 — устройство для замера  
 толщины и массы полимера; 7 — счетчик; 8 — ширительное  
 устройство; 9 — тянущее устройство; 10 — приемно-  
 намоточное устройство; 11 — пленка

компонентов смеси, диспергирование частиц порошкообразных компонентов, гомогенное (равномерное) распределение всех компонентов. Многие смесители-пластификаторы работают по принципу экструзионных машин, которые для усиления диспергирующей способности снабжены различными дополнительными устройствами. Пластифицированный полимер транспортером 2 непрерывно подается на каландры 3, где равномерно распределяется по длине первого межвалкового зазора, откуда подхватывается последующими валками и проходит через второй и третий межвалковые зазоры. Толщину пленки корректируют регулировкой последнего межвалкового зазора автоматически по сигналу бесконтактного измерительного устройства 5, осуществляющего непрерывный контроль толщины. Отформованное в каландре пленочное полотно 11 поступает на охлаждающие барабаны 4, где осуществляются охлаждение и термическая стабилизация. Окончательное охлаждение осуществляется на барабанах 6, откуда пленка через счетчик метража 7 и ширительное устройство 8 тянущим устройством 9 подается на приемно-намоточный барабан 10.

Пленка, полученная каландровым методом, обладает продольной ориентацией, которая обеспечивается за счет превышения линейной скорости отбора охлажденной на барабане 4 пленки над окружной скоростью последнего валка каландра на 30–100%. Поэтому прочность при растяжении в продольном направлении пленок на 10–20% выше прочности в поперечном

направлении. В области отбора от каландра с помощью дополнительных вытяжных устройств удастся растянуть пленку до 500% от ее первоначальной длины.

Каландровый метод получения пленок более дорогой, чем методы полива раствора и экструзия расплава полимеров.

Каландровым методом получают главным образом пленки и листы из ПВХ: так перерабатывается почти половина производимого во всем мире ПВХ, что объясняется наименьшей вероятностью тепловой деструкции полимера при каландрировании.

**Строганием заготовок** производят пленки главным образом из ФП и целлулоида. Из этих полимеров первоначально прессуют цилиндрические заготовки. На специальных установках их вращают вокруг своей оси и срезают профильным ножом пленочное полотно. Полученные толстые пленки раскатывают в тонкие на особых прокатных станках.

Способы получения основных пленок, применяемых в упаковке, приведены в табл. 4.11.

### **Ориентация полимерных пленок**

Теоретически во всех случаях аморфной или кристаллической структуры полимеров их макромолекулы должны быть термодинамически равновесны и находиться в наиболее выгодном положении.

Для аморфных полимеров это рыхлый клубок, размер которого тем больше, чем больше молекулярная масса и чем более жесткой является макромолекула. Жесткая полярная макромолекула характеризуется большими размерами элементарного звена — сегмента, в ней при общей заданной длине (молекулярной массе) число сегментов меньше, чем в гибкой неполярной молекуле с короткими сегментами. Макромолекулярные клубки переплетаются, образуют своеобразную пространственную сетку. Узлами этой сетки являются либо зацепления, переплетения макромолекул, либо области ближнего порядка, где сегменты соседних макромолекул плотно прилегают друг к другу и удерживаются силами межмолекулярного взаимодействия.

**Способы производства полимерных пленок**  
**(ПВ — промышленный выпуск,**  
**В — возможный способ получения,**  
**Н — неприменимый для данного полимера способ)**

Условное обозначение пленки	Экструзия расплава		Полив на подложку			Каландрирование	Строгание
	рукавные	плоские	раствора	дисперсии	мокрое формование		
Ц	Н	Н	Н	Н	ПВ	Н	Н
ДАЦ, ТАЦ, АБЦ, ЭЦ	ПВ	В	ПВ	Н	В	В	Н
ГХК	Н	Н	ПВ	В	Н	В	Н
ПЭ	ПВ	ПВ	Н	Н	Н	Н	Н
ПП	ПВ	ПВ	Н	Н	Н	Н	Н
ПВХ мягкий	ПВ	ПВ	ПВ	В	Н	ПВ	Н
ПВХ жесткий	В	В	ПВ	В	Н	Н	Н
ПВДХ	ПВ	ПВ	Н	Н	Н	Н	Н
ПВС	В	В	ПВ	Н	Н	Н	Н
ПЭТФ	В	ПВ	Н	Н	Н	Н	Н
ПК	ПВ	ПВ	ПВ	Н	Н	Н	Н
ПС	В	ПВ	В	Н	Н	В	Н
ПА	В	ПВ	Н	Н	Н	Н	Н
АПА	В	В	ПВ	Н	Н	Н	Н
ПФО	В	В	ПВ	Н	Н	В	Н
ПСУ	Н	Н	ПВ	Н	Н	Н	Н
ПВФ	В	ПВ	В	Н	Н	Н	Н
ФП	Н	Н	Н	В	Н	Н	ПВ
ПМ	Н	Н	ПВ	Н	Н	Н	Н

У кристаллических полимеров наиболее выгодная и часто встречающаяся форма кристаллов — сферолитная. Сферолиты представляют собой сферически-симметричное полукристаллическое образование, состоящее из большого числа отдельных кристаллов. При свободном росте они принимают форму шара. Молекулярные цепи в них уложены почти перпендикулярно радиусу. Внутри сферолитов имеются области как с

упорядоченной, так и с аморфной структурой. Одна макромолекула может проходить через несколько кристаллов, связывая их между собой (так называемые проходные макромолекулы). Между отдельными кристаллами или кристаллическими областями существуют аморфные зоны с рассмотренной выше пространственной сеткой и узлами.

**Ориентацией** называют процесс вытяжки и упорядоченного расположения цепей макромолекул полимеров под воздействием силового и теплового полей.

Благоприятные условия для образования ориентированных структур макроцепей создаются в случае, если подвижность их сегментов достаточна для ориентации, а большинство узлов зацеплений не будет разрушено. Если подвижность сегментов очень велика, а скорость деформирования мала, то распрямляемые цепи будут выходить из зацеплений с соседями и дезориентироваться (см. рис. 4.24, в, г).

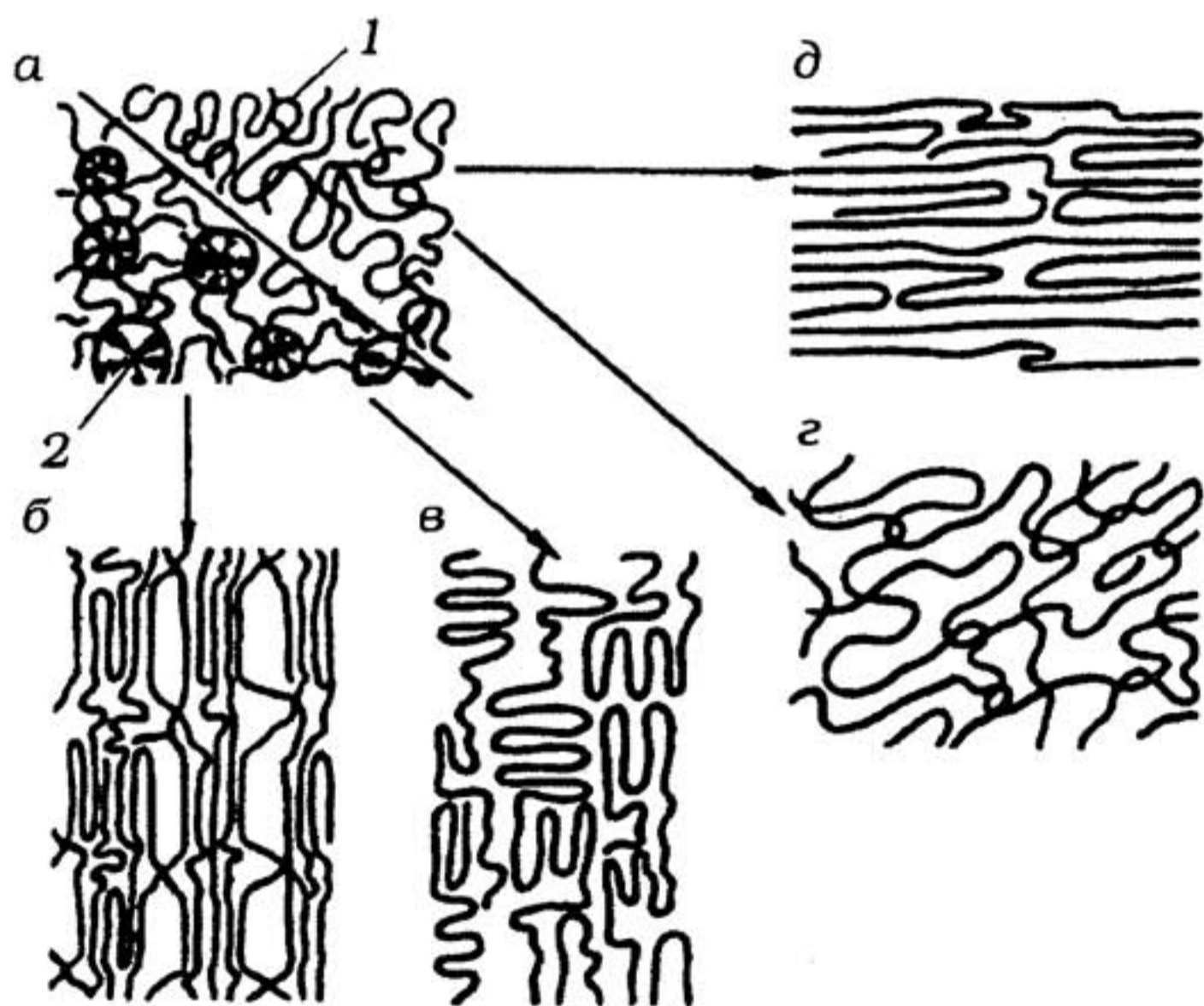


Рис. 4.24. Схема образования различных структур при ориентации полимера:  
 1 — аморфный полимер; 2 — кристаллический;  
 а — неориентированное состояние; б-г — ориентированное

При ориентации кристаллического полимера происходит разрушение сферолитов с рекристаллизацией — образованием ориентированной фибриллярной структуры (рис. 4.24, б). Фибриллу можно представить в виде длинной нити образований надмолекулярного уровня с чередующимися кристаллическими и аморфными участками. Кристаллиты занимают 60–80% длины фибриллы.

В зависимости от степени совершенства ориентации макромолекул в образующейся структуре полимера образцы из него будут иметь различные физико-механические характеристики. При увеличении степени ориентации значительно возрастает прочность полимеров (рис. 4.25).

Различают одноосную и двухосную ориентацию. Одноосно-ориентированный полимер имеет высокие механические характеристики в направлении ориентации и пониженные в по-

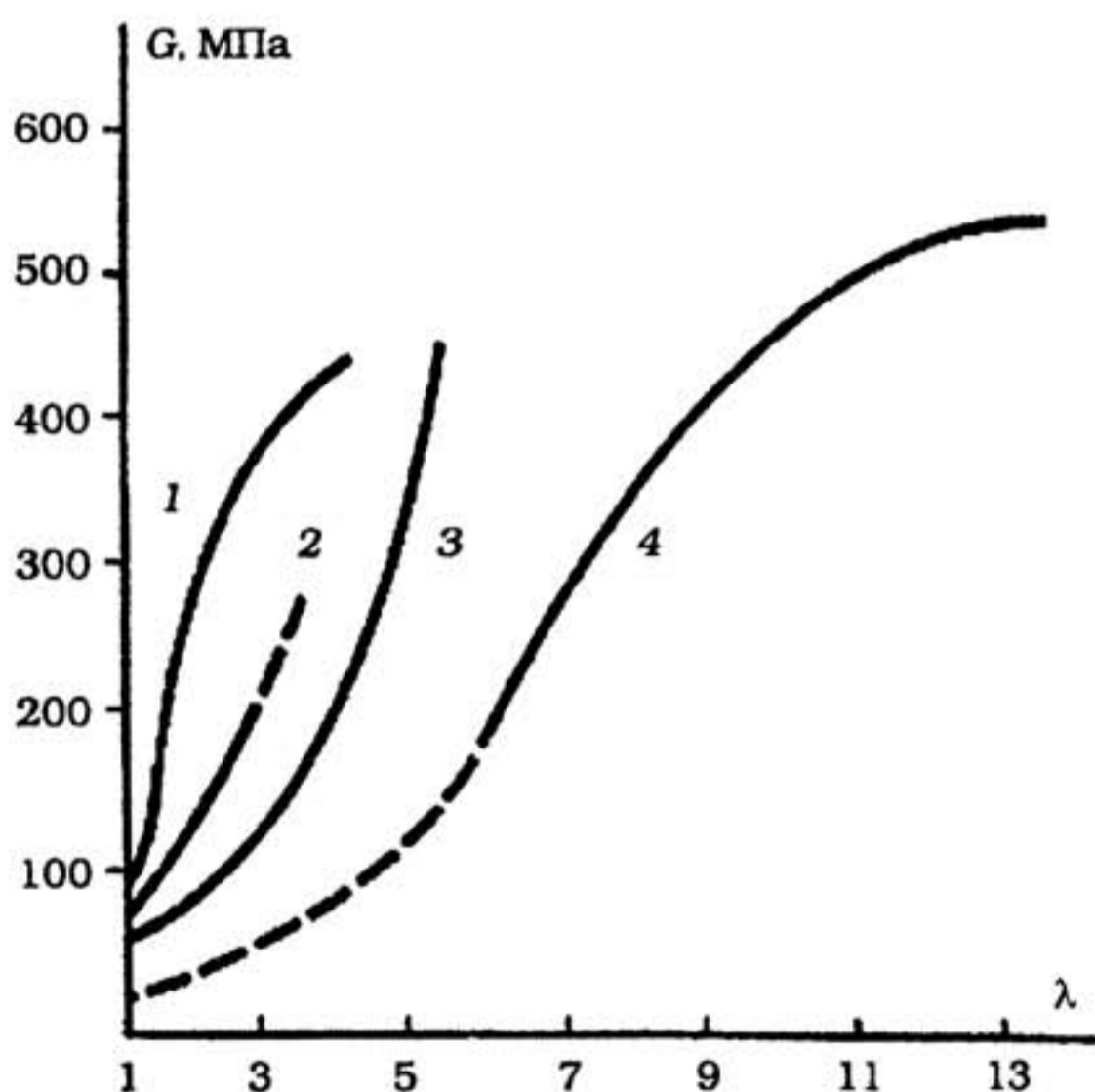


Рис. 4.25. Зависимость прочности

при разрыве полимеров от степени вытяжки при ориентации:

- 1 — жесткоцепные (полиимиды); 2 — средней жесткости (полистирол);  
 3 — средней жесткости (полиэтилентерефталат);  
 4 — гибкоцепные (полиэтилен)

перечном направлении. При двухосной ориентации возникает плоско-ориентированная структура расположения макромолекул, способствующая изотропии свойств полимера в плоскости ориентации.

На практике ориентацию осуществляют методом вытяжки с нагревом — деформированием пленок в одном или двух направлениях.

Нагрев аморфных полимеров осуществляют до температуры  $T_a$ , эмпирически определяемой из неравенства

$$T_a \geq T_c + (5 \div 10). \quad (4.60)$$

Для кристаллических полимеров температура нагрева  $T_k$

$$T_k \leq T_{пл} - (10 \div 20). \quad (4.61)$$

**Одноосную ориентацию** проводят методом одноосной вытяжки. Различают непрерывную одноосную вытяжку растяжением предварительно сформованных заготовок пленки при помощи тянущих или сдавливающих валков, а также периодическую — с помощью специальных зажимов — клуппов (рис. 4.26).

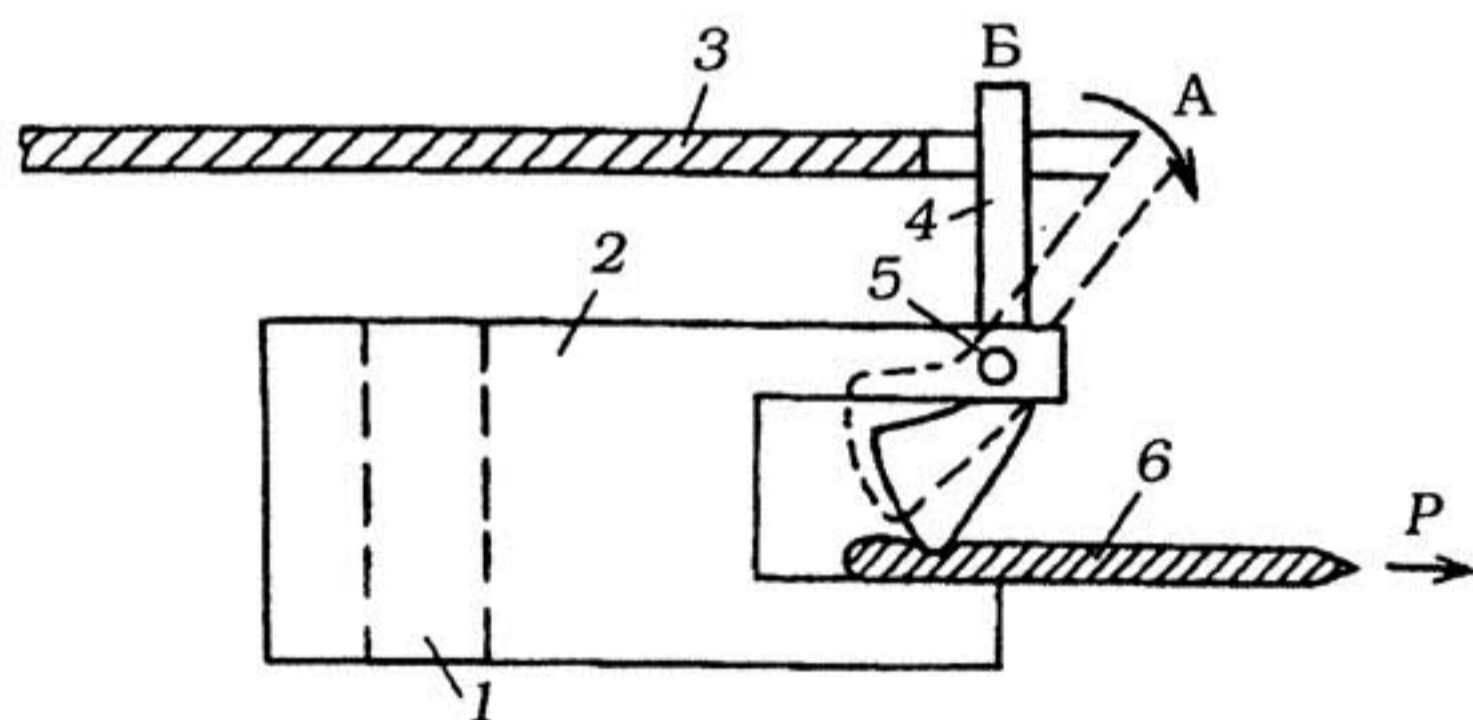


Рис. 4.26. Устройство клуппа:

- 1 — отверстие для крепления к движущейся цепи; 2 — корпус;
- 3 — упор-толкатель поворота язычка; 4 — язычок; 5 — вал;
- 6 — растягиваемая зажатая пленка;
- $P$  — сила сопротивления растяжению пленки
- (А-позиции язычка до зажатия пленки, Б — после)

**Двухосную ориентацию** осуществляют методом двухосной вытяжки. Двухосную вытяжку подразделяют на последовательную, или раздельную, и одновременную. При последовательной, или раздельной, двухосной вытяжке одноосно ориентированную пленку еще раз растягивают в перпендикулярном направлении. В случае одновременной двухосной вытяжки изотропную неориентированную плоскую пленку растягивают одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а рукавную пленку растягивают и раздувают одновременно.

Технологическая схема производства ориентированных пленок приведена на рис. 4.27. Полученная методом экструзии расплава полимера через плоскощелевую формующую головку широкая пленка 6 проходит вблизи электрода высокого напряжения 7, приобретая электрический заряд, противоположный заряду поверхности охлаждающего барабана 8, плотно прижимается электростатическими силами к его поверхности и охлаждается. Охлажденная пленка 9 поступает в агрегат одноосной (продольной) ориентированной вытяжки 12 с линейной скоростью  $v_1$ , где валками 10 удерживается от возможного проскальзывания, а нагревательными валками 11 в зоне предварительного подогрева 1 разогревается. В промежутке между двумя ориентирующими валками 13 пленка дополнительно разогревается нагревателем 14 до температуры  $T_a$  или  $T_k$  и растягивается за счет того, что линейная скорость  $v_2$  охлаждаемых валков 15 выше, чем  $v_1$ . Охлажденная одноосно ориентированная пленка 17 прижимными валками 16 транспортируется из агрегата 12 и может поступать либо на намоточное устройство и отгружаться на реализацию, либо на последовательную двухосную ориентацию.

Пленки из кристаллических полимеров после ориентации проходят стадию термофиксации. Для этого на дополнительных валах осуществляют интенсивный быстрый прогрев пленки для ускорения кристаллизации с сохранением ориентированной структуры. Такие ориентированные и термофиксированные пленки обладают пониженной усадкой.

В случае последовательной двухосной ориентации одноосно ориентированная пленка 17 через компенсатор 18, в котором сглаживаются возможные колебания скорости подачи



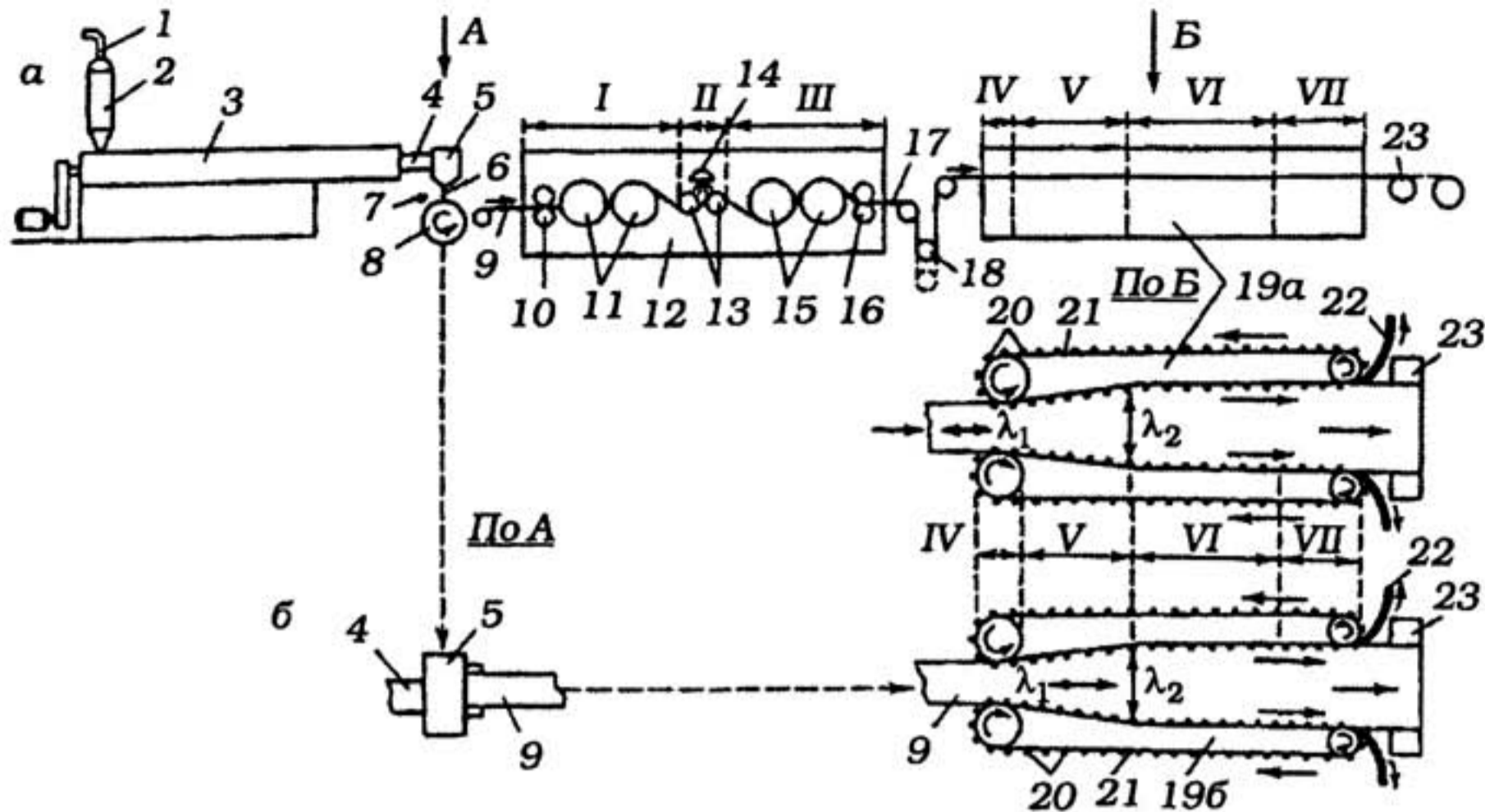


Рис. 4.27. Схема одноосной раздельной (а) и одновременной двухосной (б) ориентации

плоской пленочной заготовки: 1 — патрубок пневмотранспорта;

2 — бункер; 3 — экструдер; 4 — переходник (либо насос);

5 — щелевая головка; 6 — пленочный расплав; 7 — электрод

электростатического прижима пленки; 8 — охлаждающий, формирующий барабан (стрелка — направление вращения барабана);

9 — изотропная пленка; 10, 16 — прижимные валки;

11 — нагревательные, медленно вращающиеся валки;

12 — агрегат для продольной (одноосной) ориентации;

13 — ориентирующие валки; 14 — нагреватель;

15 — быстро вращающиеся охлаждаемые валки;

17 — одноосно-ориентированная пленка; 18 — компенсатор;

19 а — агрегат для поперечной (двухосной) ориентации;

19 б — агрегат одновременной двухосной ориентации;

20 — клуппы (зажимы); 21 — движущаяся непрерывная цепь;

22 — кромка обрезанной пленки; 23 — устройство для намотки пленки.

Зоны: I — подогрева; II — одноосной ориентации; III — охлаждения с

релаксацией; IV — подогрева; V — ориентации; VI — термофиксации;

VII — охлаждения;  $\lambda_1$  — степень вытяжки по длине,  $\lambda_2$  — по ширине пленки

пленки, поступает в агрегат 19а растяжения по ширине, который иногда называют ширильной камерой. Здесь пленка с двух сторон захватывается зажимами-клуппами 20 и в зоне

IV предварительно нагревается, в последующей зоне V дополнительно разогревается до температуры  $T_a$  или  $T_k$  и одновременно растягивается по ширине. После зоны V двухосно-ориентированная пленка из аморфных полимеров охлаждается на открытом воздухе в зоне VI, а из кристаллизующихся полимеров поступает в зону термофиксации, где происходит кристаллизация. После охлаждения в зоне VII на выходе из агрегата 19а края пленки 22, освобожденные от клуппов, обрезаются и в виде отходов идут на переработку. Оставшаяся плоская двухосно-ориентированная пленка с минимальной разнотолщиной наматывается на барабан намоточного устройства 23.

Агрегат 19б для одновременной двухосной ориентации пленок имеет более сложную конструкцию. Изотропная пленка 9 поступает в зону предварительного нагрева IV. Затем в зоне V она разогревается до температуры  $T_a$  или  $T_k$  и одновременно вытягивается по ширине за счет движения зажимов по направляющим и по длине за счет увеличения расстояния между соседними зажимами. В этом случае зажимы вытягивают пленку в двух направлениях. Остальные операции аналогичны операциям последовательной двухосной ориентации.

Ориентация рукавной экструзионной пленки осуществляется непрерывно по мере ее экструзии. Для этого после получения сложенного рукава пленка вновь разогревается и либо последовательно раздувается и растягивается, либо это происходит одновременно. Наиболее распространен способ последовательной ориентации.

Степень вытяжки при ориентации определяют величиной относительного удлинения  $\epsilon_{op}$ :

$$\epsilon_{op} = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100(\%), \quad (4.62)$$

где  $l_0$  — исходная длина образца;  $l_k$  — длина образца после вытяжки.

Часто степень вытяжки определяют значением кратности вытяжки  $\lambda$ . Для случая продольной вытяжки:

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{v_2} = \frac{l_k}{l_0} = \frac{\varepsilon}{100} + 1. \quad (4.63)$$

При двухосной ориентации значение поперечной вытяжки  $\lambda_2$  рассчитывают как отношение ширины полотна после поперечной ориентации к исходной ширине.

Относительная скорость деформирования  $v_{op}$  связана с размерами рабочего участка вытягиваемого образца, степенью вытяжки и временем деформирования  $t$ :

$$v_{op} = \frac{\varepsilon_{op}}{t} = \left( \frac{l_k}{l_0} - 1 \right) \cdot \frac{100}{t} = (\lambda_{1,2} - 1) \cdot \frac{100}{t}. \quad (4.64)$$

В зависимости от типа полимера, способа вытяжки, конструктивных особенностей оборудования существуют предельно допустимые значения  $\lambda_{1p}$ , выше которых пленки разрушаются, и оптимальные, рекомендуемые значения  $\lambda_1$  одноосной вытяжки для последующей двухосной, а также степеней вытяжки при одновременной двухосной ориентации при  $\lambda_1 = \lambda_2$  (табл. 4.12). Поскольку в случае одновременной двухосной ориентации деформирование происходит в обоих направлениях, то и

Таблица 4.12

**Предельные (разрывные) значения  $\lambda_{1p}$  и рекомендуемые значения степеней одноосной вытяжки  $\lambda_1$  для последующей двухосной, а также для одновременной двухосной вытяжки  $\lambda_1 = \lambda_2$  различных полимерных пленов**

Полимер	$\lambda_{1p}$	$\lambda_1$	$\lambda_1 = \lambda_2$
ПЭВП	15-17	5-7	5
ПЭНП	14-16	7-8	—
ПП	13-17	6-8	6
ПЭТФ	6-7	4	4,5
ПС	4-6	3	3,5
П	5-6	3,5-4	3,5
ПМ	3,5-4	1,5-2	1,5
ПММА	2,2-2,5	1,8-2	1,5

**Влияние ориентации на физико-механические свойства полимерных пленок**

Пленка	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
<b>Полиэтилентерефталатная</b>		
неориентированная	42	500
двухосно-ориентированная	175	130
одноосно-ориентированная	525	7
<b>Полистирольная</b>		
неориентированная	35–60	1,0–3,5
двухосно-ориентированная	105–126	60
<b>Полипропиленовая</b>		
неориентированная	40–50	50–70
двухосно-ориентированная	200–120	76–20

уровень ориентации цепей достигается быстрее, т. е. при меньшей величине  $\lambda_1 = \lambda_2$ , чем при одноосной ориентации.

Применительно к упаковке ориентация полимерных пленок решает две важнейшие задачи:

- 1) значительное повышение эксплуатационных свойств;
- 2) создание термоусадочных пленочных материалов.

В результате двухосной ориентации прочность пленок повышается в 3–4 раза, при одноосной — более чем в 10 раз (табл. 4.13), возрастает морозостойкость. Так, морозостойкость двухосно-ориентированной ПП-пленки составляет от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ , а неориентированной — от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ . У ориентированных пленок на 3–50% снижается паро-, водо- и газопроницаемость, повышается стойкость к термоокислительному старению.

## 5. ПРОИЗВОДСТВО МЯГКОЙ ТАРЫ

---

Мягкая тара является одним из наиболее распространенных видов упаковки. Она широко используется для дозирования, транспортировки, хранения продуктов растительного и животного происхождения различной формы и агрегатного состояния: твердых, жидких, пастообразных, сыпучих и т. п.

Главными достоинствами мягкой тары являются незначительный вес и самая низкая стоимость, поэтому она преимущественно является разовой, предназначенной для однократного использования. Такая упаковка эстетична, имеет красочно оформленный привлекательный внешний вид, содержит большое количество информации, удобна и практична в повседневном использовании.

Мягкая тара подразделяется на потребительскую и транспортную (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Виды мягкой тары

---

## 5.1. Мягкая потребительская тара

Наиболее распространенной мягкой потребительской тарой являются пакеты. Они различаются по конфигурации дна, форме корпуса, особенностям горловины. Обычно вместимость пакетов не превышает 3 дм<sup>3</sup>.

Пакеты изготавливают из бумаги, однослойных полимерных пленок и из многослойных композиционных материалов.

Самой простой формой отличаются пакеты типа «подушечка» (рис. 5.2). Их изготавливают из рукавной полимерной пленки путем нанесения двух поперечных швов и отрезания.

Пакеты с одним продольным и двумя поперечными швами могут быть плоскими либо с боковыми складками (рис. 5.3). Их получают из одного рулона плоского пленочного материала нанесением продольного шва с последующим выполнением поперечных швов и отделения пакета.

Плоские пакеты с тремя или четырьмя боковыми швами (рис. 5.4) получают, как правило, из двух рулонов плоских пленочных материалов. Для облегчения вскрытия пакетов в их конструкции предусматривают специальную нить или полоску. Негерметичные пакеты часто выполняют со специальной профильной застежкой.

Пакеты плоские со складкой у дна и с устойчивым дном (рис. 5.5) удобнее получать из одного рулона плоского пленочного материала.

Оболочечные пакеты (рис. 5.6) обычно изготавливают из рукавного термоусаживаемого материала. Их закрывают с торцов специальными проволочными зажимами.



Рис. 5.2. Пакеты типа «подушечка»

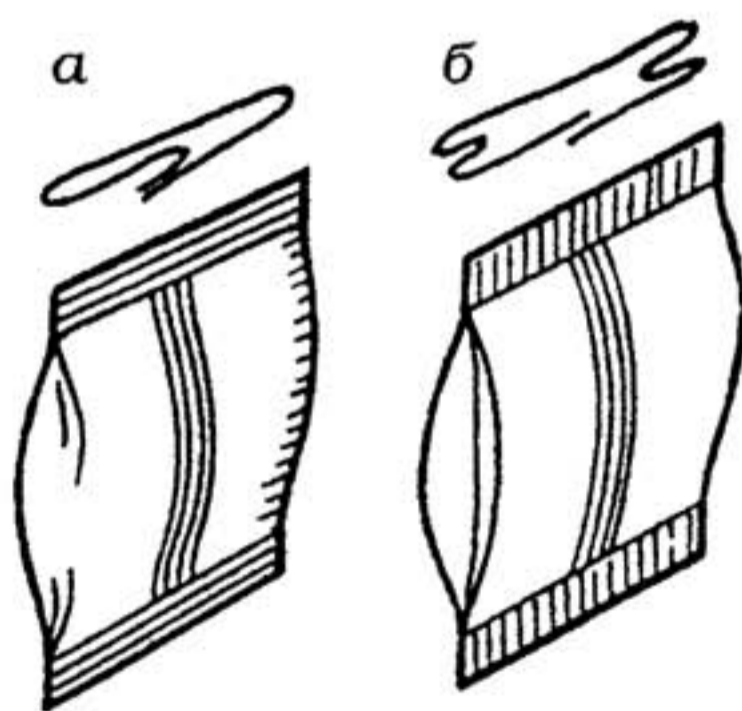


Рис. 5.3. Пакеты с одним продольным и двумя поперечными швами: а — плоский; б — с боковыми складками

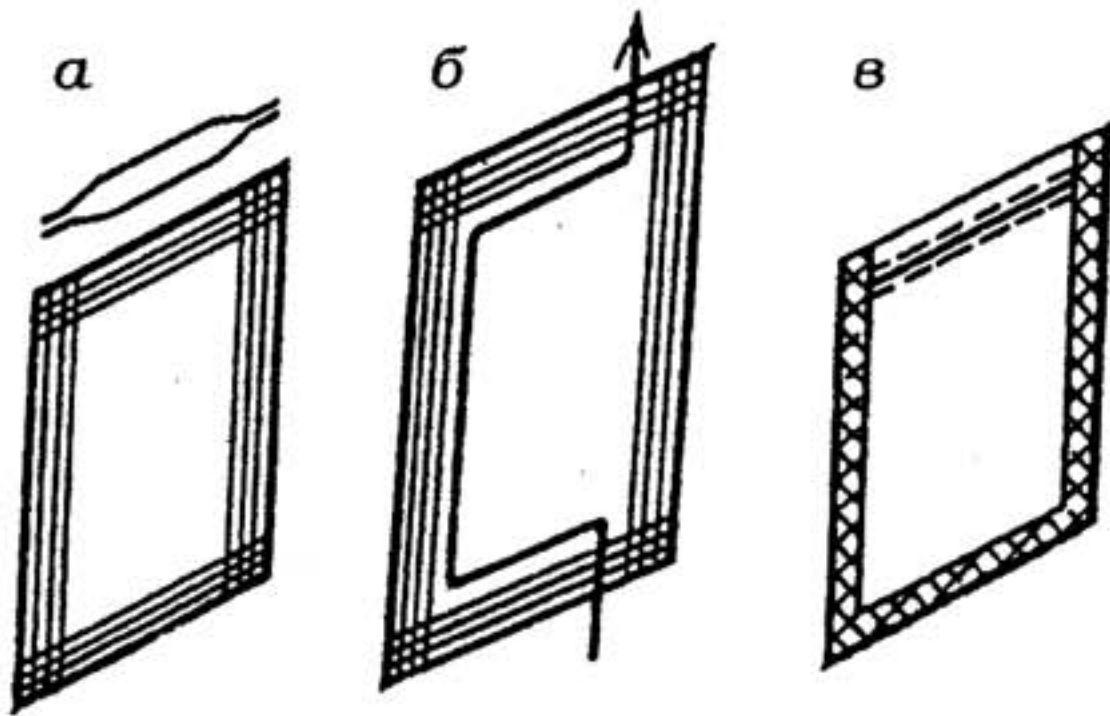


Рис. 5.4. Пакеты плоские с четырьмя швами (а, б); с нитью для вскрытия (б) и с тремя швами и профильной застежкой (в)

Прямоугольные объемные пакеты с плоским дном выполняют преимущественно из многослойных композиционных материалов (рис. 5.7), причем в качестве барьерного слоя герметичных пакетов наиболее часто используют алюминиевую фольгу. Для негерметичных пакетов применяют и бумагу. Горловину прямоугольных объемных пакетов соединяют методами сварки, склеивания, укупоривания этикеткой, липкой лентой, прошивкой скобами, закрытием зажимами (рис. 5.8).

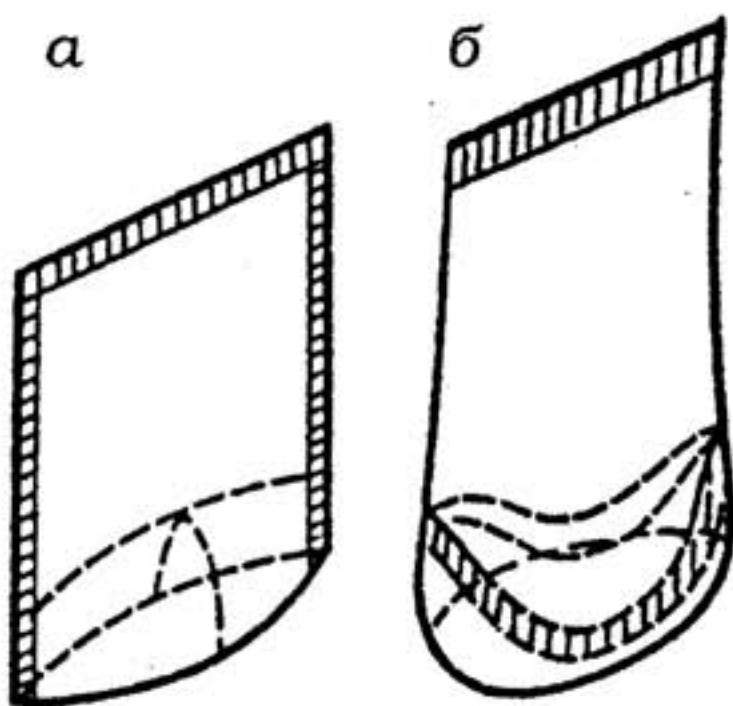


Рис. 5.5. Пакеты плоские со складкой у дна (а) и с устойчивым дном (б)



Рис. 5.6. Оболочечный пакет

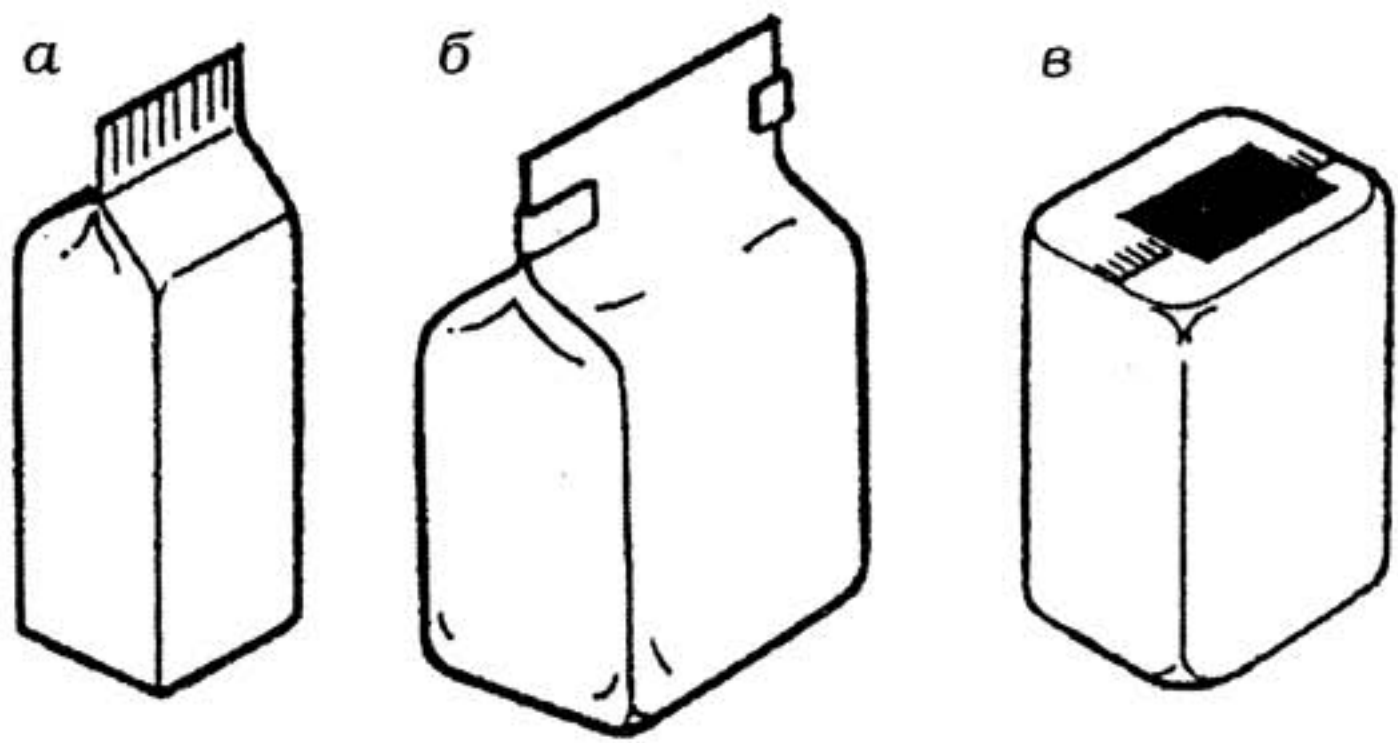


Рис. 5.7. Прямоугольные объемные пакеты с плоским дном:  
а — герметичный; б — с зажимами; в — складной

Пакеты объемные с плоским дном прямоугольной или шестиугольной формы чаще всего производят из специальных видов крафт-бумаги (рис. 5.9). Дно и боковые стенки соединяют склеиванием.

Объемные пакеты бывают сложной геометрической формы. Наибольшей технологичностью среди них отличаются пакеты

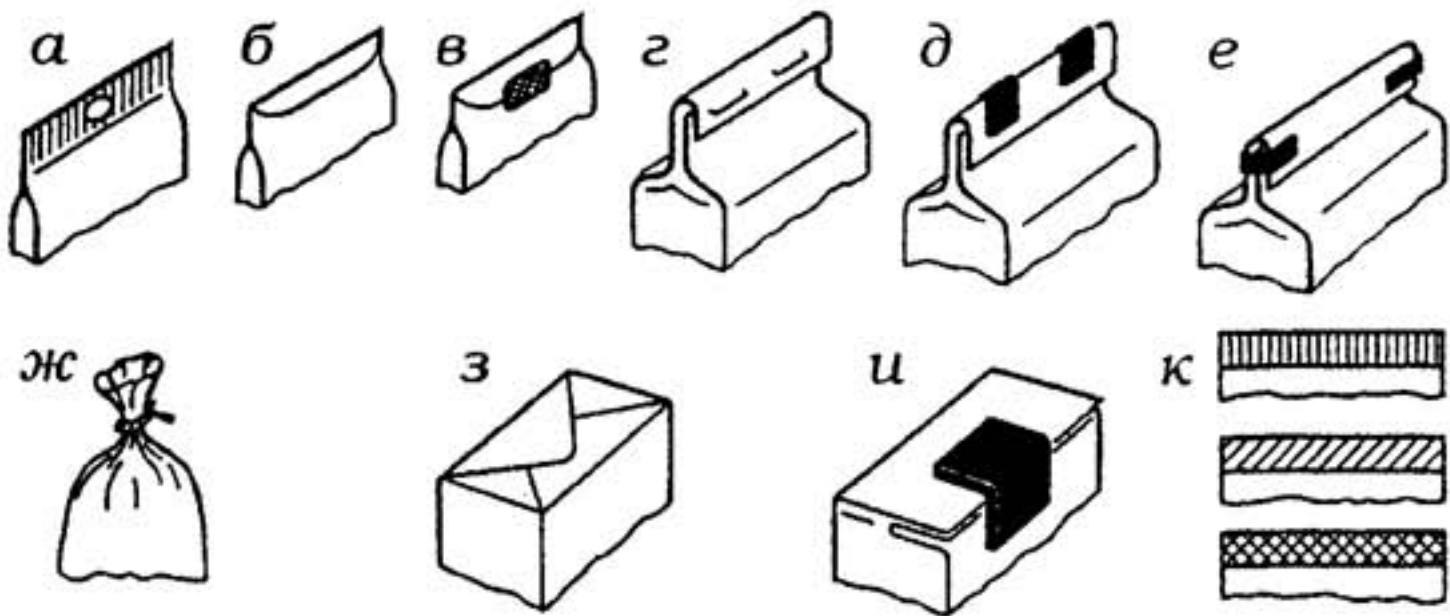


Рис. 5.8. Способы соединения горловины  
прямоугольных объемных пакетов с плоским дном:  
а — плоский сварной шов; б — складной клееный затвор;  
в — затвор, заклеенный этикеткой; г — затвор, прошитый скобами;  
д, е, ж — затворы, закрытые зажимами; з — затвор, заклеенный  
по типу конверта; и — укупоривание липкой лентой;  
к — рифленые сварные швы



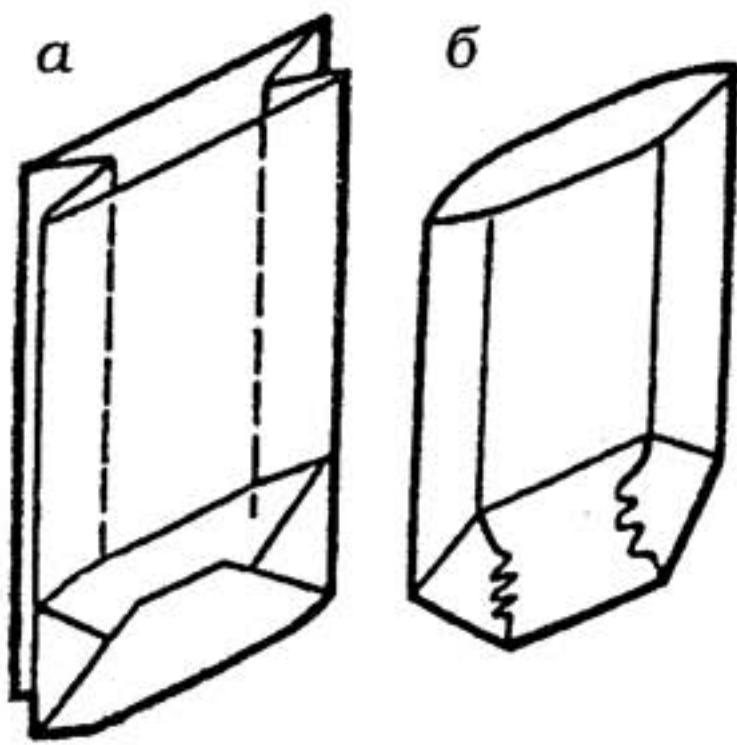


Рис. 5.9. Пакеты объемные:  
 а — с прямоугольным дном  
 и боковыми складками;  
 б — с шестиугольным дном

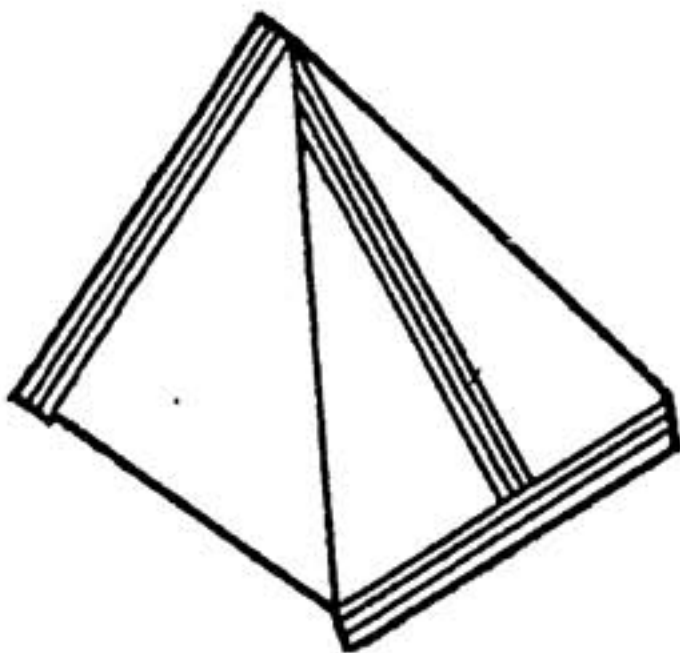


Рис. 5.10. Пакет  
 формы тетраэдра

формы тетраэдра (рис. 5.10). Их выполняют преимущественно из многослойных композиционных пленочных материалов. Герметичное соединение обеспечивают методом сварки.

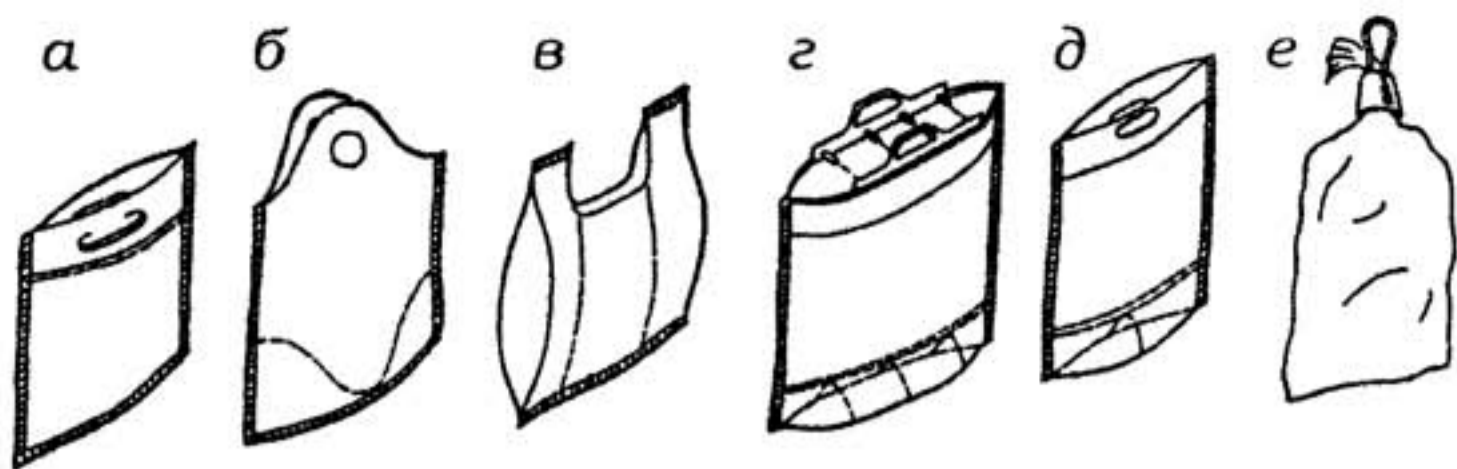
Разновидностью пакетов являются хозяйственные сумки. Их принципиальное конструктивное отличие от пакетов — наличие ручек. Различают ручки из того же материала, что и сумка: просеченные или сварные, а также упрочненные ручки из толстой одноименной с сумкой или другой пластмассы (рис. 5.11). Сумки изготавливают из прочных утолщенных, нередко армированных однослойных или многослойных полимерных пленок.

Отличительной особенностью производства мягкой потребительской тары является совмещение технологии ее получения с процессом упаковывания продукции. По принципам совмещения технологий различают прерывное и непрерывное производство упаковки.

**Прерывное производство** предусматривает выполнение различ-

ных технологических процессов (изготовление мягкой потребительской тары, упаковывание в нее продукции, герметизация упакованной продукции и укладывание ее в транспортную тару) на различных рабочих местах с использованием различных автоматов и полуавтоматов, реже — вручную.

При **непрерывном производстве** все технологические процессы получения упакованной продукции выполняются в автоматическом режиме на одном автомате. Подготовка к работе не-



**Рис. 5.11. Хозяйственные сумки:**

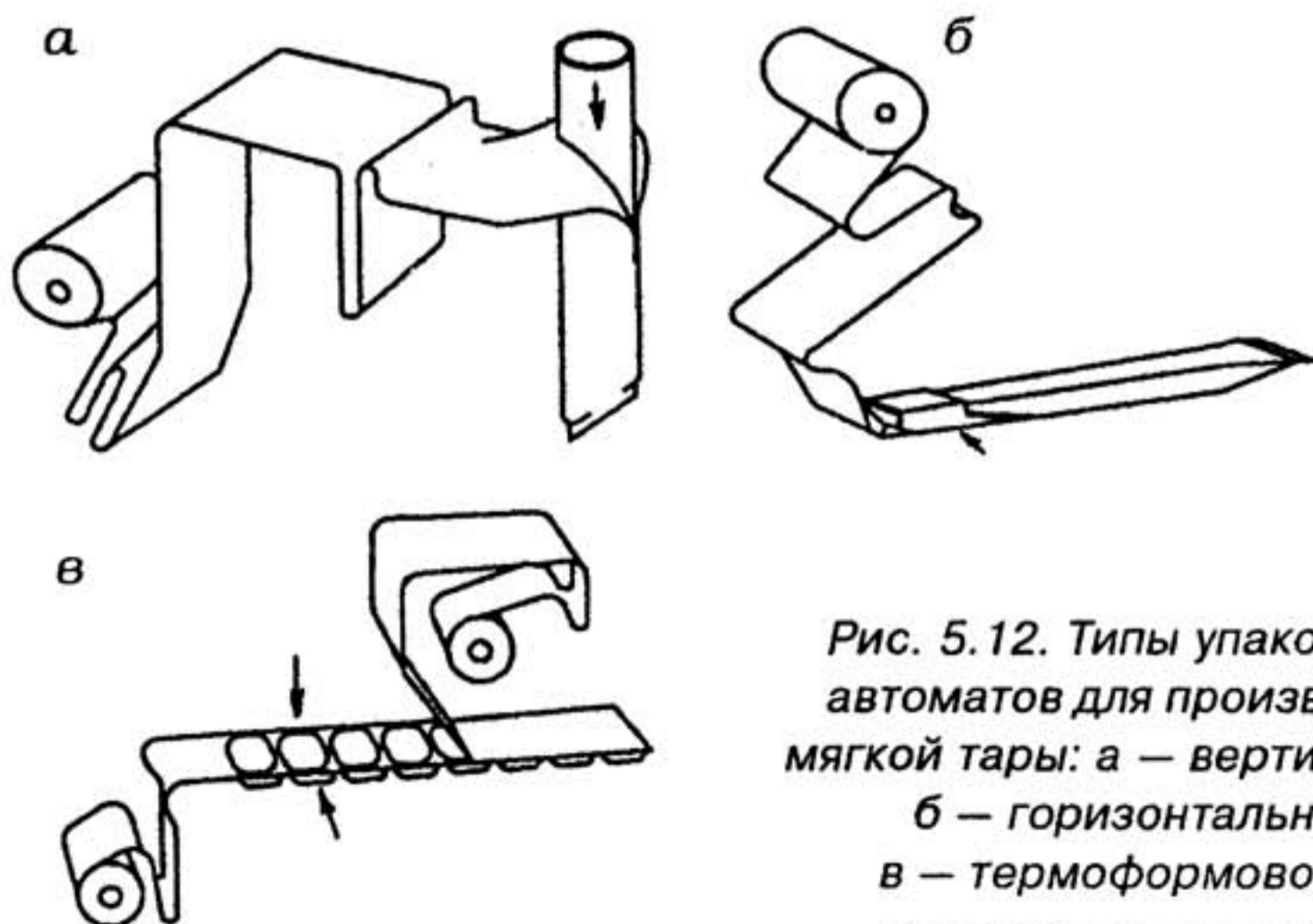
**а, б — плоские с просеченными ручками;**

**в — с боковыми складками и сварными ручками;**

**г, д — со складкой на дне и пластиковыми ручками; е — с зажимом**

прерывного производства заключается в установке на автомат рулона пленочного материала с последующей заправкой пленки в основные рабочие узлы, а также в заполнении питателя автомата упаковываемым продуктом. Затем автомат осуществляет в строго определенной технологической последовательности формование, сварку или склеивание мягкой тары, дозировку и фасовку в нее продукции, укладку ее в транспортную тару.

В зависимости от направления подачи в тару упаковываемой продукции различают три типа упаковочных автоматов: вертикальный, горизонтальный и термоформовочный (рис. 5.12).



**Рис. 5.12. Типы упаковочных автоматов для производства мягкой тары: а — вертикальный; б — горизонтальный; в — термоформовочный**

На **автоматах вертикального типа** упаковывают сухие сыпучие продукты, замороженные овощи, кофе и другие порошкообразные, пастообразные и жидкие вещества. Основными движущими силами процесса заполнения тары являются собственный вес продукции, избыточное давление либо вакуумирование. Получаемую тару из однослойных и многослойных полимерных материалов характеризуют самая высокая гибкость и минимальная жесткость, высокая герметичность и хорошие барьерные свойства. Технологическая схема позволяет реализовать благоприятные условия для сварки и для нанесения печати на внешнюю поверхность пленок.

**Автоматы горизонтального типа** предназначены главным образом для упаковывания крупной штучной продукции: хлебобулочных и кондитерских изделий, сыра, мяса, фруктов и т. п. Подача товаров в тару осуществляется различными транспортерами, пневматически, а иногда и вручную. Получаемую преимущественно многослойную упаковку отличают высокая гибкость, средняя жесткость, высокие барьерные свойства и герметичность. В таких автоматах хорошие условия для проведения процессов сварки и печати.

**Термоформовочные автоматы** позволяют упаковывать любые виды продукции всеми возможными методами ее подачи в отформованную часть тары. Нижняя термоформованная часть из однослойного или многослойного полимерного материала является жесткой или полужесткой. Верхняя крышка отличается гибкостью, минимальной жесткостью. Она выполнена, как правило, из многослойного материала, поэтому обладает хорошими барьерными свойствами, способностью к сварке или склеиванию, к различным видам печати.

Схема вертикального способа изготовления мягкой тары с одного рулона приведена на рис. 5.13, а. Пленка сматывается с рулона 1, разрезается пополам и через систему направляющих валиков подается к сварочным элементам 2, конструкция которых позволяет изготавливать одновременно вертикальные и поперечные сварные швы тары 4. Дозатор 3 осуществляет дозировку и вертикальную подачу продукции в тару.

В вертикальном способе изготовления мягкой тары с двух рулонов 1 (рис. 5.13, б) оба полотна пленки специальными транс-

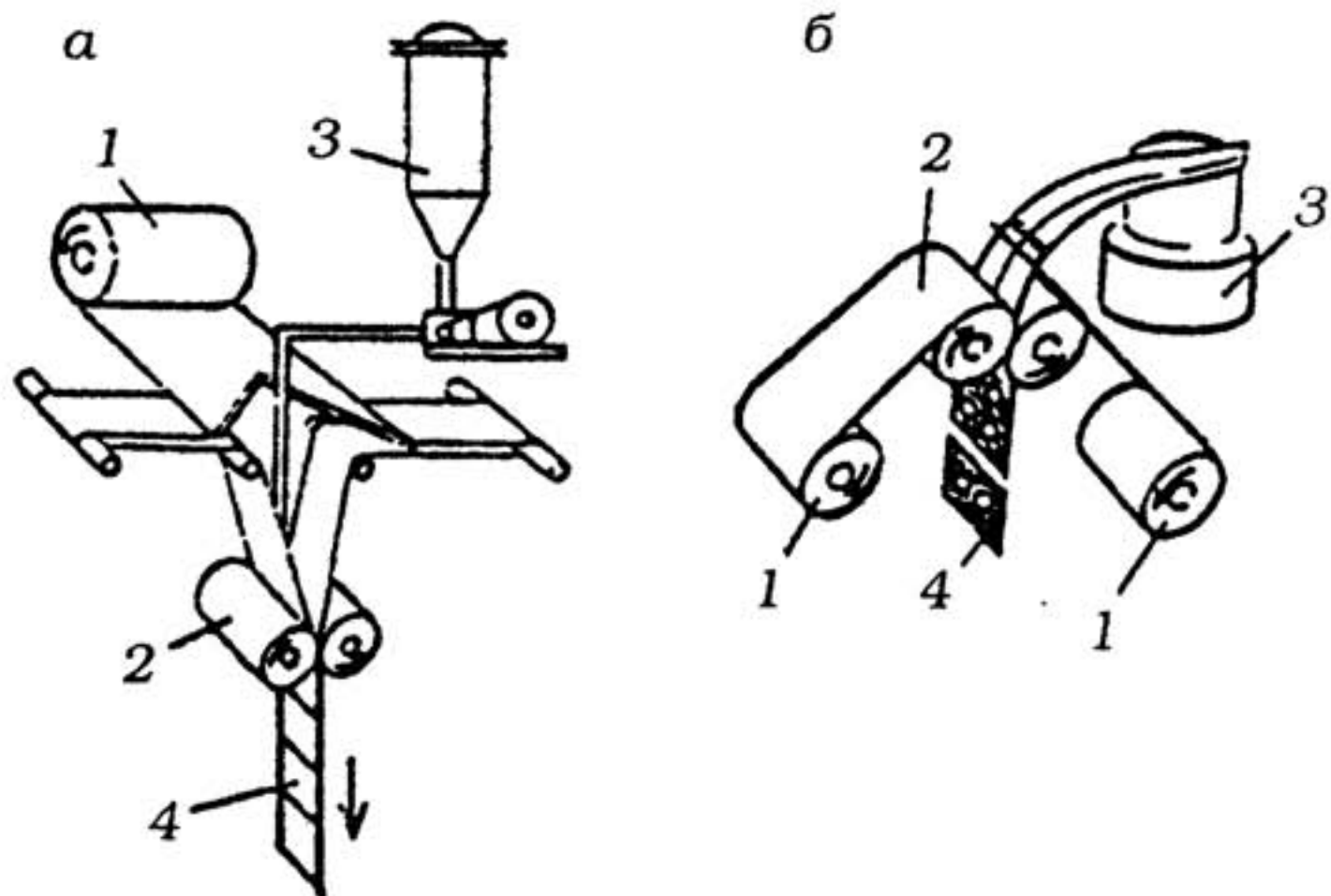


Рис. 5.13. Схема вертикального способа изготовления мягкой тары с одного (а) и с двух (б) рулонов:  
 1 — рулоны пленки; 2 — сварочные элементы;  
 3 — бункер с дозатором; 4 — упаковка

портирующими валиками подаются к узлу сварки 2. Одновременно из бункера с дозатором 3 поступает упаковываемая продукция. Цилиндрическое сварочное устройство 2 осуществляет сварку упаковки 4. Такой способ часто применяют для упаковки таблетированной продукции. В этом случае таблетки из бункера с дозатором 3 с помощью вибрационных лотков подаются в специальные углубления. Сварочные элементы 2, вращаясь, сваривают пленку вокруг таблеток, образуя упаковку 4.

Вертикальный способ изготовления мягкой тары с формирующим воротником изображен на рис. 5.14, а. Пленка с рулона 1 подается на формирующий воротник 5, где сворачивается в трубу вокруг цилиндрической питающей части бункера с дозатором 3. Края пленки свариваются внахлест или встык вертикальной парой электродов 2. После подачи дозированной продукции из бункера 3 упаковка сваривается горизонтальными электродами 2а. Для получения упаковки в виде тетраэдра 4 установка комплектуется второй парой го-

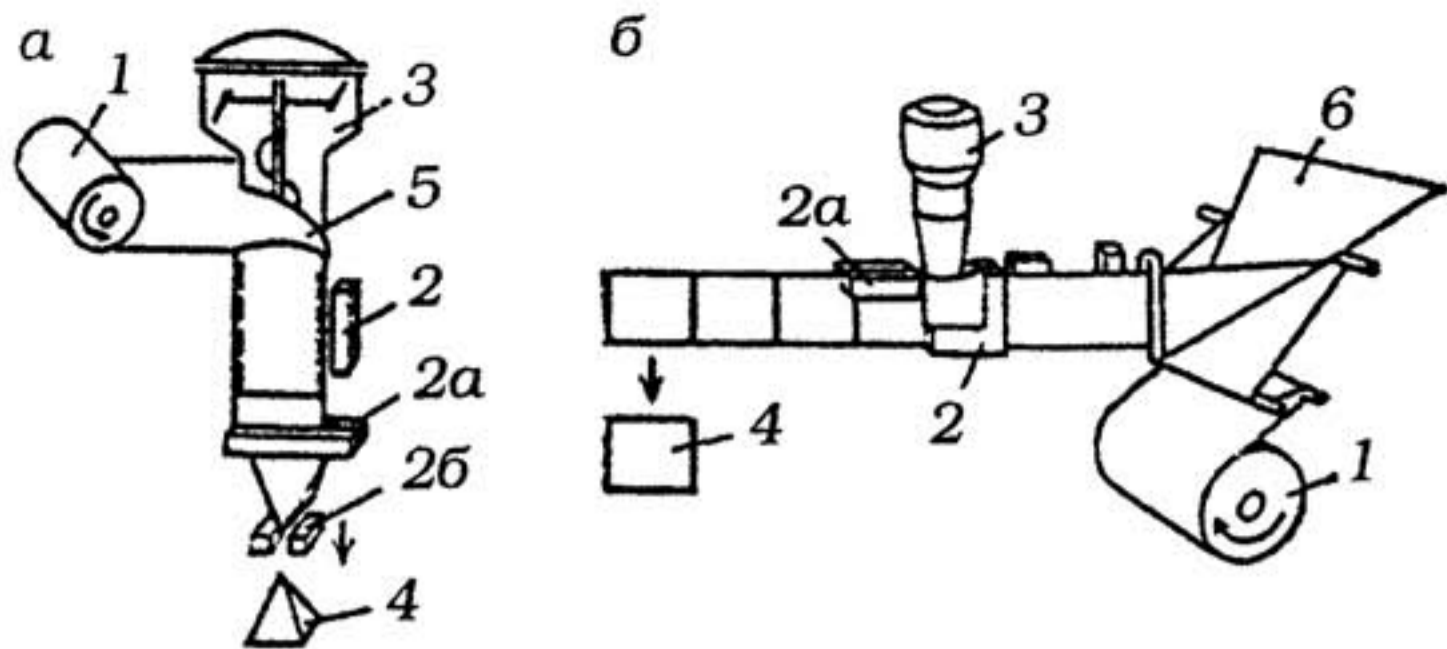


Рис. 5.14. Схема вертикального способа изготовления мягкой тары с формующим воротником (а) и с формующим треугольником (б): 1 — рулон пленки; 2 — сварочные элементы; 3 — бункер с дозатором; 4 — упаковка; 5 — формующий воротник; 6 — формующий треугольник

ризонтальных сварочных электродов 2б, плоскость сварки которых находится под углом  $90^\circ$  относительно первой пары электродов 2а.

В вертикальном способе с формующим треугольником пленка из рулона 1 (рис. 5.14, б) подается на формующий треугольник 5, где складывается пополам. Затем она сваривается вертикальными электродами 2. После этого специальными вакуумными присосками или другими устройствами пакет раскрывается и в него поступает продукция 3 из бункера с дозатором. Упакованная продукция 4 герметизируется сваркой на горизонтальных электродах 2а и отрезается.

Разновидностями горизонтального способа изготовления мягкой тары являются способы с формующим треугольником и роторный.

Схема горизонтального роторного способа приведена на рис. 5.15. Пленка с рулона 1 поступает на формующий треугольник 5 и складывается пополам. На термосварочном роторе 2 выполняются вертикальные сварочные швы. После этого при необходимости горизонтальными сварочными электродами 2а выполняются нижние швы. На укупорочном бараба-

не пакеты отрезают-ся вертикальными ножами 2б и захватной цепью подаются к бункерам с дозаторами 3, где осуществляется их заполнение продукцией. Упакованная продукция герметизируется сваркой верхними горизонтальными сварочными электродами 2в.

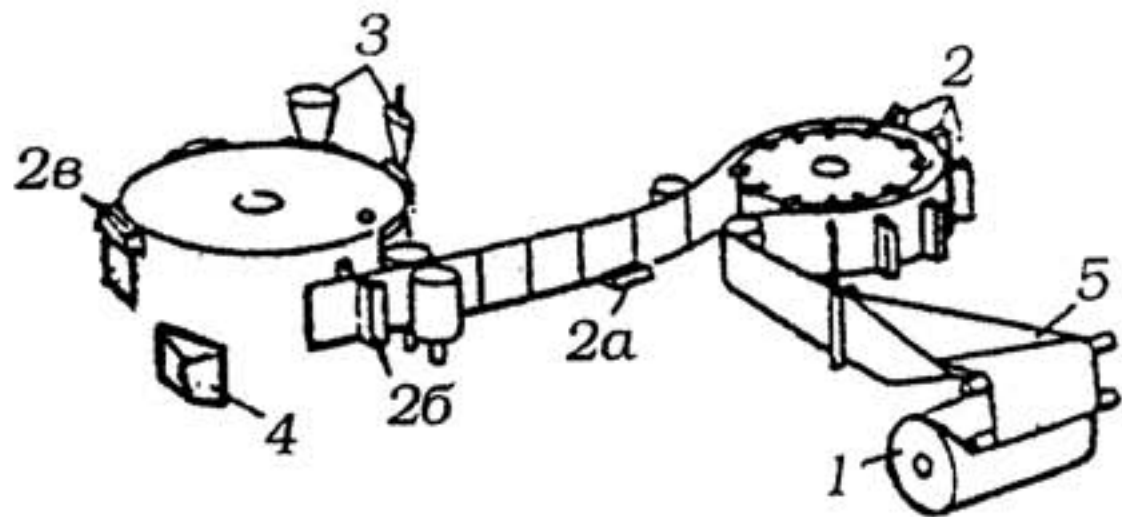


Рис. 5.15. Схема горизонтального роторного способа изготовления мягкой тары: 1 — рулон пленки; 2 — сварочный ротор; 2а — нижние горизонтальные сварочные электроды; 2в — верхние горизонтальные сварочные электроды; 3 — бункеры с дозаторами; 4 — упаковка; 5 — формирующий треугольник

В зависимости от схемы подачи пленки на упаковочных автоматах горизонтального типа различают способы изготовления мягкой тары с одного рулона и с двух рулонов.

Схема изготовления мягкой тары на упаковочном автомате горизонтального типа с одного рулона приведена на рис. 5.16. Пленка с рулона 1 поступает на узел горизонтальной подачи упаковываемого продукта 2. Затем края пленки заворачивают и со-

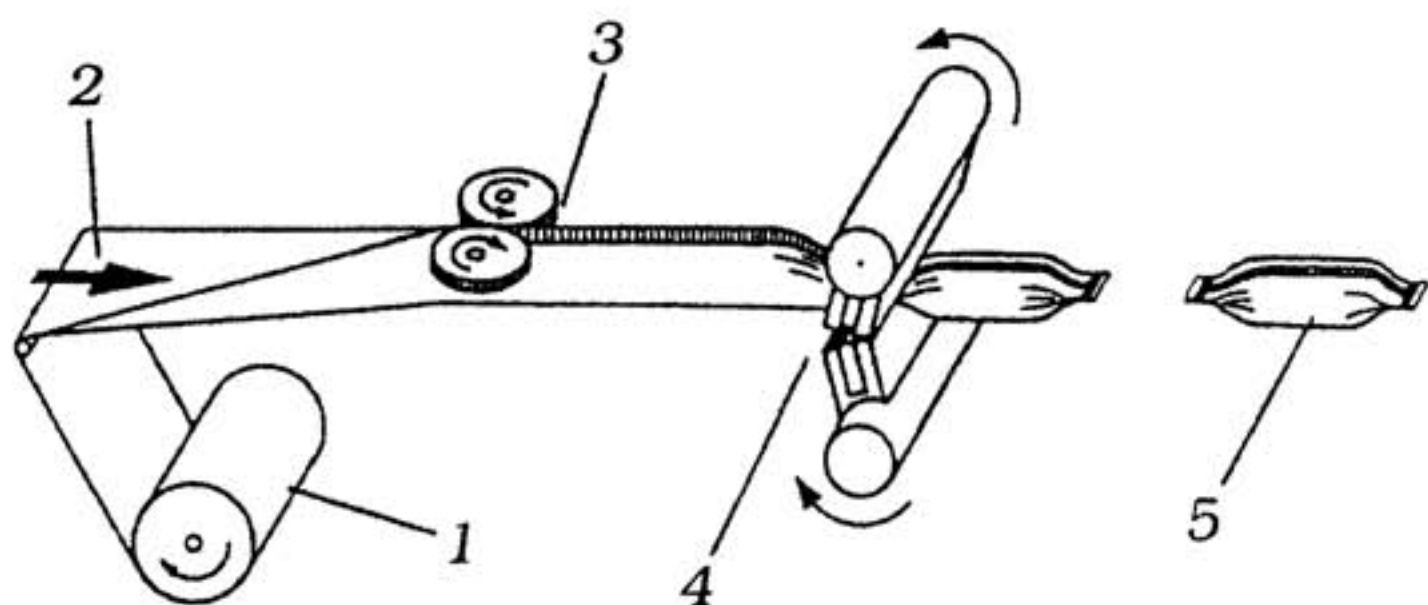
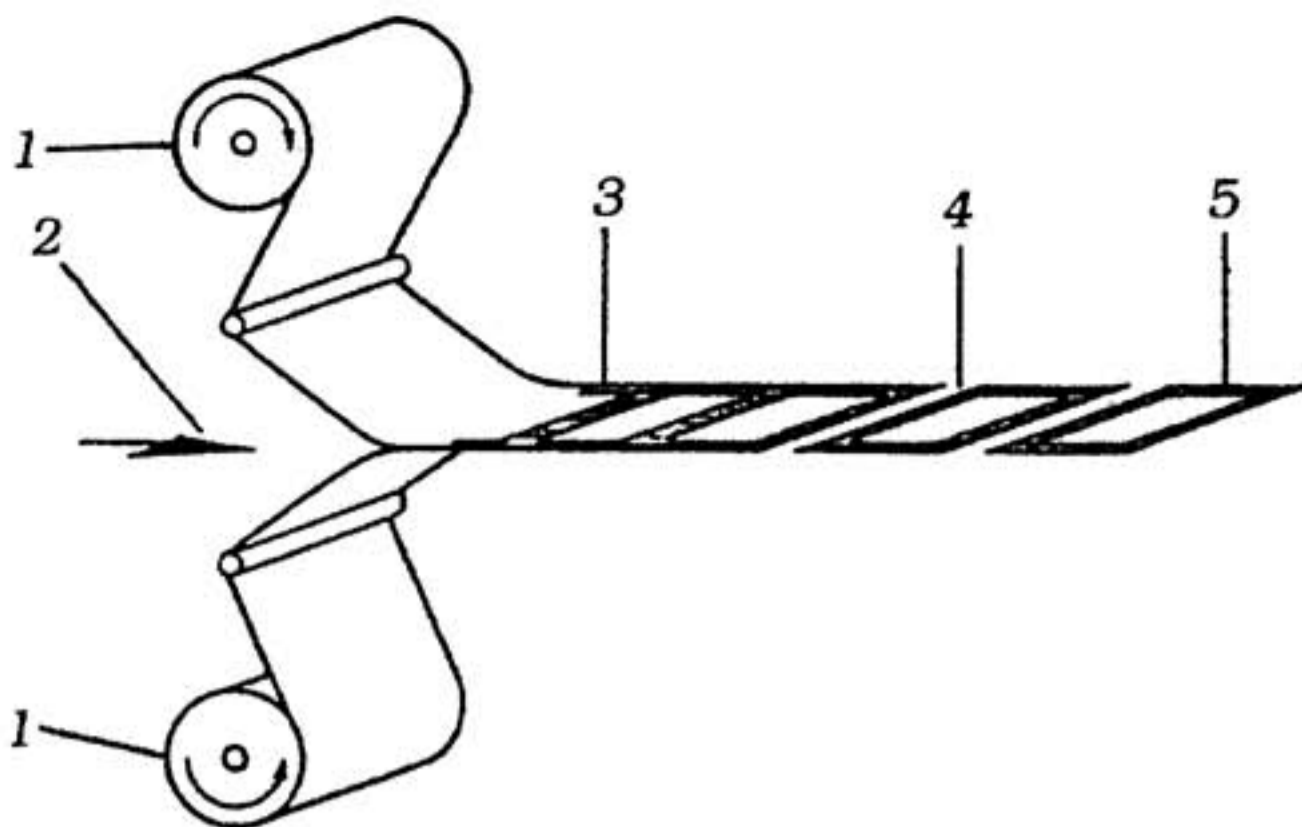


Рис. 5.16. Схема способа изготовления мягкой тары на упаковочном автомате горизонтального типа с одного рулона: 1 — рулон пленки; 2 — упаковываемый продукт; 3 — сварка продольного шва; 4 — сварка поперечного шва и отрезка; 5 — упаковка



*Рис. 5. 17. Схема способа изготовления мягкой тары на упаковочном автомате горизонтального типа с двух рулонов: 1 — рулоны пленки; 2 — упаковываемый продукт; 3 — сварка продольных и поперечных швов; 4 — отрезка; 5 — упаковка*

стыковывают посередине в узле сварки продольного шва 3, при этом упаковываемый продукт оказывается внутри. После этого осуществляют сварку поперечных швов 4 и отрезку упаковки 5.

В способе изготовления мягкой тары на упаковочном автомате горизонтального типа с двух рулонов 1 (рис. 5.17) упаковываемый продукт 2 подают между пленками. Сварку продольных и поперечных швов 3 обычно осуществляют одновременно с помощью сварочного устройства цилиндрической формы. После отрезки 4 получают упаковку 5.

Таким образом, важнейшими технологическими процессами изготовления мягкой тары являются печать, сварка, склеивание, дозирование продукции и отрезка.

## 5.2. Сварка мягкой тары

**Сваркой** называют способ создания неразъемного соединения элементов конструкции, при котором полностью исчезает граница раздела между соединяемыми поверхностями, превращаясь в размытый переходный слой.

Переходный слой при сварке линейных или разветвленных полимеров образуется в результате взаимной диффузии макромолекул контактирующих материалов, находящихся в вязкотекучем состоянии (диффузионная сварка), или в результате химической реакции присоединения, происходящей между звеньями молекул соединяемых поверхностей (химическая сварка).

**Диффузионную сварку** разделяют на тепловую, осуществляемую путем нагревания, и на сварку с помощью растворителя.

Процесс диффузии зависит от физического состояния полимеров. В твердом стеклообразном состоянии даже при длительном времени контакта и значительных усилиях сжатия сопрягаемых поверхностей взаимной диффузии макромолекул не происходит, материалы не соединяются. В высокоэластическом состоянии при температурах выше  $T_c$  возникает аутогезионное взаимодействие полимерных цепей, главным образом их окончаний и боковых ответвлений [44]. Граница раздела между сопрягаемыми поверхностями может не исчезать, а прочность такого аутогезионного взаимодействия незначительна. В вязкотекучем состоянии (или набухшем от растворителя) макромолекулы приобретают способность свободно перемещаться в пограничных слоях и диффундировать в такой же вязкотекучий материал. Степень и скорость диффузии определяются силой межмолекулярного взаимодействия, совмещаемостью полимеров и условиями протекания процесса. Граница раздела между поверхностями исчезает, а прочность аутогезионного соединения полимеров одинаковой природы приближается к когезионной прочности материалов. Таким образом, температура сварки должна быть выше  $T_{пл}$  для кристаллических полимеров или  $T_g$  аморфных полимеров, но ниже температур их деструкции. При кратковременной сварке продолжительностью 0,05–0,2 с температура может превышать температуру деструкции [16].

Другим условием осуществления процесса сварки является создание давления прижима, в результате которого поверхности сближаются на расстояние, при котором возникает межмолекулярное взаимодействие. В зоне сварки происходят процессы течения расплава полимера, обеспечивающие компенсацию неровностей и заполнение промежутков между соеди-



няемыми поверхностями. Реологические процессы подготавливают возможность протекания диффузии и образования качественного сварного шва. Величина давления прижима зависит от вязкости расплава полимера и температуры его размягчения. Чем выше вязкость расплава, тем больше давление прижима. Создаваемое при этом контактное давление оказывает существенное влияние на прочность сварных швов, особенно при пониженных температурах и небольшой продолжительности нагрева.

По вязкости расплавов соединяемые поверхности должны быть достаточно близкими. Материалы с различной вязкостью расплавов не могут образовать прочного соединения: более вязкий материал не диффундирует в менее вязкий, а выдавливает его из сварного шва [3]. Поэтому особое значение имеет равномерность разогрева соединяемых поверхностей.

Для обеспечения процесса диффузии прижим сопрягаемых поверхностей должен поддерживаться в течение некоторого времени. С увеличением продолжительности прижима прочность аутогезионного взаимодействия возрастает, стремясь к определенному пределу — когезионной прочности материала. Продолжительность процесса сварки  $\tau_{св}$  связана с температурой сварки  $T_{св}$  экспоненциальной зависимостью

$$\tau_{св} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{диф}}{RT_{св}}\right), \quad (5.1)$$

где  $\tau_0$  — константа, имеющая размерность времени;  $U_{диф}$  — энергия активации диффузии макромолекул;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Величина  $U_{диф}$  ПЭНП составляет 21 кДж/моль (5 ккал/моль), для ПВХ с различным содержанием пластификатора — от 38 до 51 кДж/моль (9–15 ккал/моль) [48, Т. 3].

Термическое воздействие на полимерный материал приводит к изменениям в его молекулярной и надмолекулярной структуре. Под действием повышенных температур при сварке протекают процессы деструкции, структурирования, окисления. При этом выделяются летучие продукты, в большинстве случаев являющиеся токсичными. Кроме того, в материале ин-

тенсивно развиваются релаксационные процессы, в результате которых ориентированные материалы разориентируются.

По поведению материала при сварке, объясняемому реологическими характеристиками, полимеры принято разделять на три группы [16, 17].

Первая группа — хорошо свариваемые термопласты. Их энергия активации вязкого течения не превышает 150 кДж/моль, температурный интервал вязкотекучего состояния составляет более 50°, вязкость расплава находится в интервале  $10^2$ – $10^5$  Па·с. К ним относятся прежде всего полиолефины, которые при нагреве легко переходят в вязкотекучее состояние. Существенное различие между  $T_T$  и температурой деструкции позволяет широко варьировать режимы сварки.

Вторая группа — сложно свариваемые материалы, для которых требуется подбор оптимальных способов и технологических приемов. Это термопласты с высокой энергией активации вязкого течения, с узким интервалом между  $T_T$  и температурой деструкции и с высокой вязкостью расплава — более  $10^5$  Па·с. При  $T_{пл}$  имеют место разориентация и уменьшение степени кристалличности полимеров в сварном шве и околошовной области, что приводит к существенному снижению прочности шва. К этой группе относятся ПВХ, ПК, двухосно-ориентированные пленки из ПЭТФ, ПП и ПА.

Третья группа — плохо свариваемые материалы. Их энергия активации вязкого течения превышает энергию активации разрыва химических связей, а вязкость расплава очень велика — более  $10^{11}$ – $10^{12}$  Па·с. Процесс сварки требует длительного контакта соединяемых поверхностей при максимальных давлениях, соответствующих пределу вынужденной эластичности. Примером такого материала является фторопласт-4.

### *5.2.1. Основные методы сварки*

В основу классификации методов сварки положены источники и методы нагрева материала в сварочной зоне [3, 16, 40]. В зависимости от источников нагрева способы сварки разделяют на две основные группы (табл. 5.1).

## Способы сварки пластмасс

Источник нагрева	Метод нагрева		Способ сварки
Внешний источник нагрева	Нагрев газом	С присадочным материалом	Газовая сварка
		Без присадочного материала	
	Нагретым инструментом	Контактно-тепловая сварка	
Нагретым присадочным материалом			
Преобразование энергии	Инфракрасное излучение Токи высокой частоты Ультразвуковые колебания Трение		Сварка в ТВЧ Ультразвуковая сварка Сварка трением

К первой группе относятся способы сварки, в которых используется энергия внешних источников тепла. Это способы газовой сварки с присадочным материалом и без него, когда нагрев осуществляется горячим газом. Сюда относятся и контактно-тепловая сварка, в которой тепло к соединяемым поверхностям передается путем непосредственного контакта с нагретым инструментом. В эту группу входит и сварка за счет тепла от нагретого присадочного материала.

Ко второй группе относятся способы сварки, в которых теплота генерируется внутри соединяемых материалов в результате преобразования различных видов энергии. Может использоваться энергия инфракрасного излучения, токов высокой частоты, ультразвуковых колебаний, трения.

Особую группу составляют специальные способы сварки — с применением флюса, ядерная, химическая, лазерная.

Из первой группы в производстве мягкой тары наибольшее применение нашел способ контактно-тепловой сварки.

Широко распространена и классификация методов сварки пластмасс по виду энергии, подводимой к свариваемым деталям [33]. Практически все известные в настоящее время процессы сварки термопластов осуществляются за счет подвода одного из трех видов энергии: тепловой, механической и электромагнитной (рис. 5.18).



Рис. 5.18. Классификация способов сварки термопластов

В свою очередь, способы сварки с подводом тепловой энергии разделяют на термические и термомеханические.

К термическим относят виды сварки, при которых статическое давление не играет существенной роли в образовании сварного соединения. Качество сварного соединения в этом случае определяется исключительно количеством подводимой тепловой энергии. Примером служат сварка газовым теплоносителем и сварка экструдированной присадкой.

К термомеханическим относят виды сварки, при которых неразъемное соединение образуется вследствие подвода тепловой энергии и приложения статического давления. При термомеханических видах сварки тепловая энергия может подводиться к границе раздела свариваемых поверхностей за счет теплопроводности свариваемых деталей (контактно-тепловая сварка проплавлением) либо за счет теплопередачи от источника теплоты к свариваемым поверхностям (контактно-тепловая сварка оплавлением). При механических видах сварки тепловая энергия генерируется внутри свариваемых деталей

за счет превращения подведенной механической энергии в тепловую. Подведенная механическая энергия может быть следующих видов:

энергия упругих колебаний (ультразвуковая сварка);

энергия трения или вибротрения (сварка трением).

При подводе электромагнитной энергии к свариваемым деталям тепловая энергия также генерируется в них либо за счет способности звеньев макромолекул полимеров поляризоваться при наложении внешнего электрического поля (сварка токами высокой частоты), либо за счет поглощения энергии электромагнитных колебаний (сварка инфракрасным излучением, сварка лазером).

### 5.2.1.1. Контактно-тепловая сварка

Контактно-тепловую сварку нагретым инструментом осуществляют с односторонним или с двусторонним нагревом (рис. 5.19). Учитывая, что при сварке мягкой тары толщина материала

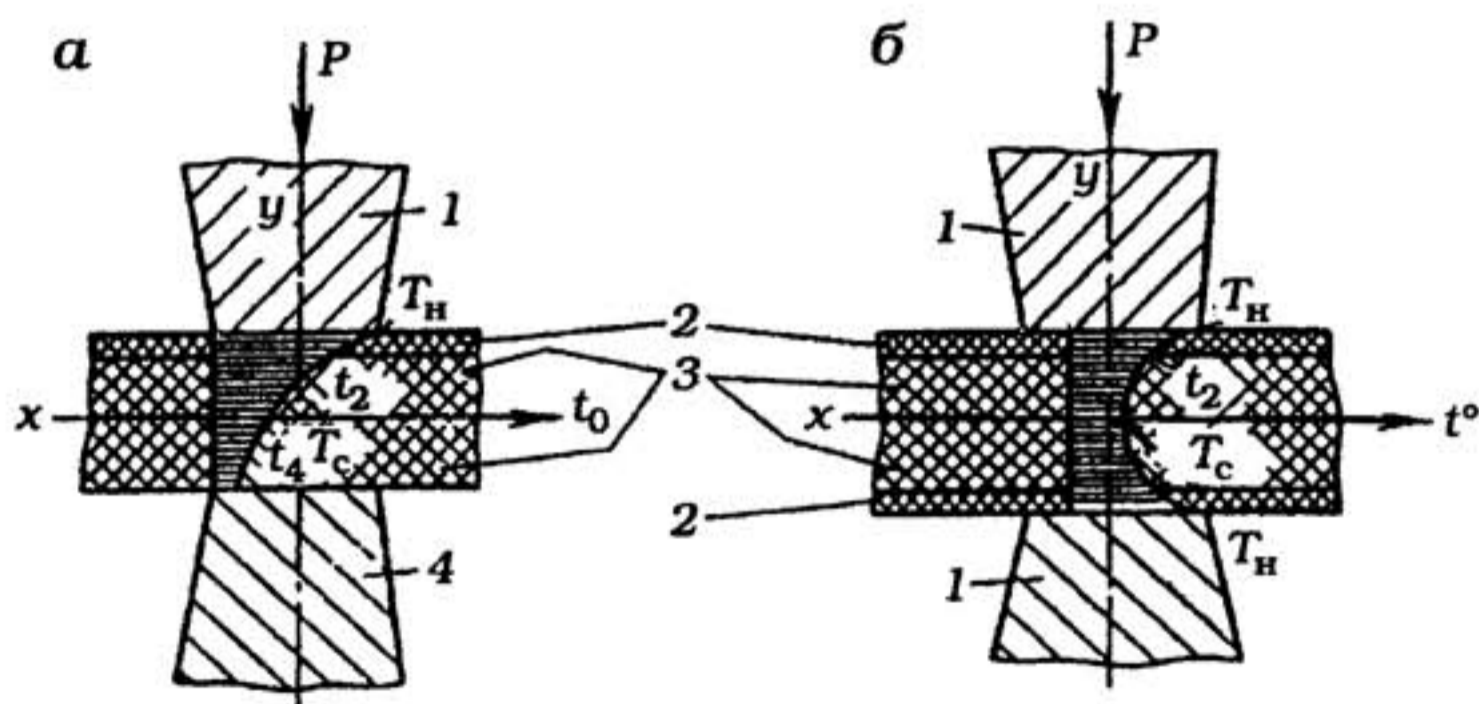


Рис. 5.19. Схема контактно-тепловой сварки с односторонним (а) и двусторонним (б) нагревом: 1 — нагретый инструмент; 2 — прокладки; 3 — свариваемые материалы; 4 — холодный инструмент;  $T_H$  — температура нагретого инструмента;  $t_2$  — температура внешней поверхности изделия;  $T_C$  — температура свариваемых поверхностей;  $t_4$  — температура холодного инструмента

ла значительно меньше ширины и длины шва, можно считать тепловой поток от нагревателя  $I$  направленным в одну сторону вдоль оси  $y$ . Тогда все плоскости, параллельные плоскости шва и рабочей плоскости нагревателя, будут изотермическими поверхностями. Температура этих поверхностей является функцией расстояния от нагревателя  $y$ , зависящей от времени  $t$ .

Решение задачи определения температур изотермических поверхностей должно удовлетворять основному уравнению теплопроводности Фурье для одномерного теплового потока и некоторым условиям, характеризующим эту задачу [40]:

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dy^2}, \quad (5.2)$$

где  $T$  — температура, К;  $t$  — время;  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $y$  — расстояние от верхней поверхности пленки, находящейся в контакте с нагревателем, м.

Время, необходимое для достижения какой-либо заданной температуры при нестационарных тепловых процессах, обратно пропорционально температуропроводности материала. Коэффициент температуропроводности  $a$  зависит от удельной теплоемкости  $c$ , плотности  $\rho$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda$ :

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (5.3)$$

Чем больше коэффициент температуропроводности, тем меньше разность температур в различных местах внутри материала при одинаковых внешних условиях его нагревания.

Теплофизические свойства термопластичных полимеров, необходимые для расчета их коэффициента температуропроводности, приведены в табл. 5.2.

При заданном начальном распределении температуры в материале, известных условиях теплообмена на его границах, а также при условии, что теплофизические свойства материала в процессе сварки остаются постоянными, можно рассчитать процесс распространения тепла. Решая уравнение (5.2), получаем выражение

## Теплофизические свойства термопластичных полимеров

Термопластичный полимер	Температура текучести $T_T$ , °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·град)	Удельная теплоемкость $c_p$ , кДж/(кг·град)	Коэффициент линейного термического расширения $\alpha$ , $10^{-4}$
ПЭНП	110	$29,2 \cdot 10^{-2}$	2,10–3,84	2,2 (от 0 до 50 °С)
ПЭВП	140	$40,0 \cdot 10^{-2}$	2,10–3,84	5,2 (от 50 до 100 °С)
ПП	170	$13,8 \cdot 10^{-2}$	1,92	1,4–2,0
ПС	150	$12,5 \cdot 10^{-2}$	—	0,6
ПММА	160–180	$16,7 \cdot 10^{-2}$	1,50	1,2
ПВХ	180	$16,7 \cdot 10^{-2}$	1,17	1,0
ПА	225–260	$25,1 \cdot 10^{-2}$	1,67	1,1
ПУ	190	$31,4 \cdot 10^{-2}$	—	1,4
ПЭТФ	280	$13,8 \cdot 10^{-2}$	1,04	—
ФП-4	>360	$25,1 \cdot 10^{-2}$	1,04	1,8
ФП-3	>270	$5,8 \cdot 10^{-2}$	0,92	—

$$\frac{T_H - T_c}{T_H - T_0} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-y\mu}^0 e^{-\beta^2} d\beta, \quad (5.4)$$

где  $T_H$  — температура нагревателя;  $T_0$  — начальная температура материала;  $T_c$  — температура в искомой точке толщины материала с координатой  $y$ .

Правая часть выражения (5.4) представляет собой интеграл вероятности

$$\Phi(y\mu) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-y\mu}^0 e^{-\beta^2} d\beta. \quad (5.5)$$

Его числовое значение может быть найдено из таблиц теплофизических справочников.

Из-за низкой теплопроводности термопластов температура по толщине свариваемых деталей распределяется неравно-

мерно. На поверхности материала температура выше, чем в зоне сварки. Для достаточного разогрева зоны сварки температура нагревательных элементов должна быть выше температуры сварки. Скорость разогрева зависит от температуры инструмента, теплофизических свойств и толщины свариваемого материала.

Значительно улучшает условия сварки двусторонний нагрев материала (рис. 5.19, б). Он позволяет уменьшить время разогрева и понизить температуру инструмента.

Основное уравнение теплопроводности (5.2) при двустороннем нагреве принимает вид

$$\frac{T_H - T_C}{T_H - T_0} = \frac{4}{\pi} \left( e^{-\frac{\pi at}{\delta^2}} - \frac{1}{3} e^{-\frac{9\pi at}{\delta^2}} + \frac{1}{5} e^{-\frac{25\pi at}{\delta^2}} - \dots \right), \quad (5.6)$$

где  $t$  — продолжительность нагрева, с;  $\delta$  — суммарная толщина материала в зоне сварки, м.

Числовое значение ряда в правой части уравнения (5.6) можно определить по справочникам.

Способы получения сварных соединений разделяют на непрерывные и периодические.

При **непрерывной контактно-тепловой сварке** скорость перемещения материала относительно инструмента  $v$  определяется продолжительностью разогрева зоны сварки до требуемой температуры  $t$ :

$$v = \frac{l}{t}, \quad (5.7)$$

где  $l$  — рабочая длина нагревателя.

В процессе непрерывной сварки температура по длине нагревателя распределяется неравномерно. Передняя его часть, постоянно вступающая в контакт с холодным материалом, имеет более низкую температуру. Поэтому для нагрева свариваемого материала требуется больше времени, чем при шаговой сварке нагревателем, имеющим такую же, но равномерно распределенную температуру.



По конструктивному исполнению сварочного узла непрерывную контактно-тепловую сварку подразделяют на роликую и ленточную. При роликковой сварке соединяемый материал пропускают через пару вращающихся нагретых роликов, один из которых прижимается с усилием, обеспечивающим требуемое контактное давление сварки (рис. 5.20). Ширина получаемого сварного шва задается шириной рабочей части роликов. Рабочая поверхность роликов может быть гладкой или рифленой с различным профилем. Ролики могут быть достаточно широкими в виде валиков, с углублениями различной конфигурации под упаковываемый штучный материал.

Ленточная сварка позволяет производить охлаждение свариваемого шва перед снятием давления. Схема ленточной сварки приведена на рис. 5.21. Зона сварки расположена между двумя парами соосно установленных вращающихся валов, на которые надеты две непрерывные кольцевые металлические ленты 2. Между ними подается свариваемый материал 1. Сварка осуществляется между нагревательными губками 3, передающими через ленту определенное давление сварки. Затем между охлаждающими губками 4 под давлением происходит охлаждение сварного шва.

**Периодическая контактно-тепловая сварка** включает операции подачи соединяемых материалов в зону сварки, прижим нагретым инструментом, нагрев, выдержку, охлаждение, отвод инструмента, удаление сваренных материалов.

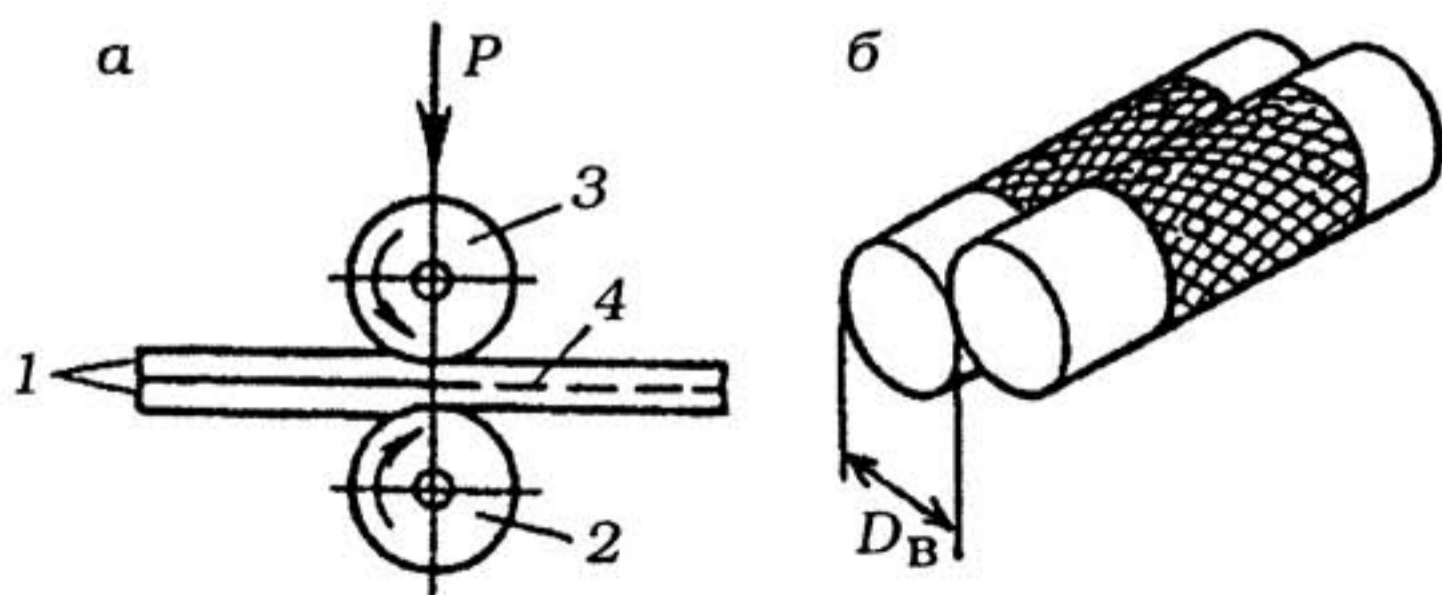


Рис. 5.20. Схемы роликковой контактно-тепловой сварки (а) и валков (б): 1 — свариваемый материал; 2 — нагретый ролик; 3 — прижимный ролик; 4 — сварной шов

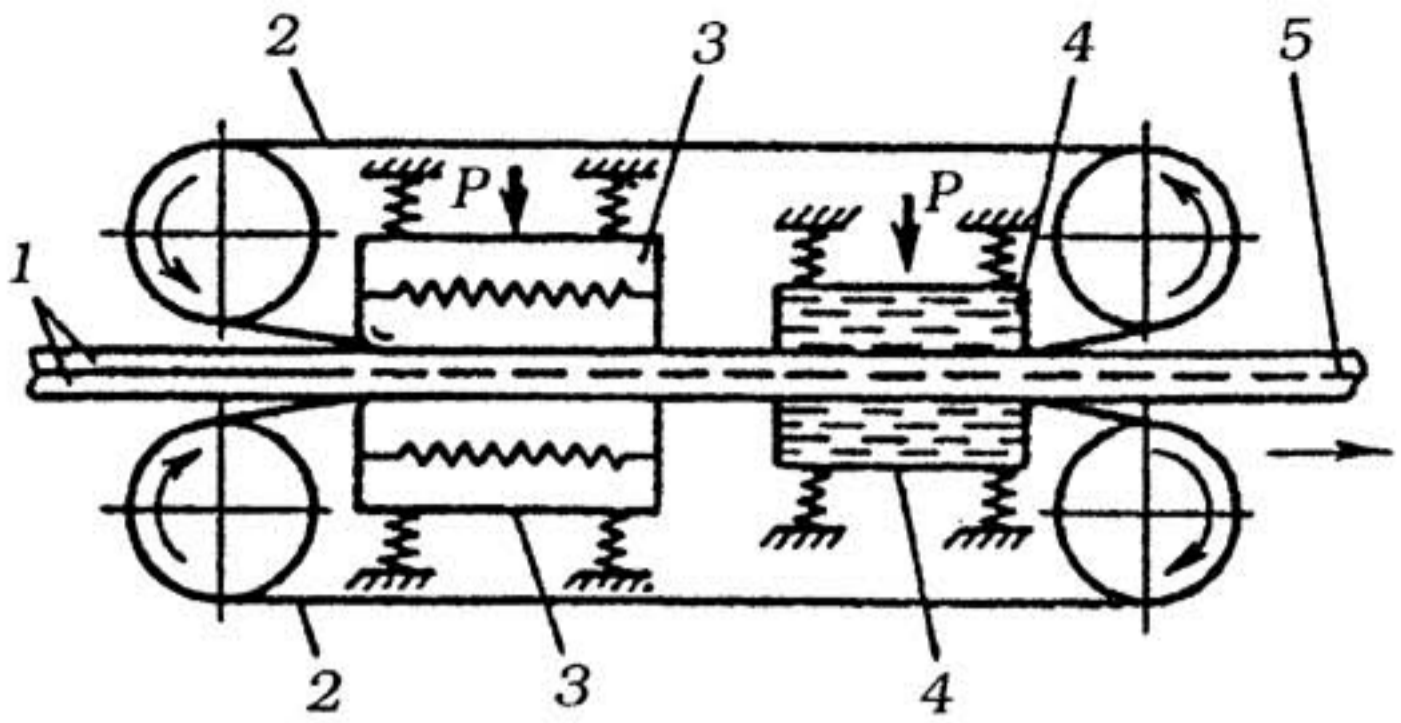


Рис. 5.21. Схема ленточной двусторонней контактно-тепловой сварки: 1 — свариваемый материал; 2 — стальная лента; 3 — нагревательные губки; 4 — охлаждающие губки; 5 — сварной шов

Период рабочего цикла машины  $T_{\text{ц}}$ , осуществляющей периодическую сварку, составляет

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{св}} + t_{\text{х}}, \quad (5.8)$$

где  $t_{\text{св}}$  — время, затраченное на сварку;  $t_{\text{х}}$  — время, затраченное на холостые ходы в течение периода рабочего цикла.

Время, затраченное непосредственно на сварку, включает время нагрева  $t_{\text{н}}$ , время выдержки  $t_{\text{в}}$  и время охлаждения  $t_{\text{охл}}$ :

$$t_{\text{св}} = t_{\text{н}} + t_{\text{в}} + t_{\text{охл}}. \quad (5.9)$$

Время, затраченное на холостые ходы, содержит время подачи материала в зону сварки  $t_{\text{п}}$ , время прижима  $t_{\text{пр}}$  и время отвода горячего инструмента  $t_{\text{от}}$ , время удаления сваренных материалов  $t_{\text{у}}$ :

$$t_{\text{х}} = t_{\text{п}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{от}} + t_{\text{у}}. \quad (5.10)$$

Оценить степень совершенства технологии позволяют соотношения технологической производительности  $k$  и цикловой производительности  $Q_{\text{ц}}$ :

$$k = \frac{1}{t_{\text{св}}}; \quad Q_{\text{ц}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{1}{t_{\text{св}} + t_{\text{х}}} = \eta k, \quad (5.11)$$

где  $\eta$  — коэффициент производительности,

$$\eta = \frac{t_{\text{св}}}{T} = \frac{1}{kt_{\text{х}} + 1}. \quad (5.12)$$

Очевидно, что  $0 < \eta \leq 1$ , причем  $\eta = 1$  при отсутствии холостых ходов, т. е. при предельном совершенстве технологии и машины.

Сварочным инструментом для получения прямолинейных швов обычно являются бруски из нержавеющей стали с тщательно полированной поверхностью. Их толщина равна ширине сварочного шва. Они нагреваются чаще всего электрическим устройством.

Для получения швов различной конфигурации используют плоский сварочный инструмент в виде плит (рис. 5.22) с выступающим профилем шириной  $b$ , равной ширине сварочного шва. Профиль может иметь гладкую или рифленую рабочую поверхность.

Для уменьшения нагрева материала в околошовной зоне, значительно понижающего прочность сварочного соединения, ширину инструмента увеличивают и снабжают его специаль-

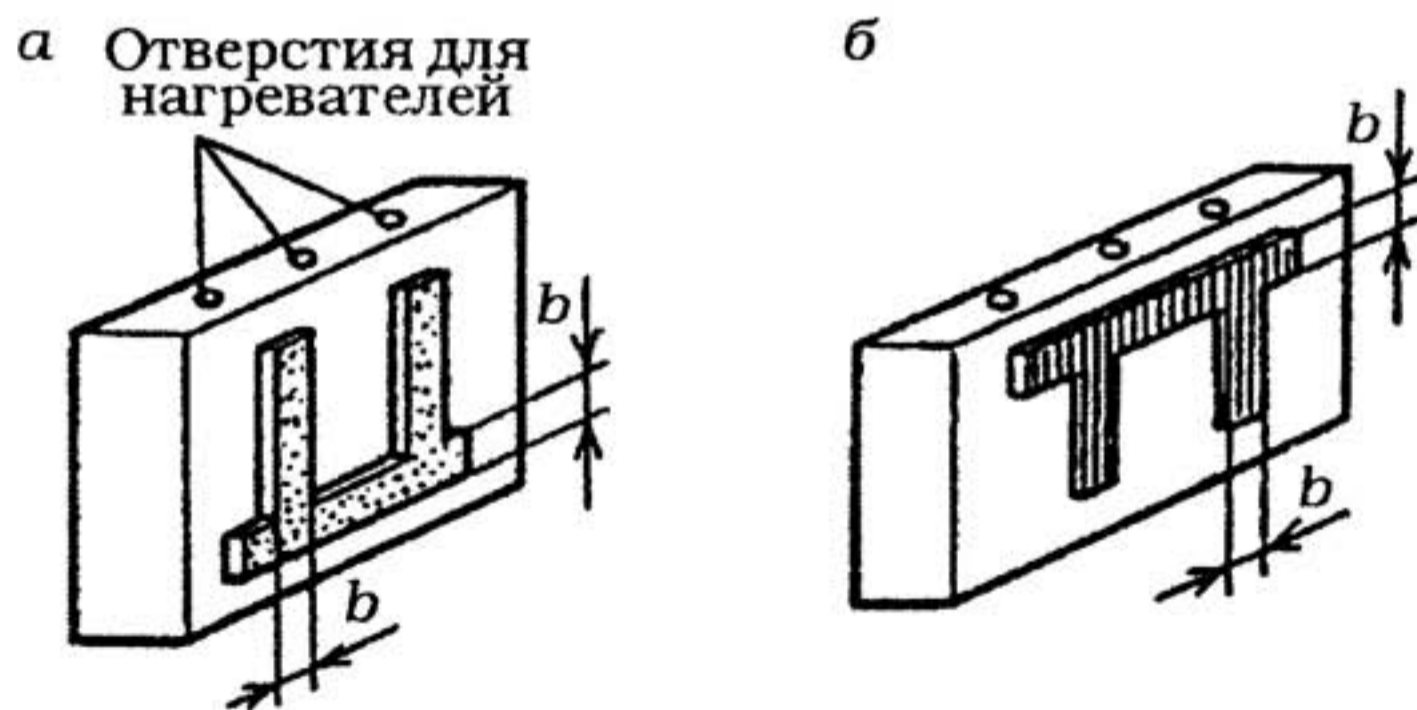


Рис. 5.22. Плоские плиты для контактно-тепловой сварки с гладкой (а) и рифленой (б) поверхностями сварочного шва

ными охлаждающими элементами или изоляционными пластинками (рис. 5.23).

С целью исключения прилипания свариваемого материала к нагревателю, сварку часто осуществляют через разделительные прокладки. Их обычно изготавливают из фторопласта-4, армированной стеклянкой тканью, а также из полиэтилентерефталата, целлофана, кремнийорганической резины. Вместо разделительных прокладок можно наносить на рабочие поверхности нагревателя тонкий слой антиадгезионного состава на силиконовой основе. Однако этот слой необходимо часто восстанавливать, поскольку после каждого цикла сварки небольшое количество антиадгезионного состава переходит в сварной шов.

Выбор технологических параметров сварки (температуры, давления и продолжительности) зависит в первую очередь от типа свариваемого материала, его толщины, а также от типа и конструктивных особенностей сварочного инструмента.

Мягкая тара изготавливается преимущественно из полимерных однослойных или многослойных материалов. Особен-

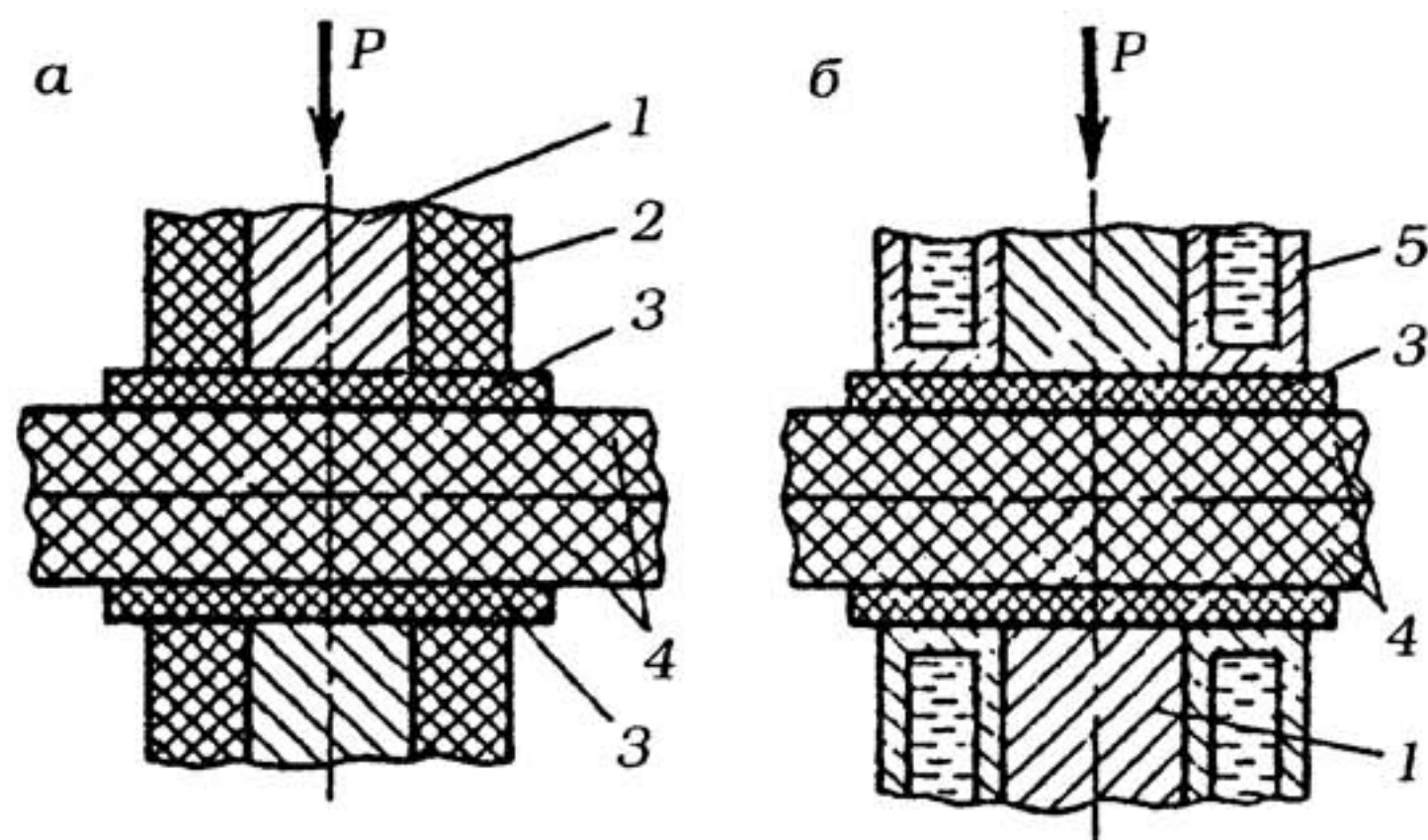


Рис. 5.23. Схема контактно-тепловой сварки с теплоизолирующим (а) и охлаждающим (б) инструментами:  
1 — нагреватель; 2 — теплоизоляционная пластинка;  
3 — разделительная прокладка; 4 — свариваемый материал; 5 — охлаждаемый элемент

ностью сварки тонких пленок является возможность их быстрого прогрева. Поэтому инструмент при контактно-тепловой сварке можно нагревать до температур начала деструкции материала. Однако это не сказывается на качестве сварки, поскольку скорость деструкции ниже скорости сварки при малых толщинах пленок.

Сварку пленок толщиной до 100–150 мкм можно проводить с односторонним нагревом. Более толстые пленки следует сваривать с двусторонним нагревом. С увеличением толщины пленок возрастает температура нагревательного элемента, но до известного предела, поскольку одновременно возрастает и время прогрева материала, что может привести к его деструкции (табл. 5.3) [40].

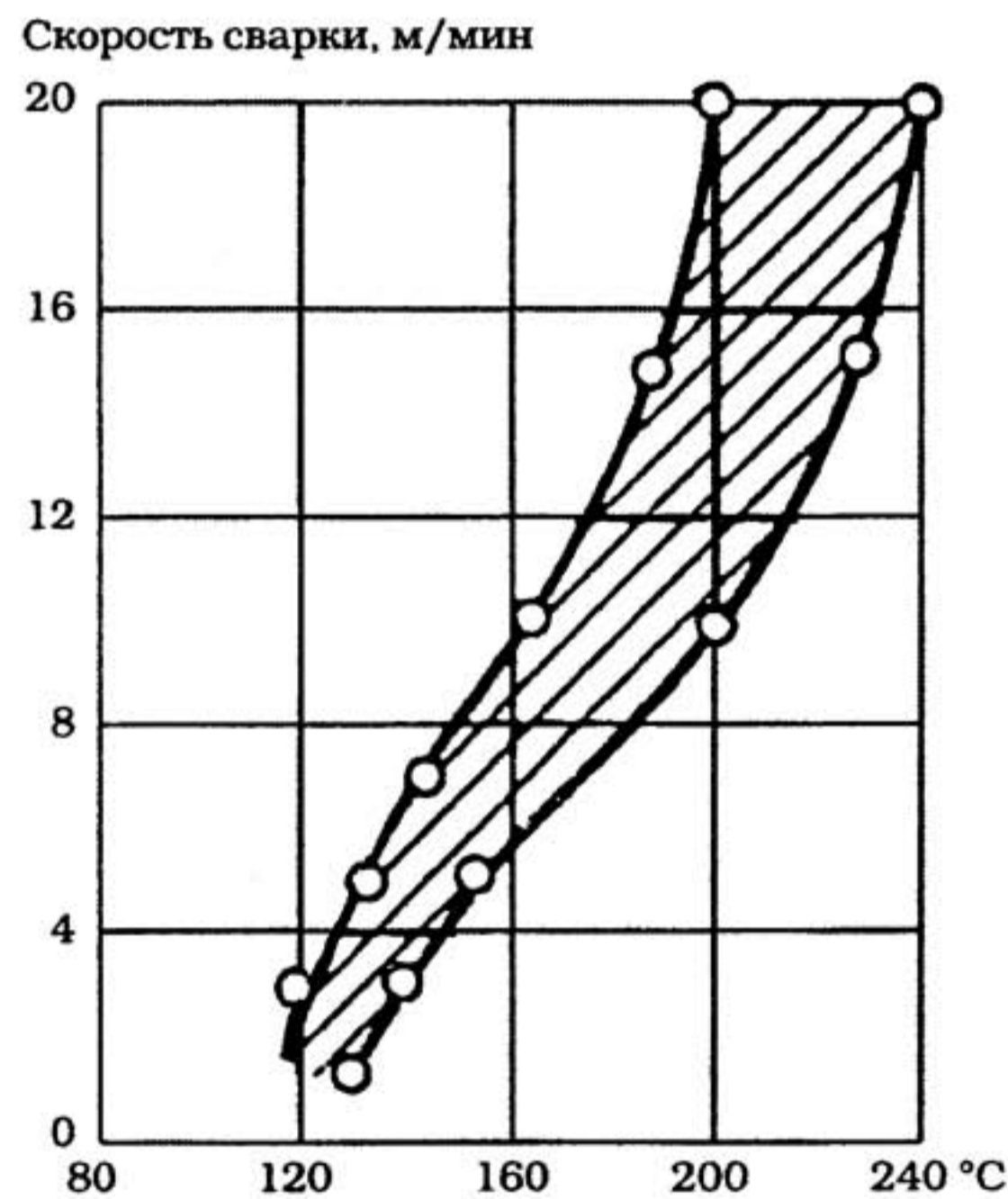


Рис. 5.24. Зависимость скорости контактно-тепловой сварки пленок ПЭ толщиной 60 мкм от температуры нагрева ролика (усилие прижима ролика 40 Н, ширина шва 4 мм)

Скорость контактно-тепловой сварки возрастает с повышением температуры нагревательных элементов. На рис. 5.24 показана зависимость скорости роликовой сварки полиэтиленовой пленки от температуры нагревающего ролика. Заштрихованная область на графике соответствует оптимальным значениям температур и скоростей сварки, при которых получают качественные сварные соединения.

Прочность получаемых сварных соединений пленок при испытании на расслаивание составляет в среднем 60–70% от прочнос-

### Режимы контактно-тепловой сварки пленок на машине МСП-1

Материал	Толщина пленки, мкм	Температура нагревательного инструмента, °С	Давление на свариваемый материал, МН/м <sup>2</sup>	Скорость сварки, м/мин
Полиэтилен, полипропилен	30	160–180	0,05–0,20	10–15
	45	190–200	— " —	8–12
	60	210–220	— " —	8–12
	100	220–250	— " —	6–8
Фторлон	110	260	0,15–0,25	1–2

ти основного материала. Одной из причин понижения прочности шва является перегрев зоны материала, непосредственно соприкасающейся с нагретым инструментом. В результате термодеструкции прочность материала в этой зоне значительно уменьшается. Кроме того, перегрев приводит к повышенной деформации материала при его сдавливании сварочным инструментом. Возникающие наплывы являются концентраторами напряжений, снижающими прочность. При сварке ориентированных пленок основной причиной снижения прочности сварного шва является дезориентация полимера в зоне нагрева.

В результате определения температуры поверхности полиэтиленовых пленок, контактирующей с нагревательным сварочным инструментом, установлено, что за время сварки успевает прогреться лишь узкая полоска материала возле сварного шва (рис. 5.25) [40].

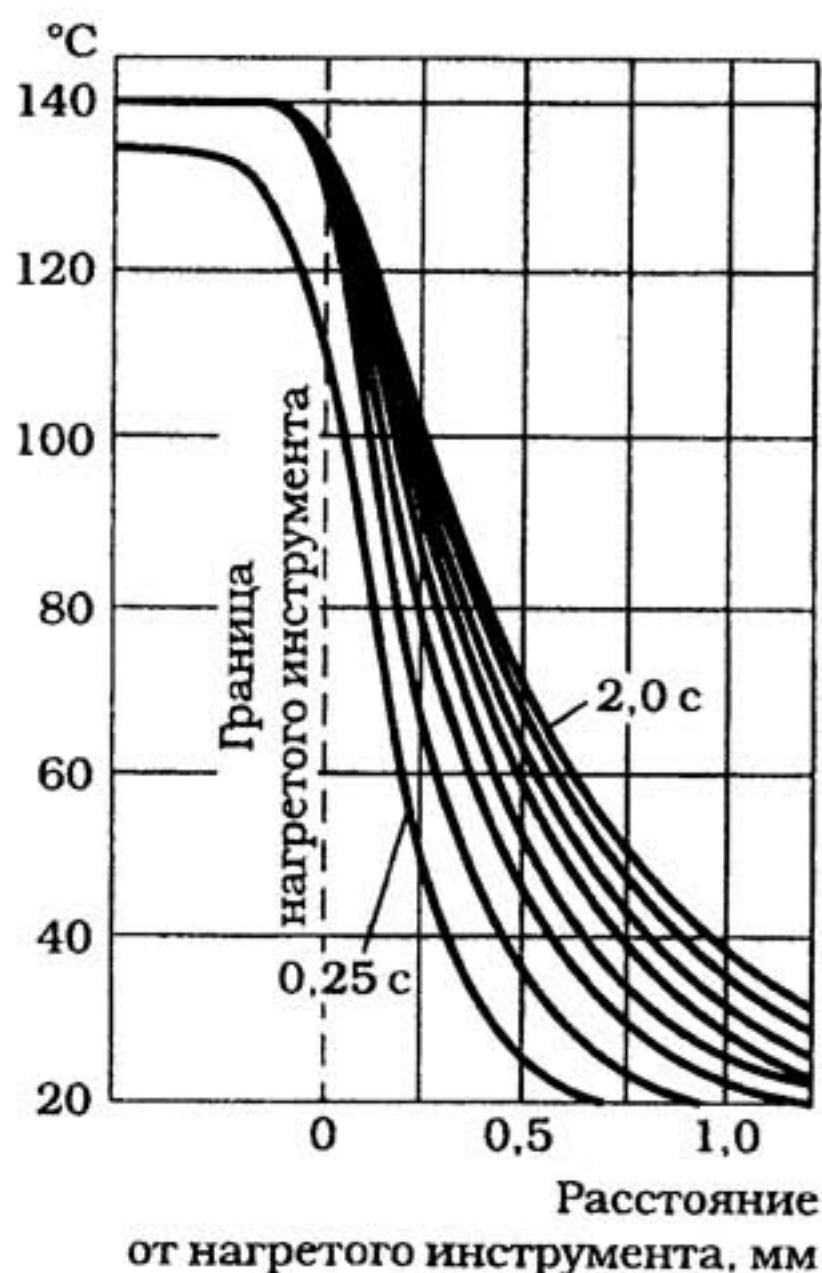


Рис. 5.25. Зависимость температуры околошовной зоны пленок ПЭНП толщиной 100 мкм от расстояния до нагретого инструмента и времени сварки

### 5.2.1.2. Термоимпульсная сварка

По физической сущности термоимпульсная сварка является разновидностью контактно-тепловой сварки. Принципиальным отличием термоимпульсной сварки является использование малоинерционного нагревателя с высоким электрическим сопротивлением. Такие нагреватели в виде узких металлических лент или проволоки разогреваются за доли секунды за счет подаваемого на них импульса тока.

Благодаря такой скорости температуру нагревателя можно ограничить температурой деструкции полимера (рис. 5.26). После отключения источника электрического тока направление потока тепла меняется на обратное, от полимера к нагревателю. Остаточное тепло из сварного шва отводится через нагревательную ленту, которая вследствие малой теплоемкости охлаждается достаточно быстро. При этом охлаждение осуществляется под давлением, что является главным преимуществом термоимпульсной сварки. Охлажденные поверхности,

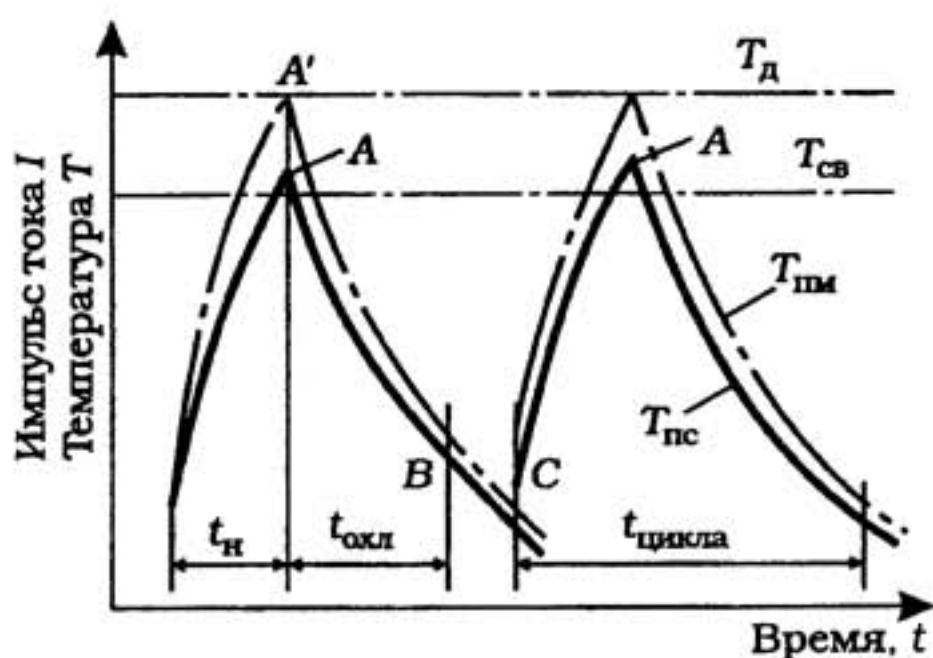


Рис. 5.26. Принципиальная схема термических циклов при термоимпульсной сварке. Температура:  $T_d$  — деструкции;  $T_{св}$  — сварки;  $T_{пм}$  — поверхности материала;  $T_{пс}$  — свариваемой поверхности. Продолжительность:  $t_n$  — нагрева;  $t_{охл}$  — охлаждения;  $t_{по}$  — подготовительных операций

как правило, не прилипают к нагревательному инструменту. Для полного исключения прилипания полимера нагреватель 4 изолируют антиадгезионной разделительной прокладкой 3 (рис. 5.27).

Термоимпульсной сваркой соединяют тонкие пленки из полиолефинов, поливинилхлорида, полиамидов, сложных эфиров и т. д. Для каждого материала существует допустимый перепад темпе-

ратур между внешней и внутренней его поверхностями. Величина этого перепада зависит от теплопроводности и теплоустойчивости материала и определяет максимальную толщину пленки, которая может быть сварена термоимпульсным методом. Для сварки тонких пленок (до 100–150 мкм) применяют односторонний нагрев, для более толстых пленок — двусторонний нагрев.

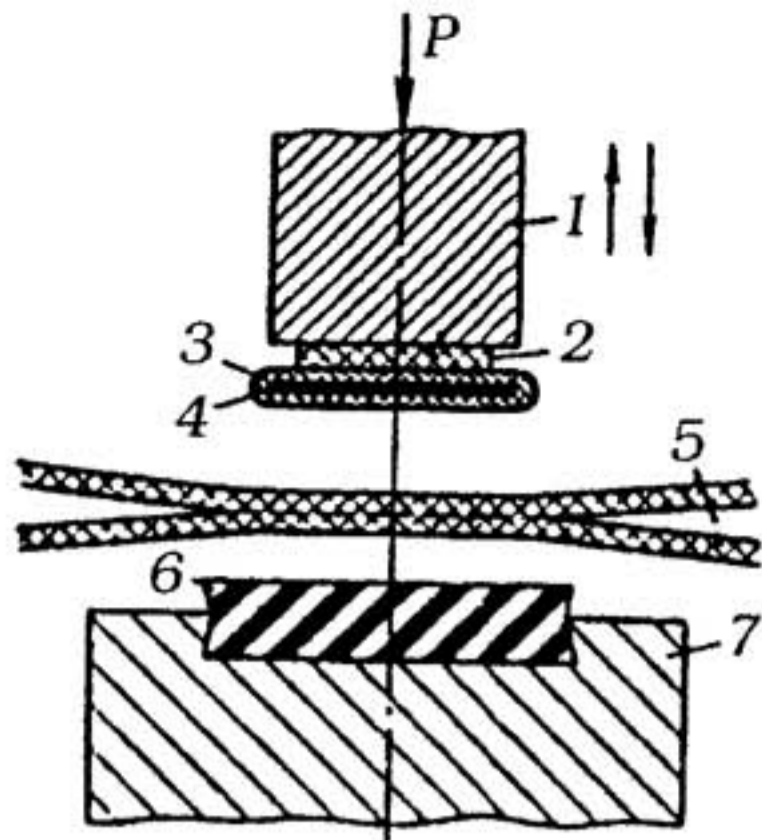


Рис. 5.27. Схема термоимпульсной сварки:  
 1 — подвижная прижимная губка;  
 2 — теплоизоляция; 3 — разделительная пленка; 4 — нагреватель; 5 — свариваемые детали; 6 — эластичная теплоизоляция; 7 — неподвижная прижимная губка (подложка)

Оптимальную температуру термоимпульсной сварки устанавливают опытным путем, изменяя величину и длительность импульса электрического тока, пропускаемого через нагреватель. Длительность импульса тока поддерживается автоматически с помощью реле времени. Это позволяет предотвратить перегрев материала, особенно в случаях интенсивного режима нагрева.

В зависимости от типа и толщины материала продолжительность нагрева составляет от десятых долей секунды до нескольких секунд, давление — от 0,01 до 0,2–0,3 МПа.

Эффективность термоимпульсной сварки определяется коэффициентом

$$K = \frac{T_H - T_{\Pi}}{T_{\text{св}} - T_{\Pi}} \quad (5.13)$$

где  $T_H$  — температура нагревателя, °С;  $T_{\text{св}}$  — температура в месте сварки (на расстоянии толщины пленки от нагревателя), °С;  $T_{\Pi}$  — температура подложки, °С.



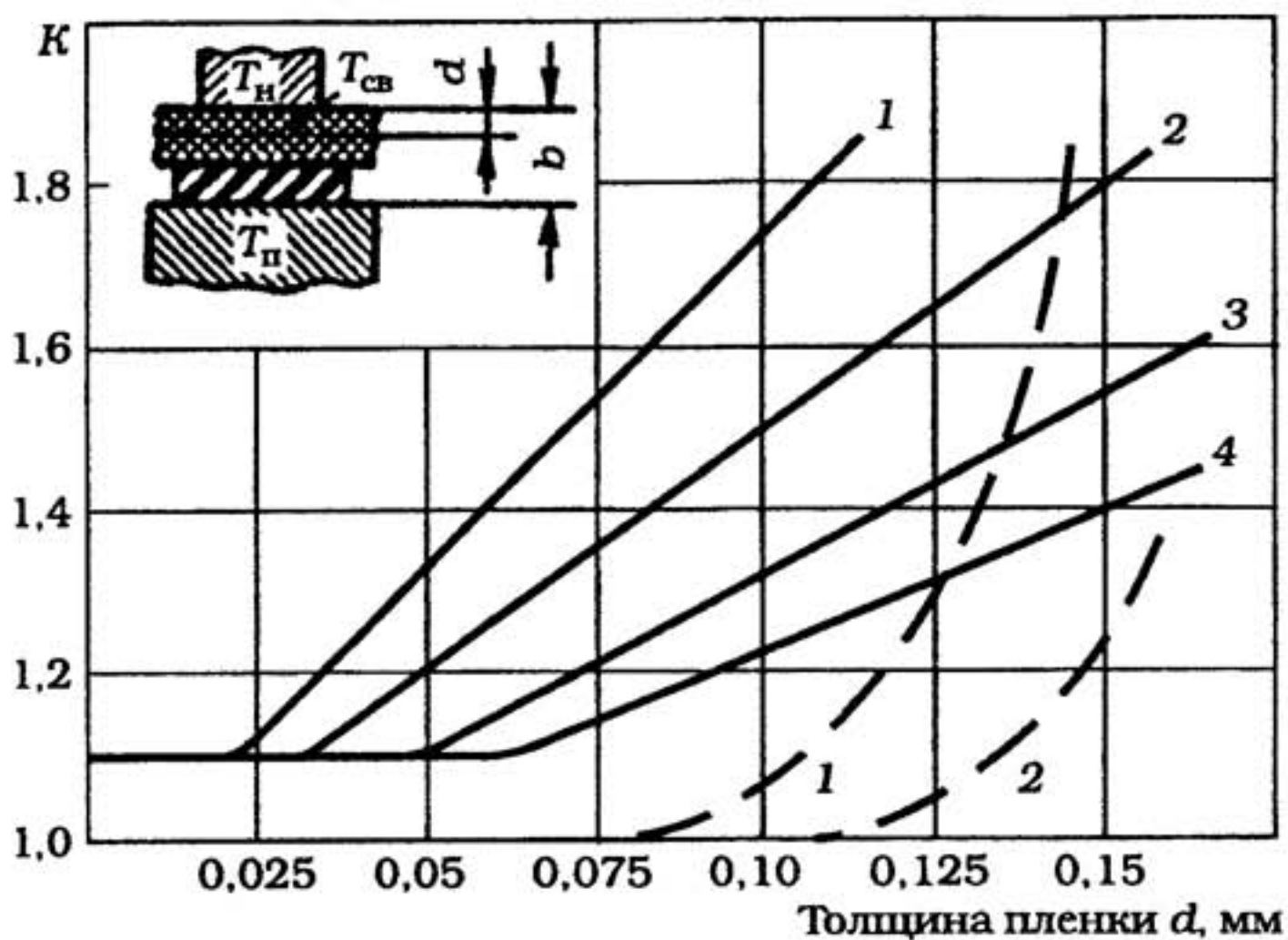


Рис. 5.28. Зависимость коэффициента отношения температур  $K$  при термоимпульсной односторонней сварке от толщины полиэтиленовой пленки  $d$  при продолжительности сварки  $t$ , с: 1 — 0,1; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 1,0

Экспериментально установленные зависимости  $K$  от толщины полиэтиленовой пленки приведены на рис. 5.28. Подобные зависимости позволяют устанавливать соотношения между продолжительностью сварки и толщиной пленки. Так, при допустимом для полиэтилена значении  $K \approx 1,6$  и продолжительности сварки 0,25 с в условиях одностороннего нагрева можно сваривать пленку максимальной толщины 120 мкм (см. рис. 5.28, кривая 2). Более чувствительная к перегреву пленка из пластифицированного ПВХ имеет допустимое значение  $K = 1,15-1,20$ , поэтому она в аналогичных условиях может быть сварена максимальной толщины не более 40 мкм.

Скорость охлаждения сварного шва, как и скорость нагрева, определяются качеством теплоизоляционного слоя узла крепления нагревателя.

Обычно нагреватель в виде нихромовой полосы шириной 3–5 мм или нихромовой проволоки диаметром 0,6–1,0 мм крепят в корпусе из диэлектрика (рис. 5.29). Для одновременного по-

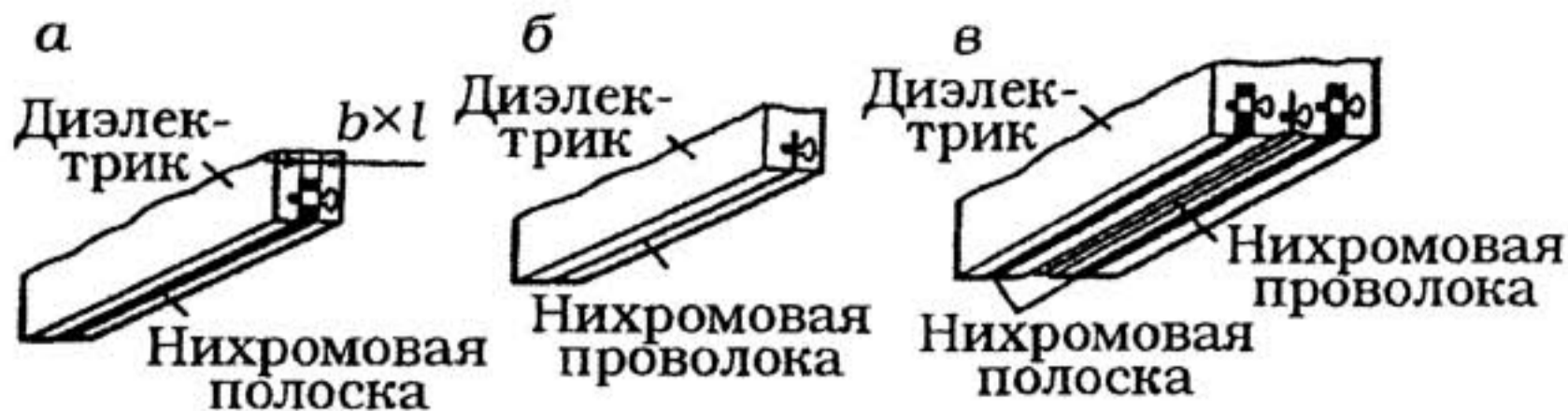


Рис. 5.29. Нагревательный инструмент термоимпульсной сварки:  
 а — с нихромовой полоской; б — с нихромовой проволокой;  
 в — наборный с нихромовыми полосками и проволокой

лучения двух сварных швов и обрезки пленки между сварными швами применяют наборный нагреватель из двух нихромовых полос и проволоки. В современных фасовочных автоматах для разрезки пленки между соседними сварными швами и отделения упакованной продукции часто используют конструкцию узла термоимпульсной сварки с встроенным отрезным ножом (рис. 5.30) [27]. Для сокращения длительности охлаждения нагревательный элемент у сварочных аппаратов большой мощности охлаждается воздухом или водой. Поскольку охлаждение под давлением ниже  $T_c$  для аморфных полимеров или

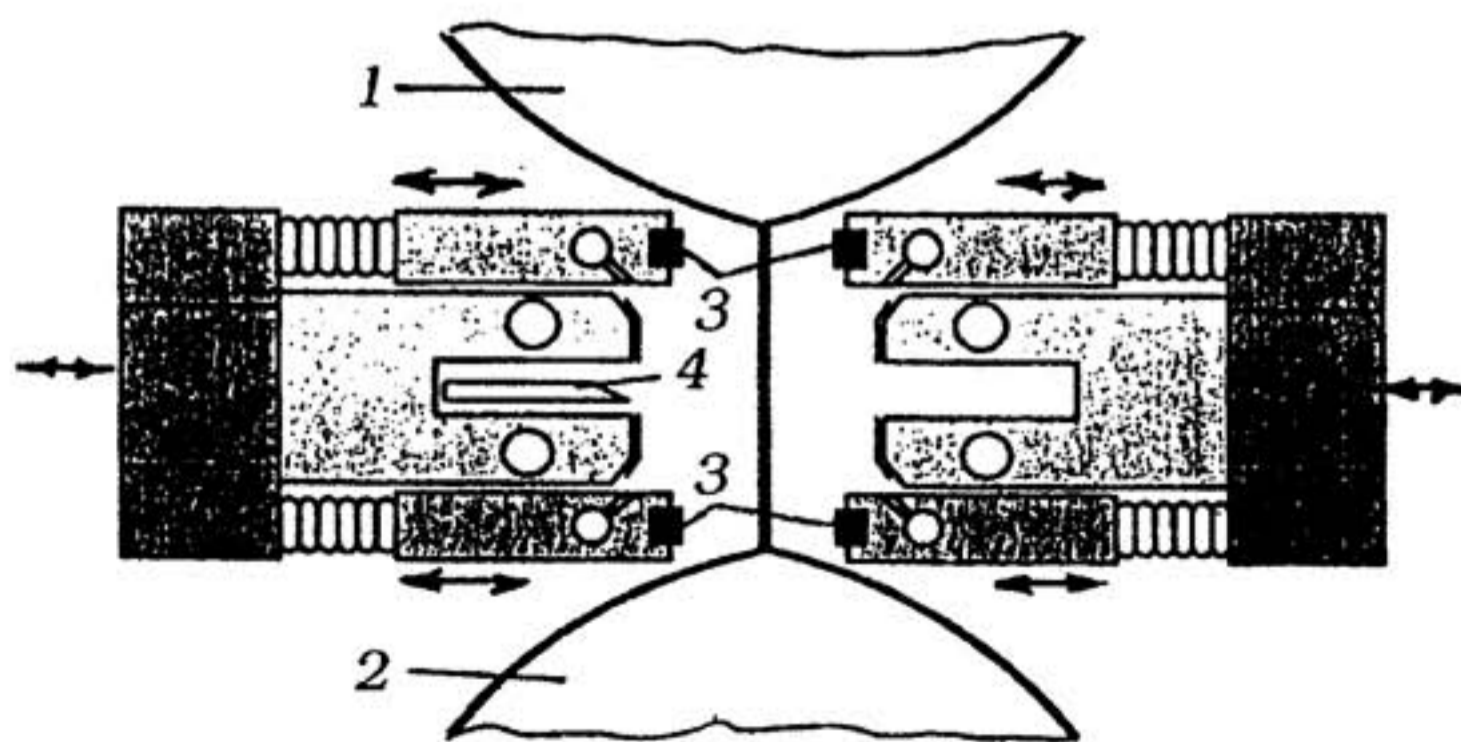


Рис. 5.30. Схема термоимпульсной сварки фасовочного автомата с отрезкой упакованной продукции:  
 1, 2 — упаковка; 3 — термоимпульсный нагреватель; 4 — отрезной нож

ниже  $T_{пл}$  для кристаллических полимеров длится доли секунды, весь процесс сварки занимает 1–5 с.

Протяженность сварного шва, получаемого за один цикл сварки, определяется длиной нагревательной ленты, которая ограничивается большим тепловым расширением. Так, удлинение ленты из нихрома длиной 0,8 м при нагреве до 500°C составляет около 7 мм. Такое значительное удлинение может привести в процессе сварки к смещению материала и к снижению прочности шва. Промышленностью выпускаются сварочные аппараты, позволяющие получать прямолинейные швы длиной 0,1–1,5 м и шириной 2–4 мм. Протяженные швы могут быть изготовлены шаговым методом со скоростью, достигающей 10–15 м/мин в автоматических установках.

### 5.2.1.3. Высокочастотная сварка

Сварка полимеров в поле токов высокой частоты (ТВЧ) основана на диэлектрическом нагреве приведенных в контакт поверхностей в результате преобразования электрической энергии в тепловую непосредственно внутри самих материалов.

Основным условием для нагрева в поле ТВЧ является наличие в молекулах полимера звеньев, имеющих дипольное строение и способных поляризоваться под действием внешнего поля. Диполями называются связанные пары равных по величине и противоположных по знаку зарядов. Произведение величин этих зарядов на расстояние между ними называется дипольным моментом. Смещение диполей под действием внешнего электрического поля называется поляризацией.

В находящемся в переменном электрическом поле полимере происходит ориентация диполей: положительные заряды притягиваются к отрицательно заряженному электроду, а отрицательные — к положительно заряженному. При изменении направления электрического поля, т. е. при смене знака заряда на электродах, изменяется и ориентация диполей, а следовательно, и ориентация участков молекул полимера. Препятствовать ориентации будут соседние звенья той же молекулы и другие молекулы. Энергия, затрачиваемая на преодоление этих препятствий, превращается в тепло. В процессе нагрева

вязкость полимера уменьшается и условия ориентации улучшаются.

Преобразование электрической энергии в тепловую происходит по всей длине материала, поэтому потери энергии и температурные перепады минимальны.

Различные пластмассы в переменном электрическом поле нагреваются не одинаково интенсивно. Способность к нагреву в ТВЧ определяется величиной потерь энергии. Ее оценивают фактором диэлектрических потерь  $k_{дп}$ , равным произведению диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  на тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ :

$$k_{дп} = \epsilon \text{tg } \delta. \quad (5.14)$$

Высокочастотной сварке подвергаются полимеры, у которых  $k_{дп} \geq 0,01$ . Это прежде всего поливинилхлорид, поливинилиденхлорид, поливинилацетат, полиамиды, эфиры целлюлозы, полиметилметакрилаты, полиацетали (табл. 5.4). Следует от-

Таблица 5.4

**Диэлектрические показатели пластмасс при частоте  $10^6$  и температуре 493 К [40]**

Материал	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$	Фактор потерь $k_{дп}$
Поливинилхлорид:			
жесткий	2,8–3,4	0,015–0,04	0,042–0,136
пластифицированный	3,3–4,5	0,04–0,09	0,132–0,405
Поливинилиденхлорид	3,0–5,0	0,05–0,08	0,150–0,400
Поливинилбутираль	3,3–3,9	0,06	0,198–0,234
Поливинилацеталь	2,7	0,016	0,042
Полиамид	3,8–4,2	0,025–0,03	0,090–0,128
Ацетилцеллюлоза	3,2–7,0	0,01–0,10	0,032–0,70
Ацетобутират целлюлозы	3,2–6,2	0,01–0,04	0,032–0,248
Полиметилметакрилат	2,9–3,2	0,02–0,03	0,058–0,096
Поликарбонат	3,0	0,01	0,03
Политрифторхлорэтилен	2,5–3,0	0,01	0,025–0,030
Политетрафторэтилен	1,9–2,2	0,00025	0,000475–0,00055
Полиэтилентерефталат	3,0	0,002	0,006
Полиэтилен	2,2–2,4	0,0001–0,0004	0,00022–0,00096
Полипропилен	2,0	0,0001	0,0002
Полистирол	2,4–2,7	0,0001–0,002	0,00024–0,0054
Полиизобутилен	2,4–2,9	0,0005	0,0012–0,0015

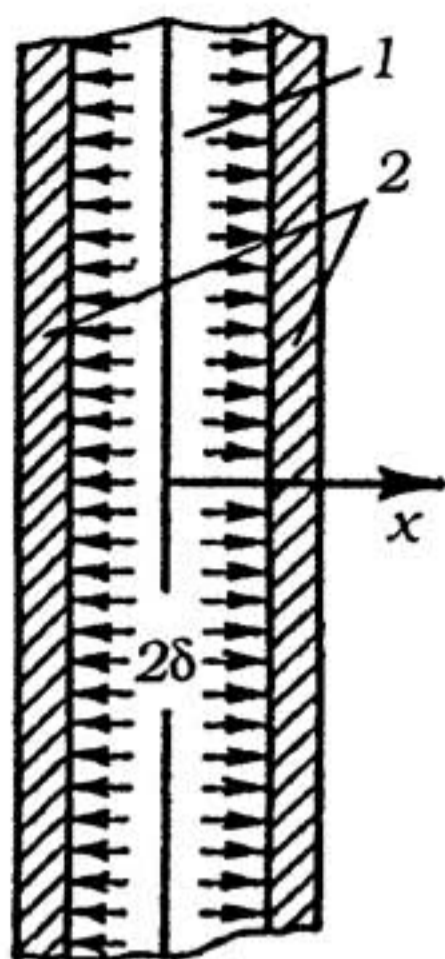


Рис. 5.31. Расположение свариваемого в ТВЧ материала 1 между электродами 2 рабочего конденсатора

метить, что  $k_{дп}$  сильно зависит от температуры и частоты колебаний.

Под воздействием ТВЧ тепловая энергия выделяется в массе полимера. С ростом температуры свариваемого материала поток тепла устремляется к сварочным электродам, имеющим температуру окружающего воздуха (рис. 5.31). Уравнение тепловых процессов такой системы имеет вид [43]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{a^2 d^2 T}{dx^2} + \frac{p}{c\rho}, \quad (5.15)$$

где  $T$  — температура свариваемого материала на расстоянии  $x$  от свариваемой поверхности;  $p$  — удельная тепловая мощность, выделяемая в виде тепла при нахождении полимера в ТВЧ;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность материала.

Решение уравнения (5.15) может быть представлено в виде

$$T = \frac{32p\delta^2}{2\lambda\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{(n+1)} \cdot \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2\delta} \left( 1 - e^{-\left[ \frac{(2n-1)\pi x}{2\delta} \right]^2 \cdot t} \right), \quad (5.16)$$

где  $\delta$  — толщина свариваемого материала;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Формула (5.16) позволяет рассчитать распределение температуры по толщине свариваемых материалов. В начале нагрева, при  $t = 0$ , все члены суммы обращаются в ноль и  $T = 0$ . При  $t = \infty$  формула (5.16) приобретает вид

$$T_{\infty} = \frac{32p\delta^2}{2\lambda\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{(n+1)} \cdot \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2\delta}. \quad (5.17)$$

Распределение температуры в этом случае происходит по параболе. При малом времени нагрева распределение температур близко к равномерному. На свариваемых поверхностях ( $x = 0$ ) выражение по знаком суммы приобретает вид

$$\sum \left( 1 + \frac{1}{3^3} + \frac{1}{5^3} + \frac{1}{7^3} + \dots \right) = \frac{\pi^3}{32}. \quad (5.18)$$

Подставляя (5.18) в (5.17), получаем

$$T_{x=0} = \frac{p\delta^2}{2\lambda}. \quad (5.19)$$

Формулы (5.16)–(5.19) позволяют решать и обратную задачу. Задаваясь температурой сварки материала (значением  $T$  при  $x = 0$ ), можно определить удельную тепловую мощность  $p$  при различном времени сварки. Из формулы (5.16) при  $x = 0$  следует

$$p = \frac{2T\lambda}{\delta^2} \left[ 1 - \frac{32}{\pi^3} \left( e^{-\left[\frac{\pi a}{2\delta}\right]^2 t} - \frac{1}{3^4} e^{-\left[\frac{3\pi a}{2\delta}\right]^2 t} + \frac{1}{5^4} e^{-\left[\frac{5\pi a}{2\delta}\right]^2 t} - \dots \right) \right]^{-1}. \quad (5.20)$$

Объем нагреваемого материала может быть определен по формуле

$$V = 2\delta bl, \quad (5.21)$$

где  $2\delta$  — общая толщина шва;  $b$  — фактическая ширина зоны нагрева;  $l$  — фактическая длина зоны нагрева.

Общая мощность или скорость преобразования электромагнитной энергии в тепловую во всем объеме сварного шва составляет

$$P = pV = p \cdot 2\delta bl = p \cdot 2\delta S, \quad (5.22)$$

где  $S$  — фактическая площадь зоны нагрева.

Мощность  $P_{\text{акк}}$ , аккумулированная в объеме шва, будет меньше общей мощности  $P$ , поскольку часть энергии перешла к холодным элементам:

$$P_{\text{акк}} = c\rho S \int_{x=-\delta}^{x=+\delta} T dx. \quad (5.23)$$

Подводя под знак интеграла значение  $T$  из выражения (5.23) и интегрируя, получаем

$$P_{\text{акк}} = \frac{2\rho S\delta^2}{3a^2} \left[ 1 - \frac{96}{\pi^4} \sum e^{-\left[\frac{\pi a}{2\delta}\right]^2 t} + \frac{1}{3^4} e^{-\left[\frac{3\pi a}{2\delta}\right]^2 t} + \frac{1}{5^4} \dots \right]. \quad (5.24)$$

Уравнение (5.24) позволяет рассчитать  $P_{\text{акк}}$  и определить термический коэффициент полезного действия нагрева  $\eta_T$ , равный отношению аккумулированной в шве энергии к энергии, выделенной в шве высокочастотным полем:

$$\eta_T = \frac{P_{\text{акк}}}{P}. \quad (5.25)$$

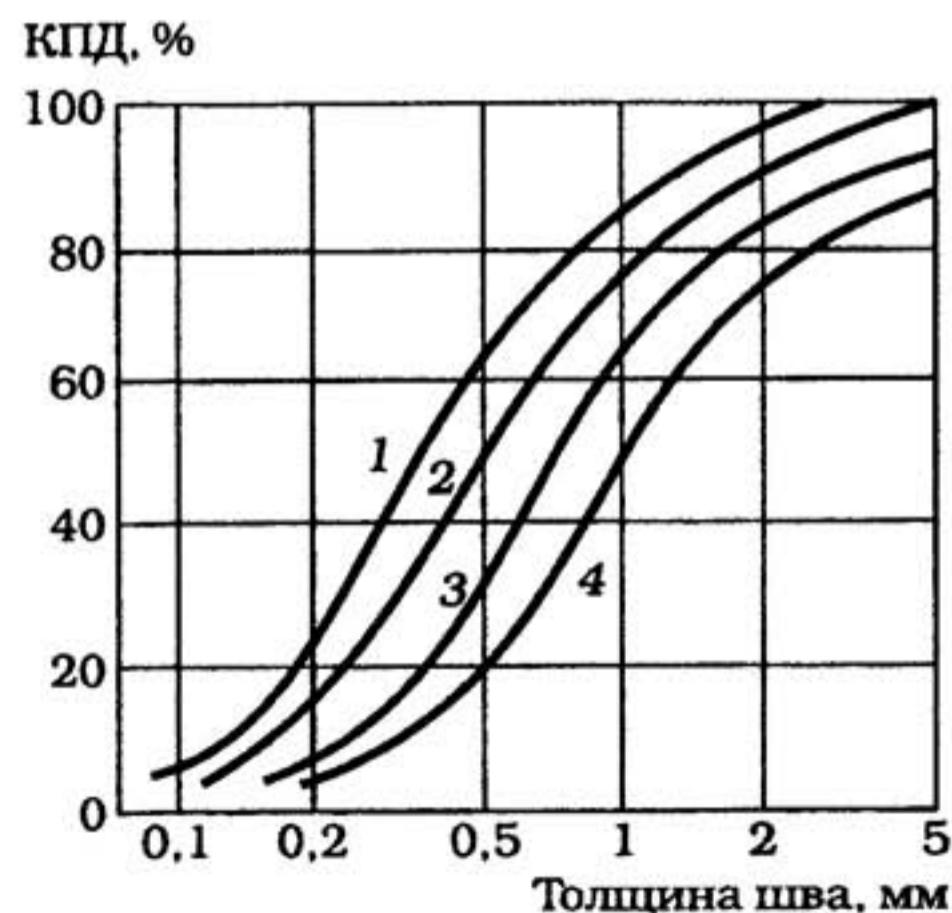


Рис. 5.32. Зависимость коэффициента полезного действия нагрева ТВЧ от толщины пластифицированного ПВХ при различном времени нагрева: 1 — 0,1; 2 — 0,2; 3 — 0,5; 4 — 1,0 с

Зависимость  $\eta_T$  от толщины пластифицированного ПВХ приведена на рис. 5.32. Из рисунка видно, что для увеличения  $\eta_T$  процесс нагрева следует вести с максимально возможной скоростью. Оказывает влияние на  $\eta_T$  и тепловой режим электродов рабочего конденсатора. При холодных электродах потери энергии в них от нагретого материала за счет теплопроводности будут максимальными.

По известным электрофизическим параметрам термопластов можно определить диапазон частот,

при котором осуществляется быстрый нагрев зоны сварного шва до температуры вязкотекучего состояния:

$$f_{\min} = \frac{\rho c \Delta T}{\Delta t \operatorname{tg} \delta \varepsilon \varepsilon_0 E_{\text{м. доп}}^2}, \quad (5.26)$$

где  $f$  — частота тока, Гц;  $\Delta T/\Delta t$  — скорость нагрева, град/с;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная, равная  $1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)$ , Ф/м;  $E_{\text{м. доп}}$  — напряженность электрического поля в материале, В/м.

Расчеты показывают, что для сварки термопластов этот диапазон частот составляет

$$f = (30 \div 150) \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Удельную тепловую мощность  $p$  можно определить по следующему соотношению [40]:

$$p = 0,55 \cdot 10^{-8} \varepsilon \operatorname{tg} \delta f E_{\text{м. доп}}^2. \quad (5.27)$$

Сварку полимерных пленок в поле ТВЧ осуществляют преимущественно по двум схемам: прессовой и роликовой (рис. 5.33).

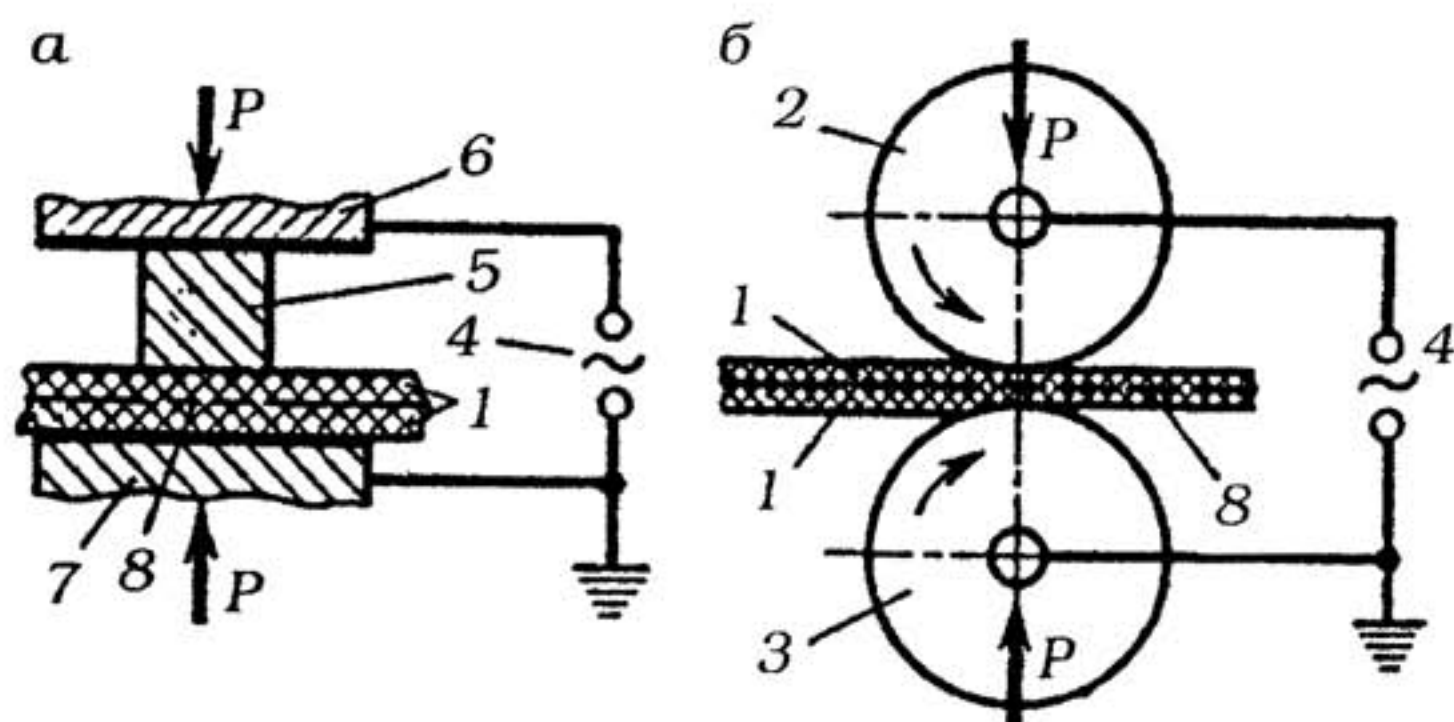


Рис. 5.33. Прессовая (а) и роликовая (б) высокочастотная сварка полимерных пленок: 1 — свариваемые материалы; 2 — высокопотенциальный ролик; 3 — заземленный ролик; 4 — генератор высокой частоты; 5 — рабочий инструмент; 6 и 7 — обкладки рабочего конденсатора (6 — высокопотенциальная, 7 — заземленная); 8 — сварной шов



При **прессовом способе** свариваемый материал помещают между обкладками рабочего конденсатора и нагрев места соединения осуществляют с помощью инструмента (электродов), повторяющего внешнюю форму шва. Кроме подвода энергии к месту сварки электроды передают на материал необходимое давление и охлаждают его поверхности. Преимуществом прессового способа является равномерный нагрев свариваемого материала за один прием и при одном режиме, что обеспечивает высокое качество сварки швов.

**Роликовый способ** служит для получения протяженных непрерывных швов. Сварка материалов производится двумя вращающимися в противоположном направлении электродами — роликами, один из которых соединен с высокопотенциальным выводом генератора, а другой заземлен.

При всей простоте способ имеет ряд существенных недостатков, которые ограничивают его применение. При непрерывной высокочастотной сварке особые трудности возникают во время охлаждения шва: материал не успевает охладиться под давлением. Шов выходит из-под роликов в еще нагретом состоянии, поэтому в процессе охлаждения может произойти его деформирование. Кроме того, материал может захватываться роликами в зоне разогрева, поэтому его толщина уменьшается, изменяется электрический режим, а следовательно, и качество шва. Для устранения этого недостатка ограничивают скорость сварки, длину сварочных швов, а также применяют подающий механизм более сложной конструкции.

Технологические параметры нагрева и сварки упаковки (время нагрева и выдержки, давление, температура и напряженность электрического поля) практически устанавливаются экспериментально для каждого вида материала и конструкции тары и упаковки. Кроме перечисленных выше технологических параметров на прочность сварного шва большое влияние оказывает конечная толщина сварного шва. Утонение материала в процессе сварки связано с усилием сжатия и другими параметрами сварки соотношением [43]

$$P = \left[ \left( \frac{\delta_0}{\delta_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{\eta b^2}{t \delta_0^2}, \quad (5.28)$$

где  $P$  — давление, Па;  $\delta_0$  — толщина пленок до сварки, см;  $\delta_1$  — толщина материала в зоне сварного шва, см;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $t$  — продолжительность сварки, с.

Поскольку значения  $t$ ,  $b$ ,  $\eta$  можно считать постоянными для данного типа свариваемого материала и выбранного технологического процесса, то утонение в первую очередь зависит от давления.

#### 5.2.1.4. Ультразвуковая сварка

Сварка ультразвуком основана на нагреве контактирующих поверхностей полимеров до вязкотекучего состояния в результате превращения энергии колебаний ультразвуковой частоты (16–50 кГц) в тепловую энергию. Схема ультразвуковой сварки приведена на рис. 5.34. Соединяемые детали 3 зажимают с усилием  $P$  между концом инструмента 2 и пассивным 4 или настроенным 5 отражателем. При подаче тока высокой частоты на обмотку вибратора 1 в нем возникают продольные высокочастотные механические колебания, которые передаются через концентратор с инструментом 2 к свариваемым материалам 3. Давление на свариваемые детали осуществляют инструментом или пассивным отражателем. В качестве пассивного отражателя используют материал, гасящий ультразвуковые колебания, — резину, древесину и т. п.

Для уменьшения потерь энергии за счет перехода колебаний в станину применяют настроенный отражатель 5. Его выполняют из стального стержня, закрепленного на резиновой подложке 6. Высоту отражателя определяют экспериментально. Она составляет приблизительно четверть длины волны колебаний. Длина вибратора составляет полволны, длина инструмента — две полуволны.

Приведенным способом можно выполнять точечные, прямолинейные и замкнутые кольцевые швы диаметром до 100 мм за один рабочий цикл. Форма шва определяется формой и площадью рабочей поверхности инструмента.

Непрерывные швы получают при помощи роликовой сварки, схема которой приведена на рис. 5.35. В этом случае давление

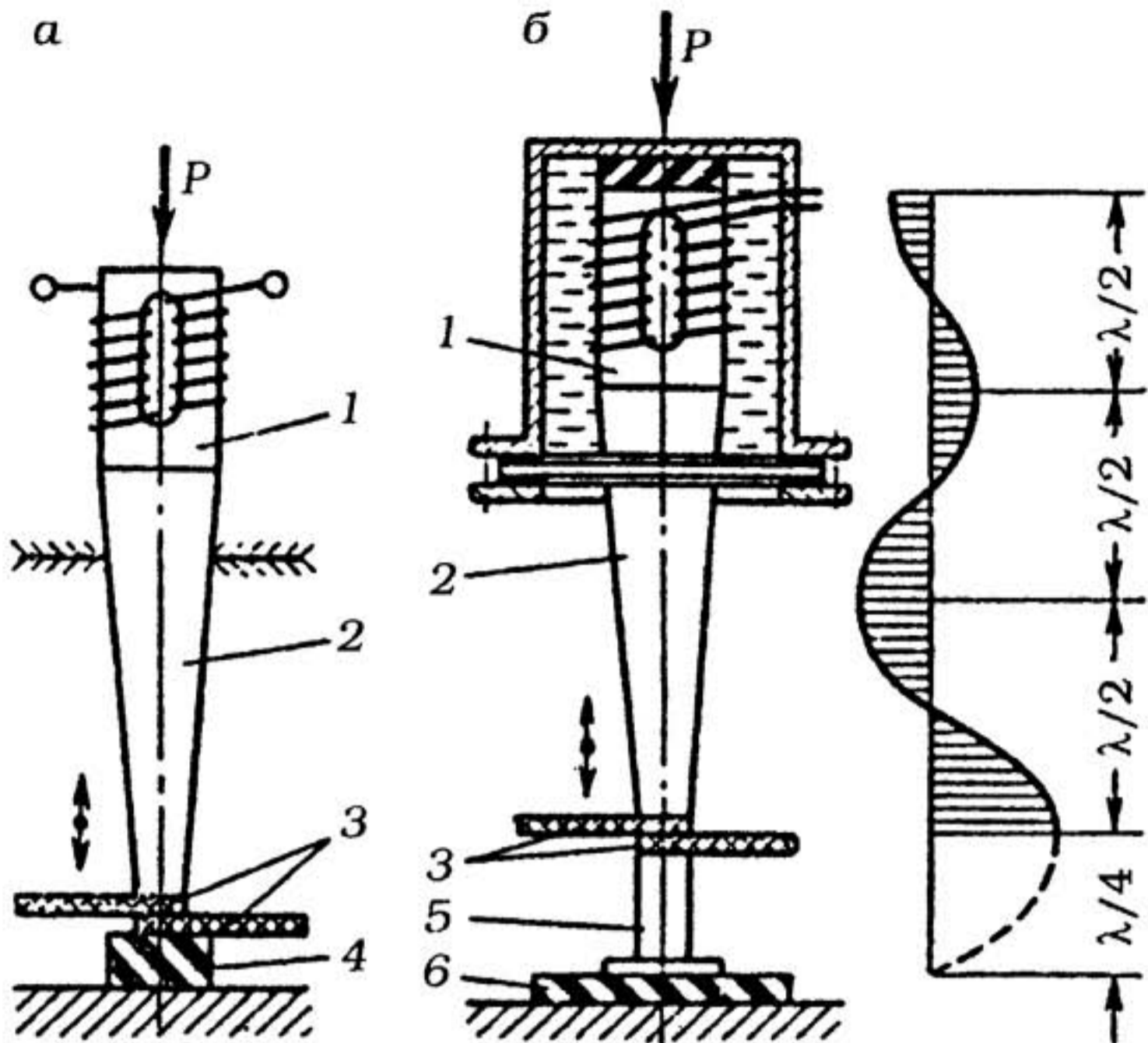


Рис. 5.34. Схема ультразвуковой сварки с пассивным (ненастроенным) отражателем (а) и с активным отражателем (б):  
 1 — излучатель; 2 — концентратор с инструментом;  
 3 — свариваемые материалы; 4 — пассивный отражатель;  
 5 — настроенный отражатель; 6 — подложка

сварки невелико и нельзя применять активный отражатель. Поэтому толщина свариваемых пленок ограничена до 50 мкм.

Ультразвуковые колебания представляют собой упругие волны, распространяющиеся в любой материальной среде. В идеальной среде, в которой отсутствует внутреннее трение, бегущая волна описывается выражением

$$U = A \sin(\omega t + kx), \quad (5.29)$$

где  $U$  — смещение вдоль оси  $x$  произвольной точки в любой момент времени  $t$ ;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота;  $f = 1/T$  — частота колебаний (число колебаний в единицу времени);  $T$  — период

колебаний;  $A$  — амплитуда смещения;  $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$  — волновое число;  $\lambda = cT = c/f$  — длина волны;  $c$  — скорость перемещения фазы, или фазовая скорость.

Фазовая скорость звука для продольной волны в неограниченной твердой среде

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}, \quad (5.30)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — плотность среды;  $K$  — модуль объемного сжатия;  $G$  — модуль сдвига.

При распространении упругой волны происходит перенос энергии, причем в процессе колебаний энергия периодически переходит из потенциальной в кинетическую и наоборот. Полная средняя энергия в бегущей волне [5]

$$\bar{E} = 0,5\rho\omega^2 A^2 = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho. \quad (5.31)$$

В сварочном аппарате электрические колебания ультразвуковой частоты, вырабатываемые генератором, излучателем преобразуются в механические продольные колебания. Эти колебания передаются к свариваемым деталям волноводом. Волновод представляет собой металлический стержень переменного сечения, уменьшающегося в направлении свариваемых деталей. Волновод иначе называют концентратором. Масса верхней широкой части волновода  $m_1$  больше массы его нижней узкой части  $m_2$ . Поскольку волновод является жестким, усилия в верхнем и нижнем его сечениях одинаковы:

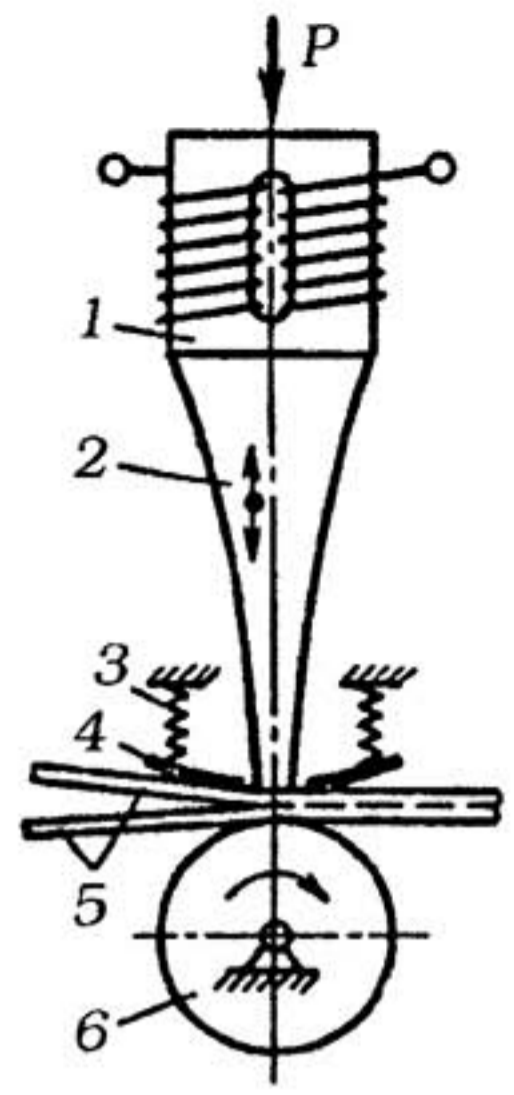


Рис. 5.35. Схема роликовой ультразвуковой сварки: 1 — излучатель; 2 — концентратор; 3 — пружина; 4 — прижимный полз; 5 — свариваемые материалы; 6 — ролик

$$m_1 \frac{d^2 U_1}{dt^2} = m_2 \frac{d^2 U_2}{dt^2}, \quad (5.32)$$

где  $d^2 U_1/dt^2$  и  $d^2 U_2/dt^2$  — ускорения, с которыми движутся массы  $m_1$  и  $m_2$ .

Так как  $m_1 > m_2$ , а волновод колеблется с одинаковой частотой  $\omega = \omega_1 = \omega_2$ , то с учетом выражения (5.29)

$$A_2 > A_1,$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды смещений масс  $m_1$  и  $m_2$  соответственно.

Таким образом, амплитуда смещения тонкого конца волновода больше амплитуды смещения его толстого конца. Из уравнения (5.31) видно, что в этом случае энергия, подводимая к свариваемым деталям, значительно превышает энергию излучателя.

Вопрос о характере преобразования энергии механических колебаний в тепловую энергию и разогреве вследствие этого свариваемых деталей является одним из самых важных. С ним связано не только познание физических основ ультразвуковой сварки, но и разработка методов практического расчета параметров режимов сварки. Эти методы должны позволить получить уравнение, связывающее параметры режима сварки, например, в виде

$$t_{\text{св}} = \varphi(A, f, p_{\text{ст}}, T_{\text{св}}, g_1, g_2, \dots, g_l, j_1, j_2, \dots, j_l), \quad (5.33)$$

где  $t_{\text{св}}$  — время сварки;  $p_{\text{ст}}$  — статическое давление сварки;  $T_{\text{св}}$  — температура сварки;  $g_1, g_2, \dots, g_l$  — свойства материала;  $j_1, j_2, \dots, j_l$  — геометрические размеры сварочных швов.

Все явления, протекающие при ультразвуковой сварке, обусловлены процессом деформации полимерных материалов, преимущественно термопластов, с ультразвуковой частотой. Поэтому определение функций (5.33) в явном виде связано с решением задач, содержащих уравнение движения сплошной среды, уравнения материального и энергетического балансов, а также уравнения состояния, описывающие взаимосвязь внешних воздействий и сопротивляемости

среды. Уравнения энергетического баланса должны содержать внутренний источник энергии, интенсивность и распределение которого в объеме нагреваемого тела известны. Однако до настоящего времени не сложилось единого мнения по вопросу о физической природе источников теплоты при ультразвуковой сварке термопластов. Подробный анализ существующих по этому поводу точек зрения проведен в специальной литературе [5]. В общем виде задача о разогреве деталей при ультразвуковой сварке может быть решена только в рамках задач термовязкоупругости, в которых температурное поле определяется в зависимости от поля напряжений и деформаций вследствие нагревания материала за счет диссипации энергии.

Для ультразвуковой сварки тонких полимеров, толщина которых гораздо меньше четверти длины волны, а теплоотводом из зоны сварки можно пренебречь, справедливо соотношение [5]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\pi f A^2 E_2}{2\delta^2 c\rho}, \quad (5.34)$$

где  $E_2$  — модуль потерь;  $c$  — удельная теплоемкость.

Из уравнения (5.34) следует, что скорость разогрева и характер термического цикла сварки зависят от комплексной характеристики материала  $F_M$ :

$$F_M = \frac{E_2}{c\rho} = \frac{E_1 \eta_{п}}{c\rho}, \quad (5.35)$$

где  $\eta_{п} = E_2/E_1$  — тангенс угла механических потерь.

При условии, что  $\pi f A^2 / (2 \delta^2) = 1$ , комплексная характеристика материала  $F_M$  равна скорости роста температуры за счет рассеивания механической энергии (см. уравнение (5.34)). В числитель комплексной характеристики  $F_M$  входит модуль потерь  $E_2$ , характеризующий количество рассеиваемой энергии, а в знаменатель — количество энергии, необходимое для разогрева единицы массы на один градус. Таким образом,  $F_M$  характеризует соотношение между рассеиваемой и требуемой для нагрева энергиями.

К основным параметрам ультразвуковой сварки относятся, которые непосредственно влияют на количество механической энергии, подводимой к свариваемым материалам и превращаемой в тепловую энергию. Такими параметрами являются амплитуда колебаний рабочего торца волновода  $A$  (мкм), частота колебаний  $f$  (кГц), продолжительность ультразвукового импульса  $t_{св}$  (с) или скорость сварки  $v$  (м/с) и сварочное давление  $p_{ст}$  (Па) или усилие прижатия волновода к материалу  $F$  (Н).

Из уравнения (5.34) следует, что время разогрева полимера до вязкотекучего состояния обратно пропорционально квадрату амплитуды  $A$ : при увеличении амплитуды возрастает энергия, подводимая к свариваемым материалам.

Обширный экспериментальный материал свидетельствует о том, что можно подобрать достаточно большое количество сочетаний  $A$ ,  $p_{ст}$  и  $f$ , при которых достигается высококачественное сварное соединение [5]. При этом изменяется только время сварки. Если  $A$ ,  $p_{ст}$  и  $f$  малы, то время сварки велико, и наоборот.

Время рабочего цикла сварки определяется последовательностью приложения сварочного давления, включения, прохождения и выключения ультразвукового импульса, выдержки изделия под давлением и снятия давления.

Цикл сварки во многом определяет прочность сварного соединения, поэтому закладывается в основу при разработке технологии и машин, влияет на выбор принципиальной схемы механизма давления и управления ультразвуковыми колебаниями. Основные виды циклов ультразвуковой сварки пластмасс показаны на рис. 5.36.

При наиболее распространенном цикле (рис. 5.36, а) статическое давление  $p_{ст}$  прикладывают до включения ультразвуковых колебаний, а снимают после их выключения с запаздыванием на время  $t_3$ . Полное время цикла  $t_{ц}$  при этом составляет

$$t_{ц} = t_{п} + t_{уз} + t_3, \quad (5.36)$$

где  $t_{п}$  — время предварительного сжатия давлением  $p_{ст}$ ;  $t_{уз}$  — время включения ультразвуковых колебаний;  $t_3$  — время выдержки под давлением без ультразвуковых колебаний.

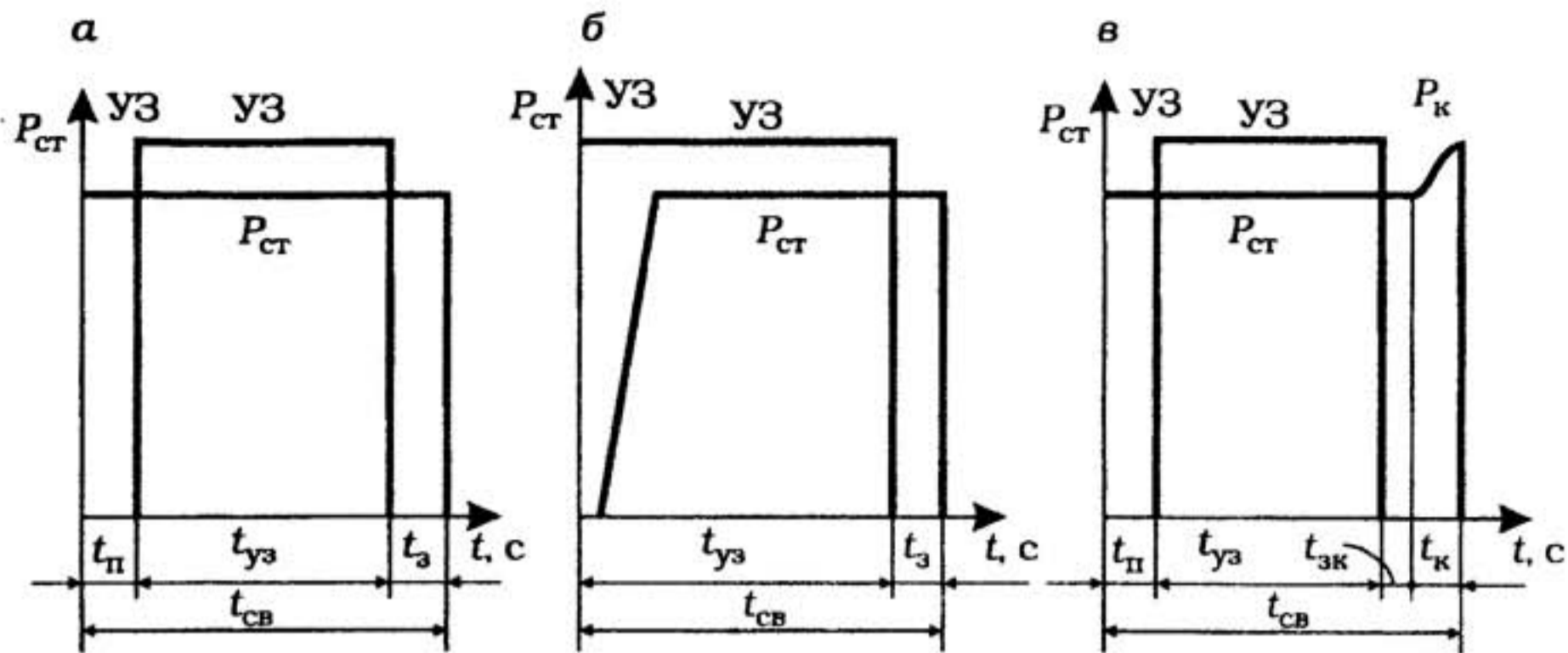


Рис. 5.36. Основные виды рабочих циклов ультразвуковой сварки тары и упаковки из пластмасс

Во время выдержки под давлением  $p_{ст}$  после выключения ультразвуковых колебаний происходит охлаждение сварного шва. Это повышает качество и прочность сварного соединения на 40–50%.

Цикл с предварительным включением ультразвуковых колебаний и последующим приложением статического давления приведен на рис. 5.36, б. Первоначальное включение ультразвука дает возможность производить очистку свариваемых поверхностей, загрязненных различными веществами. В этом случае сварочное давление прикладывают к изделию постепенно. Касаясь изделия, волновод сообщает ему механические колебания, тем самым очищая поверхность перед сваркой. По окончании воздействия ультразвуковых колебаний выдерживают изделие под давлением и после времени  $t_з$  давление снимают.

Такой цикл используют при сварке мягкой тары для жидкой, порошкообразной и гранулированной продукции. Наибольшего эффекта достигают при сварке полиэтиленовых коробок, пакетов и туб, заполненных жидкостями с большой вязкостью.

Цикл, предусматривающий повышение сварочного давления после выключения ультразвуковых колебаний (рис. 5.36, в), позволяет получать сварные соединения повышенной прочности. Повышение давления до значения  $p_к$  должно следовать



через небольшой, строго контролируемый интервал времени  $t_{3к}$  после выключения ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковая сварка может быть рекомендована для изготовления мягкой тары из поликарбонатных, полипропиленовых, полиамидных и полиэтилентерефталатных пленок, для которых прочность сварных соединений на сдвиг составляет не менее 60% от прочности основного материала. Хуже свариваются пленки из полиэтилена низкого и высокого давления. Прочность их соединений на сдвиг составляет 25–30% от прочности основного материала.

Ультразвуковая сварка обладает преимуществами перед другими видами сварки при изготовлении мягкой тары из многослойных композиционных материалов, поскольку позволяет получать сварные соединения наибольшей прочности.

### *5.2.2. Типы сварных соединений и швов*

Основными типами сварных соединений полимерных пленочных материалов являются стыковое, нахлесточное, Т-образное и угловое. Помимо геометрической характеристики способа сопряжения поверхностей тип сварного соединения характеризует и форма кромок соединяемых деталей. Кромки могут быть прямыми, с односторонним или двусторонним скосом.

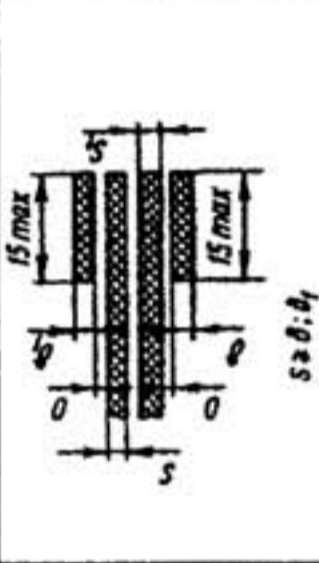
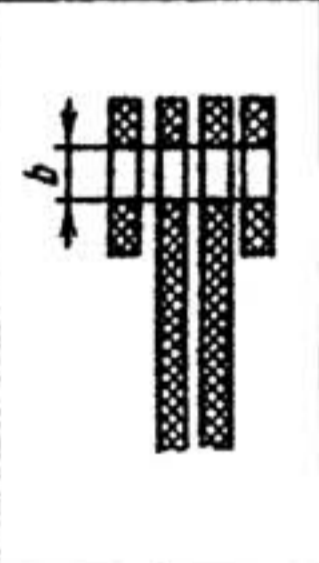
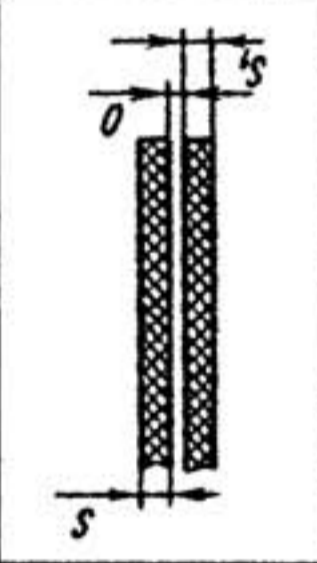
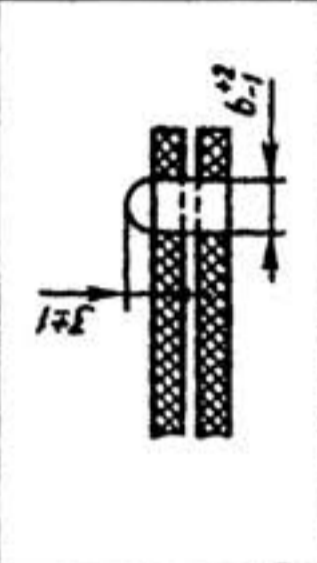
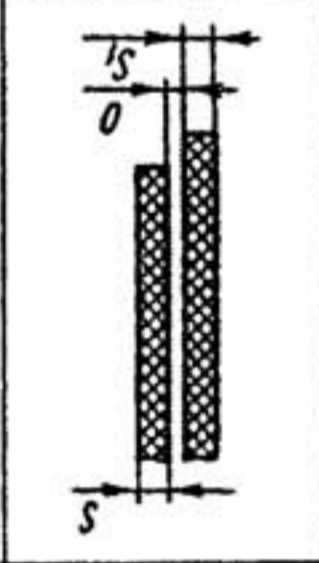
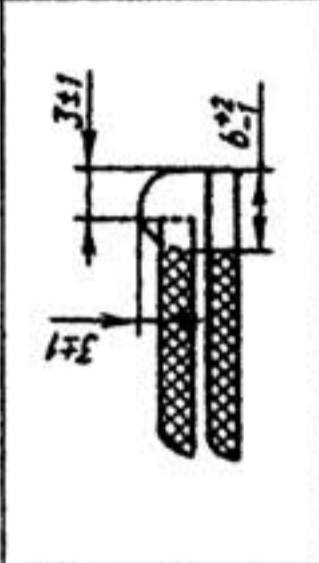
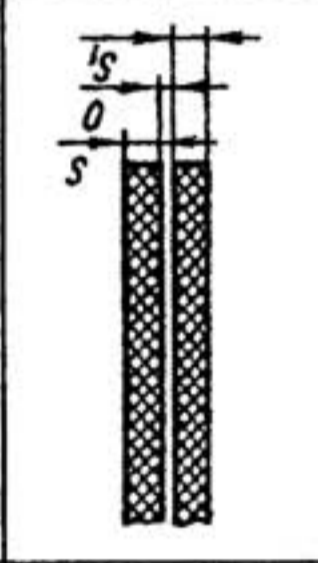
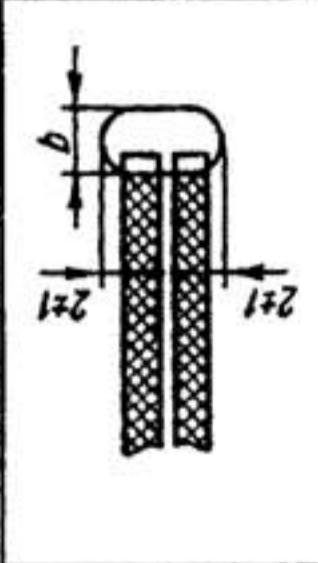
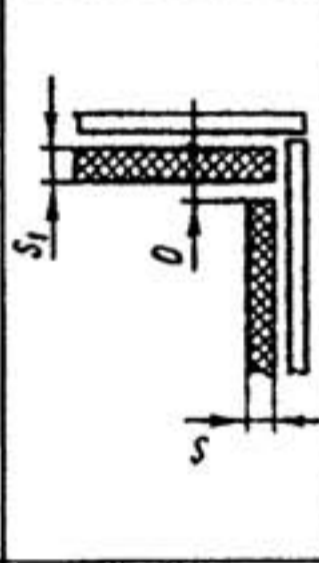
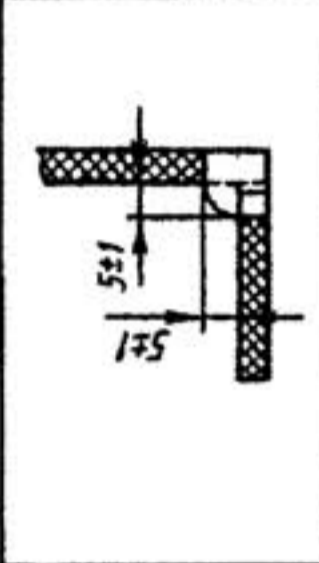
Сварные швы характеризуют способом выполнения сварки, технологическими и конструктивными особенностями: односторонняя или двусторонняя сварка, наличие одной или двух дополнительных накладок, их размеры, а также размеры сварного шва — ширина ( $b$ ) и длина ( $l$ ).

Для некоторых методов сварки наиболее широко применяемых полиэтиленовых пленок толщиной 30–500 мкм конструктивные особенности сварных соединений и швов стандартизованы ОСТ 1.41117–87 (табл. 5.5). В этом стандарте приняты следующие условные обозначения методов сварки: ГТ — газовыми теплоносителями без присадки; К — контактно-тепловая; КТИ — термоимпульсная; ИК — инфракрасным излучением; ЭП — экструдированной присадкой.

**Условные обозначения изображения и размеры (мм)  
сварных соединений полиэтиленовых пленок согласно ОСТ 1.41117-87**

Тип соединения	Характер выполненного шва	Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		Способ сварки	$S = S_1$	$b$	
			подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения				
1	2	3	4	5	6	7	8	
стыковое	Односторонний без дополнительных накладок	$C_1$			ЭП	0,03-0,5	—	
	Двусторонний без дополнительных накладок	$C_2$			ЭП	0,2-0,5	—	
	Односторонний с одной дополнительной накладкой	$C_3$				К	0,03-0,1	$4_{-1}^{+2}$
		$C_4$	КТИ			0,03-0,2	$4_{-1}^{+2}$	
	Двусторонний с одной дополнительной накладкой	$C_5$				К	0,1-0,2	$4_{-1}^{+2}$
		$C_6$				КТИ	0,2-0,5	$6_{-1}^{+2}$
	Двусторонний с двумя накладками	$C_7$				К	0,03-0,2	$5_{-1}^{+2}$
						КТИ		

1	2	3	4	5	6	7	8	
Нахлест- точное	Односторонний	H <sub>1</sub>			К	0,03-0,1	$4_{-1}^{+2}$ (для $S=0,03+0,2$ ); $6_{-1}^{+2}$ (для $S=0,2+0,5$ )	
		H <sub>2</sub>			КТИ ГТ ИК	0,03-0,2 0,03-0,2 0,03-0,5		
		H <sub>3</sub>			КТИ	0,2-0,5		
	Односторонний с наружной укладкой экструдата	H <sub>4</sub>				ЭП	0,03-0,2	—
		H <sub>5</sub>				ЭП	0,03-0,5	
			H <sub>6</sub>				ЭП	
Т-образное	Односторонний	P <sub>1</sub>			К	0,03-0,1	$4_{-1}^{+2}$ (для $S=0,03+0,2$ ); $6_{-1}^{+2}$ (для $S=0,2+0,5$ )	
		P <sub>2</sub>			КТИ ГТ	0,03-0,2		
		P <sub>3</sub>			ИК	0,03-0,5		
		P <sub>4</sub>			КТИ	0,2-0,5		

1	2	3	4	5	6	7	8
Т-образное	Двусторонний с дополнительной накладкой	P <sub>5</sub>			КТИ ИК	0,03-0,5	$4_{-1}^{+2}$ (для $S=0,03+0,1$ ); $6_{-1}^{+2}$ (для $S=0,1+0,2$ ); $8_{-1}^{+2}$ (для $S=0,2+0,3$ ); $10_{-1}^{+2}$ (для $S=0,3+0,5$ )
	Односторонний с наружной укладкой экструдата	P <sub>6</sub>			ЭП	0,2-0,5	—
	Односторонний с заделкой кромок	P <sub>7</sub>			ЭП	0,2-0,5	—
	Односторонний, оплавленный	O			ГТ	0,3-0,5	$1 \pm 0,5$ (для $S=0,05+0,1$ ); $2 \pm 1$ (для $S=0,1+0,2$ ); $3 \pm 2$ (для $S=0,2+0,5$ )
Угловое	Односторонний со съёмными подкладками	У <sub>1</sub>			ЭП	0,2-0,5	—

Указанные в табл. 5.5 соединения могут быть выполнены также с помощью других способов сварки и с использованием других материалов [5]. Так, соединения типа  $C_3-C_8$ ,  $H_1-H_3$ ,  $P_1-P_5$  могут быть выполнены ультразвуковой или высокочастотной сваркой. В качестве материалов могут применяться пленки, хорошо свариваемые данным способом: полипропиленовые, поливинилхлоридные, полиэтилентерефталатные, полиамидные и т. д.

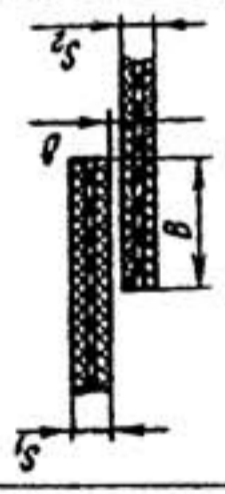
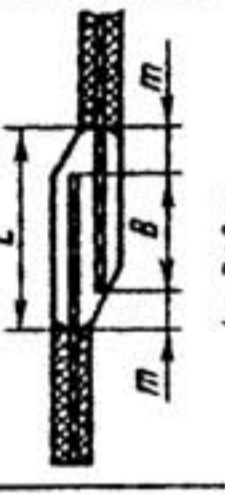
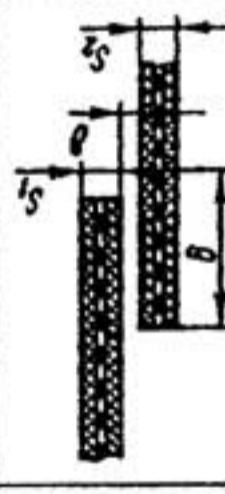
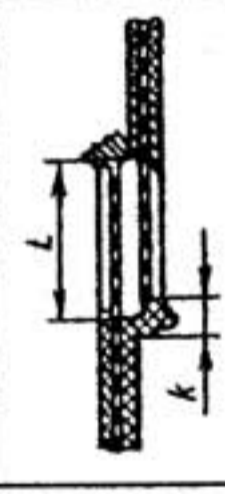
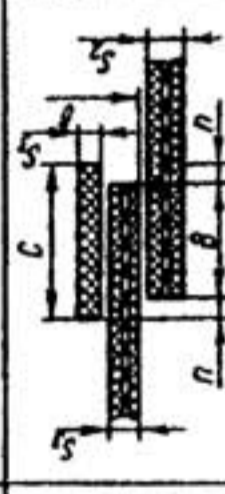
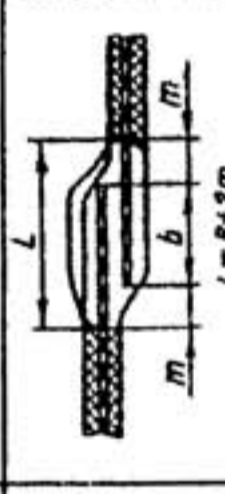
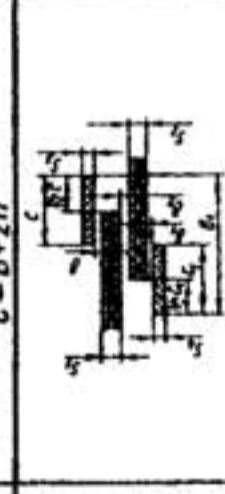
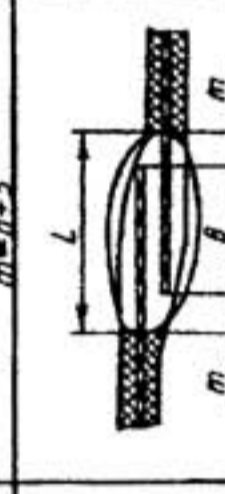
В нагруженных силовых конструкциях мягкой тары могут применяться высокопрочные армированные пленки толщиной 0,5–1,5 мм. Они представляют собой ткани из различных материалов, на которые с одной или двух сторон нанесено пленочное покрытие из полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида, полиамида и других термопластов.

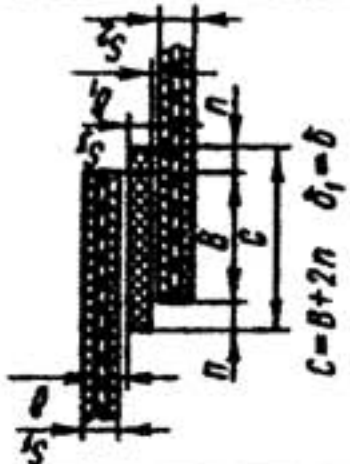

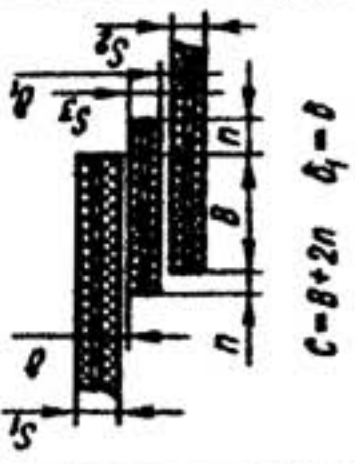
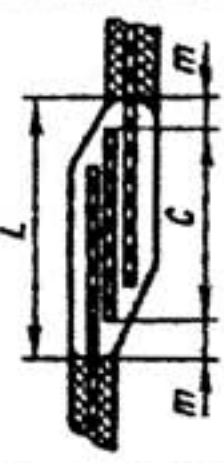
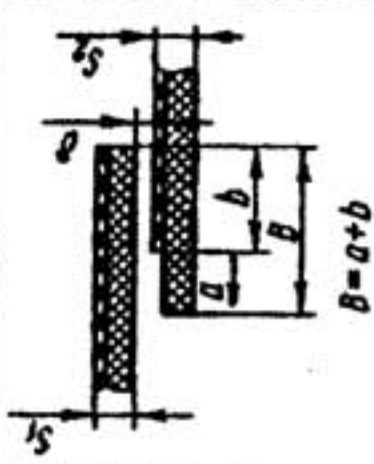
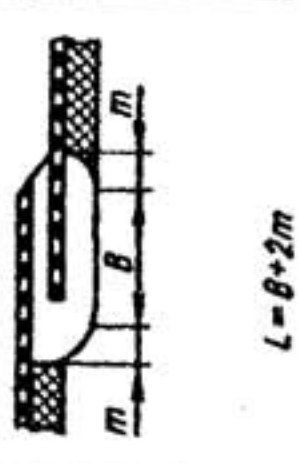
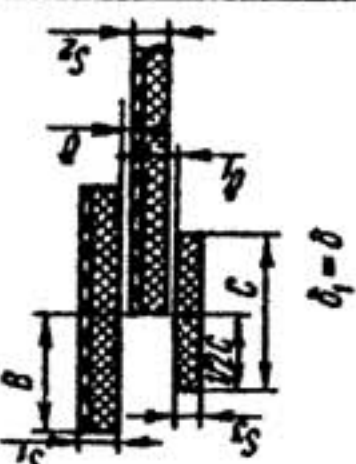
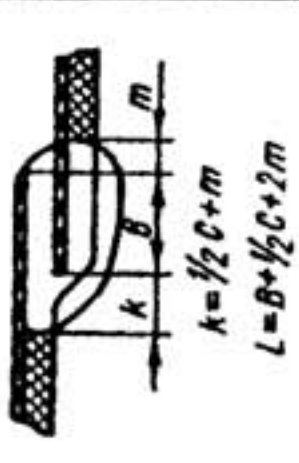
Основные типы сварных соединений из таких армированных пленок, выполненные контактно-тепловой прессовой сваркой, определены ОСТ 102.47–78. Условные изображения и обозначения нахлесточных и Т-образных типов сварных соединений, конструктивные элементы и размеры свариваемых деталей и швов, установленные указанным стандартом, приведены в табл. 5.6 и 5.7.

К особенностям сварных соединений из армированных пленок (за исключением соединения  $H_2$ ) следует отнести требование заплавления кромок швов слоем термопласта. Этот слой герметизирует шов и образует плавный переход к основному материалу. Толщина материала шва должна быть не менее одинарной толщины свариваемой пленки.

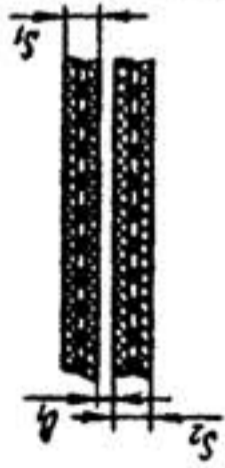
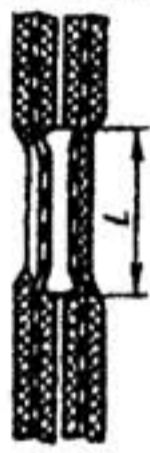
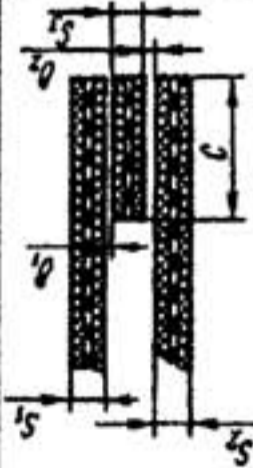
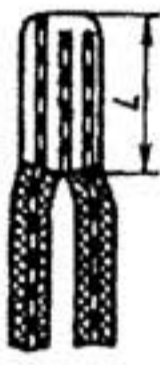
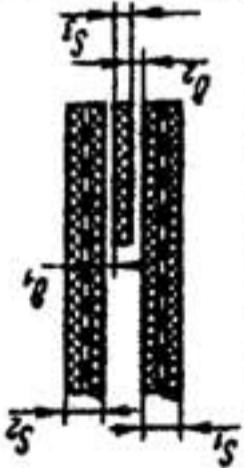
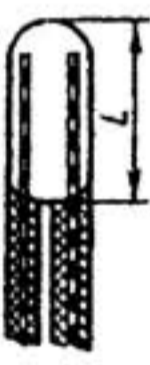
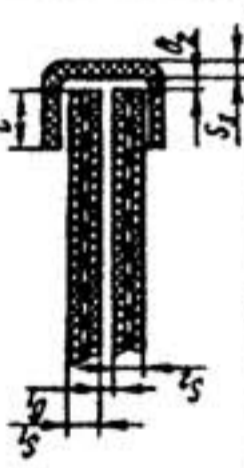
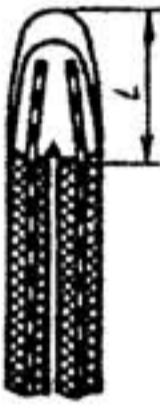
Сварные соединения армированных пленок могут быть выполнены и другими видами сварки, например термоимпульсной, высокочастотной прессовой, ультразвуковой. Кроме того, могут быть использованы и другие многослойные материалы с односторонним или двусторонним термопластичным покрытием, хорошо свариваемым данным методом.

**Условные обозначения, изображения и размеры (мм)  
нахлесточных сварных соединений армированных пленок,  
выполненных контактной тепловой (термоконтактной) прессовой сваркой**

Характер выполненного шва	Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		$S_1 = S_2$	$S_3$	$S_4$	$B$	$b$	$\delta$	$m$	$L$	$n$	$c$	$k$	$a$
		подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Двусторонний	$H_1$			0,5- 1,5	—	—	15- 50	—	0	не бо- лее 5	не бо- лее 60	—	—	—	—
Двусторонний без заделки кромок	$H_2$			0,5- 1,5	—	—	20- 50	—	0	—	20- 50	—	—	не бо- лее 5	—
Двусторонний с дополнительной накладкой	$H_3$			0,5- 1,5	не бо- лее 1	—	15- 40	—	0	—	не бо- лее 60	5- 10	30- 50	—	—
Двусторонний с двумя дополнительными накладками	$H_4$			0,5- 1,5	не бо- лее 1	не бо- лее 1	20- 30	—	0	не бо- лее 5	не бо- лее 70	—	20- 30	—	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Двусторонний с внутренней неармированной прокладкой	H <sub>5</sub>	 $C = B + 2n$ $\delta_1 = \delta$	 $L = C + 2m$	0,5-1,5 0,5-1	15-30	—	—	—	0	не более 5	не более 60	5,0	25-50	—	—
Двусторонний с внутренней армированной прокладкой	H <sub>6</sub>	 $C = B + 2n$ $\delta_1 = \delta$	 $L = C + 2m$	0,5-1,5 0,5-1,5	15-30	—	—	—	0	не более 5	не более 50	5,0	не более 50	—	—
Двусторонний	H <sub>7</sub>	 $B = a + b$	 $L = B + 2m$	0,5-1,5	—	—	—	20-30	0	не более 5	не более 60	—	—	—	10-20
Двусторонний с дополнительной неармированной прокладкой	H <sub>8</sub>	 $\delta_1 = \delta$	 $k = \frac{1}{2} C + m$ $L = B + \frac{1}{2} C + 2m$	0,5-1,5 0,5-1,5	—	—	—	20-30	0	не более 5	не более 60	—	20-30	—	—

**Условные обозначения, изображения и размеры (мм)  
Т-образных сварных соединений (рантовых) армированных пленок,  
выполненных контактной тепловой (термоконтактной) прессовой сваркой**

Характер выполненного шва	Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	c	L
		подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Двусторонний без дополнительных накладок	P <sub>1</sub>			0,5-1,5	0,5-1,5	—	0	—	—	30-50
Двусторонний с внутренней армированной прокладкой	P <sub>2</sub>			0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0	0	20-50	не более 60
Двусторонний с дополнительной неармированной прокладкой	P <sub>3</sub>			0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0	0	20-50	не более 60
Двусторонний с дополнительной армированной накладкой	P <sub>4</sub>			0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1	0	не более 2	20-40	не более 60



### 5.2.3. Основы расчета сварных соединений на прочность

При проектировании сварной конструкции мягкой тары из полимерных пленочных материалов встречаются два принципиальных решения:

- 1) прочность сварного соединения не ниже прочности основных материалов;
- 2) прочность сварного соединения ниже прочности свариваемых элементов, поэтому несущую способность конструкции мягкой тары определяет сварное соединение.

Расчет сварных соединений на прочность выполняют с учетом только рабочих напряжений в швах. Напряжения, возникающие вследствие совместных деформаций основного материала и шва, а также остаточные напряжения в расчете не учитывают, хотя при разработке технологии изготовления сварных конструкций мягкой тары влияние их следует иметь в виду.

Прочность сварных соединений полимерных пленок, полученных при использовании оптимальных методов и режимов сварки, определяется главным образом свойствами полимерного материала и характером распределения напряжений при работе соединения. Исследования напряжений в наиболее часто применяемых при производстве мягкой тары нахлесточных и Т-образных сварных соединениях [33] показали следующее.

В нахлесточном соединении (рис. 5.37, а) в сечении I-I по основному материалу при растяжении возникают равномерно распределенные напряжения  $\sigma_p$ . В сечении II-II по сварочному шву напряжения  $\sigma_{ш}$  также распределены равномерно:  $\sigma_{ш 2a} = \sigma_{ш 2б}$ , но напряжения в шве меньше, чем напряжения в основном материале:  $\sigma_{ш} < \sigma_p$ . В сечении III-III по околошовной зоне напряжения в точках 3а и 3б различаются между собой по величине. Максимальное напряжение характерно для точки 3а в месте резкого изменения размера поперечного сечения при переходе от околошовной зоны к шву. Поэтому разрушение нахлесточных сварных соединений в основном происходит на околошовной зоне и начинается у точки 3а, а их прочность всегда несколько уступает прочности основного материала.

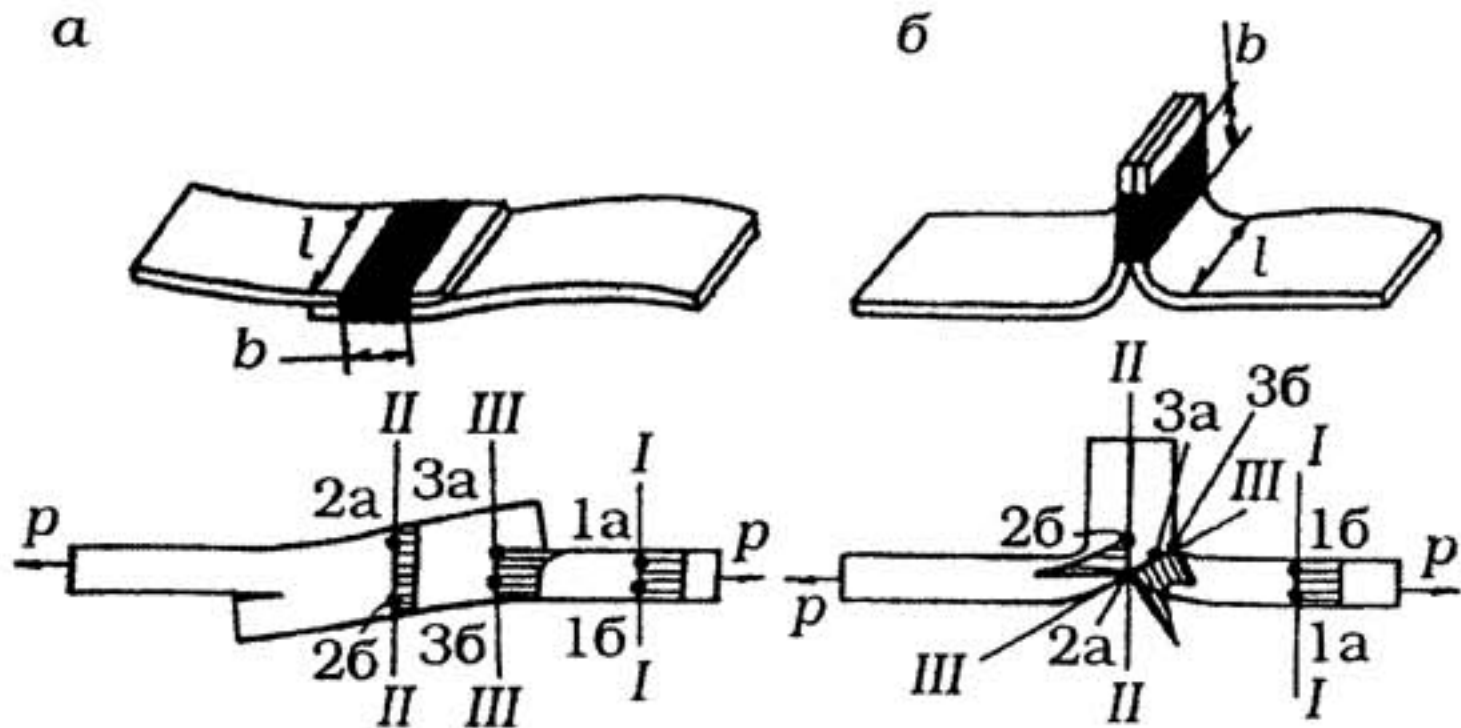


Рис. 5.37. Нахлесточное (а) и Т-образное (б) соединения полимерных пленочных материалов мягкой тары и характер распределения напряжений в сварных швах

В Т-образных сварных соединениях (рис. 5.37, б) в сечении I-I по основному материалу также возникают равномерно распределенные растягивающие напряжения  $\sigma_p$ . В сечении II-II по плоскости сварки напряжения распределены неравномерно. Максимальное напряжение, значительно превосходящее  $\sigma_p$ , наблюдается в точке 2а, расположенной в устье шва. Это место является концентратором напряжения типа надреза. Напряжение в точке 2б равно нулю. Напряжения в точках 3а и 3б сечения III-III меньше, чем в точке 2а, но больше, чем в точках 1а и 1б сечения I-I. Поэтому разрушение Т-образных сварных соединений происходит преимущественно по линии устья шва.

Значения коэффициентов концентрации напряжений  $K_k$  в различных точках сварных соединений приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

**Значения коэффициентов концентрации напряжений  $K_k$  в различных точках сварных соединений полимерных пленочных материалов [22]**

Тип соединения	1а	1б	2а	2б	3а	3б
Нахлесточное	1,0	1,0	0,4	0,4	1,3	1,0
Т-образное	1,0	1,0	1,8	0,0	1,2	1,3

Величину  $K_K$  определяли как отношение напряжения в различных точках сварного шва к напряжению в основном материале:

$$K_K = \frac{\sigma_{ш}}{\sigma_p}. \quad (5.37)$$

Значительное влияние на прочность сварного соединения оказывает утонение свариваемого материала в зоне шва (рис. 5.38, а). Утонение материала в нахлесточных соединениях, работающих на сдвиг, значительно снижает прочность, поскольку нагрузку воспринимает сильно ослабленное сечение  $a-a$  (рис. 5.38, б). Кроме того, в месте перехода от утолщения 2 к тонкому шву создается дополнительная концентрация напряжений, что также приводит к ослаблению сварного соединения. Утонение в Т-образных соединениях, работающих на раздир, повышает прочность, так как нагрузку воспринимает утолщенная часть соединения 2 (рис. 5.38, в).

Для нахлесточных сварных соединений расчетную (эксплуатационную) нагрузку (усилие)  $P_э$  определяют из соотношения [33]

$$\frac{P_э}{0,7bl} \leq [\tau_{сд}], \quad (5.38)$$

где  $b$  и  $l$  — ширина и длина шва соответственно;  $[\tau_{сд}]$  — допустимое напряжение сдвига (среза),

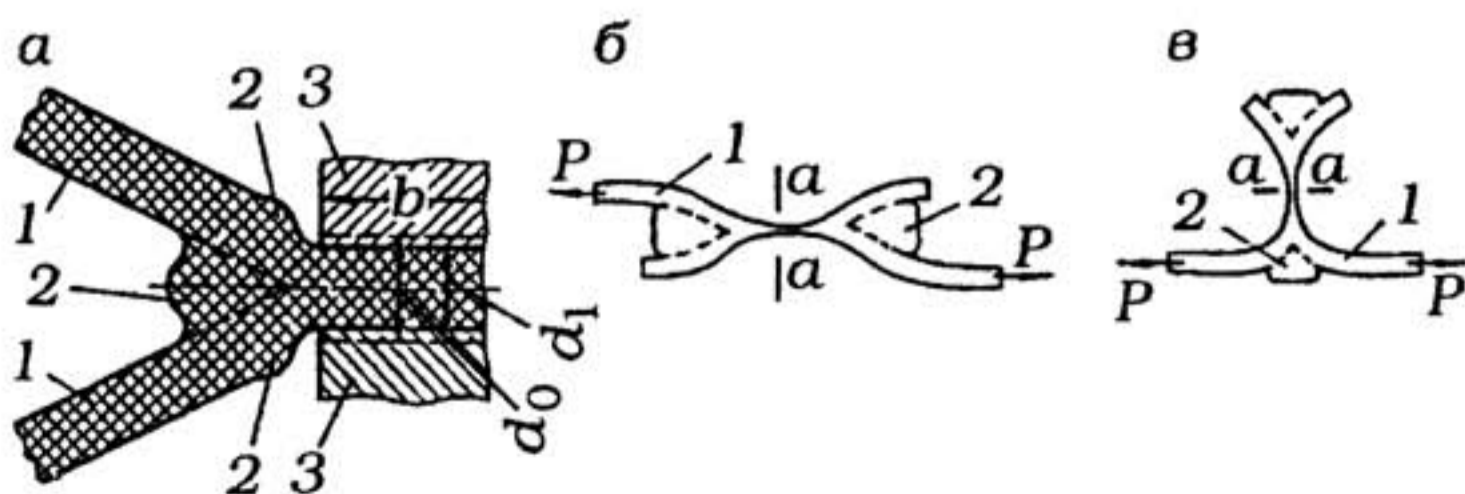


Рис. 5.38. Схема утонения шва и образования наплывов

в околошовной зоне в процессе сварки (а) и влияния наплывов на испытания нахлесточных (б) и Т-образных (в) сварных соединений

$$[\tau_{сд}] = \frac{\tau_{сд} K_c}{n}, \quad (5.39)$$

где  $\tau_{сд}$  — нормальное разрушающее напряжение сдвига (среза) для основного материала;  $K_c$  — относительная прочность сварного соединения;  $n$  — коэффициент запаса прочности.

Относительную прочность сварного соединения определяют как отношение разрушающего напряжения сварного шва  $\tau_{сд. ш}$  к разрушающему напряжению основного материала:

$$K_c = \frac{\tau_{сд. ш}}{\tau_{сд}}. \quad (5.40)$$

Экспериментально установлено [5, 33], что при контактно-тепловой сварке нахлесточных соединений ПЭВД, ПЭНД и ПП  $K_c \geq 0,9$ . Для некоторых видов сварки значения  $K_c$  приведены в табл. 5.9.

Коэффициент запаса прочности  $n$  зависит от вида прикладываемой к упаковке нагрузки, изменений рабочей температуры, агрессивности внешней и внутренней среды, климатических и других условий эксплуатации. Значения коэффициента  $n$  для сварных соединений некоторых термопластов приведены в табл. 5.10 и 5.11.

Максимальная деформация сварных соединений  $\epsilon_{св}$  не должна превышать допустимую деформацию  $\epsilon_{доп}$ :

$$\epsilon_{св} \leq \epsilon_{доп} = \frac{\epsilon_{гр}}{n_\epsilon}, \quad (5.41)$$

где  $\epsilon_{гр}$  — граничная деформация;  $n_\epsilon$  — коэффициент запаса допустимой деформации.

Значения  $\epsilon_{гр}$  и  $n_\epsilon$  для некоторых термопластов приведены в табл. 5.11.

Условия эксплуатации в табл. 5.11 классифицируются следующим образом.

I. Окружающая среда — воздух; статическая нагрузка при нормальной температуре и небольшом давлении; конструкция простой формы; в случае отказа конструкции опасность для окружающего персонала и оборудования отсутствует.

**Относительная прочность сварного соединения  $K_c$   
в зависимости от способа сварки и температуры  
окружающей среды**

Способ сварки	Материал	Относительная прочность			
		кратковременная		длительная	
		20 °С	60 °С	20 °С	60 °С
Газовым теплоносителем с присадкой	ПВХ	0,6	0,4	0,4	—
	ПЭНД	0,6	—	0,4	0,4
	ПП	0,6	—	0,4	0,4
Контактная тепловая	ПВХ	0,8	—	0,6	—
	ПЭНД	0,8–1,0	—	0,8	0,8
	ПП	0,8–1,0	—	0,8	0,8
Экструдированной присадкой	ПВХ	—	—	—	—
	ПЭНД	0,7	—	0,5	0,5
	ПП	—	—	—	—

Таблица 5.10

**Коэффициенты запаса прочности  $n$   
сварных соединений для конструкций из винипласта**

Условия эксплуатации	$n = 1 \div 1,4$	$n = 1,5 \div 2,2$	$n = 2,3 \div 3$
Механическая нагрузка	статическая	статическая	динамическая
Рабочая температура	постоянная	постоянная	переменная
Среда	неагрессивная	неагрессивная	агрессивная
Климатические условия	в помещении	на открытом воздухе	на открытом воздухе

Таблица 5.11

**Коэффициент запаса прочности  $n$   
для сварных соединений из термопластов  
исходя из требований прочности и допустимой деформации**

Условия эксплуатации	ПВХ, $n$	ПВХ, $n_\epsilon$ ( $\epsilon_{гр} = 0,8$ )	ПЭВД, $n$	ПП, $n_\epsilon$ ( $\epsilon_{гр} = 2,5$ )
I	2,5	0,7–1	1,3–1,5	1,5–1,7
II	3,4	1–1,1	1,5–1,8	1,8–2
III	5	1,3	2–2,2	2,2–3

II. Статическая нагрузка при переменной температуре и среднем давлении; конструкция простой формы; в случае отказа конструкции опасность отсутствует.

III. Изменяющаяся нагрузка при переменной температуре и высоком давлении; наличие сред, не оказывающих химического воздействия; конструкция сложной формы; в случае отказа конструкции имеется опасность для персонала, окружающих устройств.

Разрушающее напряжение сдвига нахлесточного соединения определяют по результатам испытаний на растяжение по формуле

$$\tau_{\text{сд}} = \frac{P_p}{bl}, \quad (5.42)$$

где  $P_p$  – разрушающее усилие.

Процесс изготовления мягкой тары совмещен с процессом заполнения ее продукцией. Поэтому на сварные швы могут попадать частицы заполняемого продукта. Особенно часто это встречается при заполнении тары жидкой и порошкообразной продукцией. На рис. 5.39 показаны стадии получения упакованной порошкообразной продукции в мягкую тару типа «пакет» с одним продольным и двумя поперечными швами. Заполненная дозой продукта цилиндрическая пленочная заготовка с продольным и нижним сварными швами подается вниз на расчетное расстояние (рис. 5.39, а). После этого встречным движением сварочных электродов горизонтального шва приводятся в соприкосновение противоположные стороны цилиндрической пленочной заготовки (рис. 5.39, б). Из-за негерметичности дозирующего устройства в зону сварного шва могут попадать частицы заполняемого продукта. При сварке продольного шва происходит укупоривание заполненного нижнего пакета и оформление нижнего шва верхней заготовки пакета. Горячие прилегающие к свариваемым швам участки полимерной пленки контактируют с продуктом (рис. 5.39, в), поэтому швы и околошовная зона могут содержать вплавления продукта, являющиеся концентратором напряжений и снижаю-

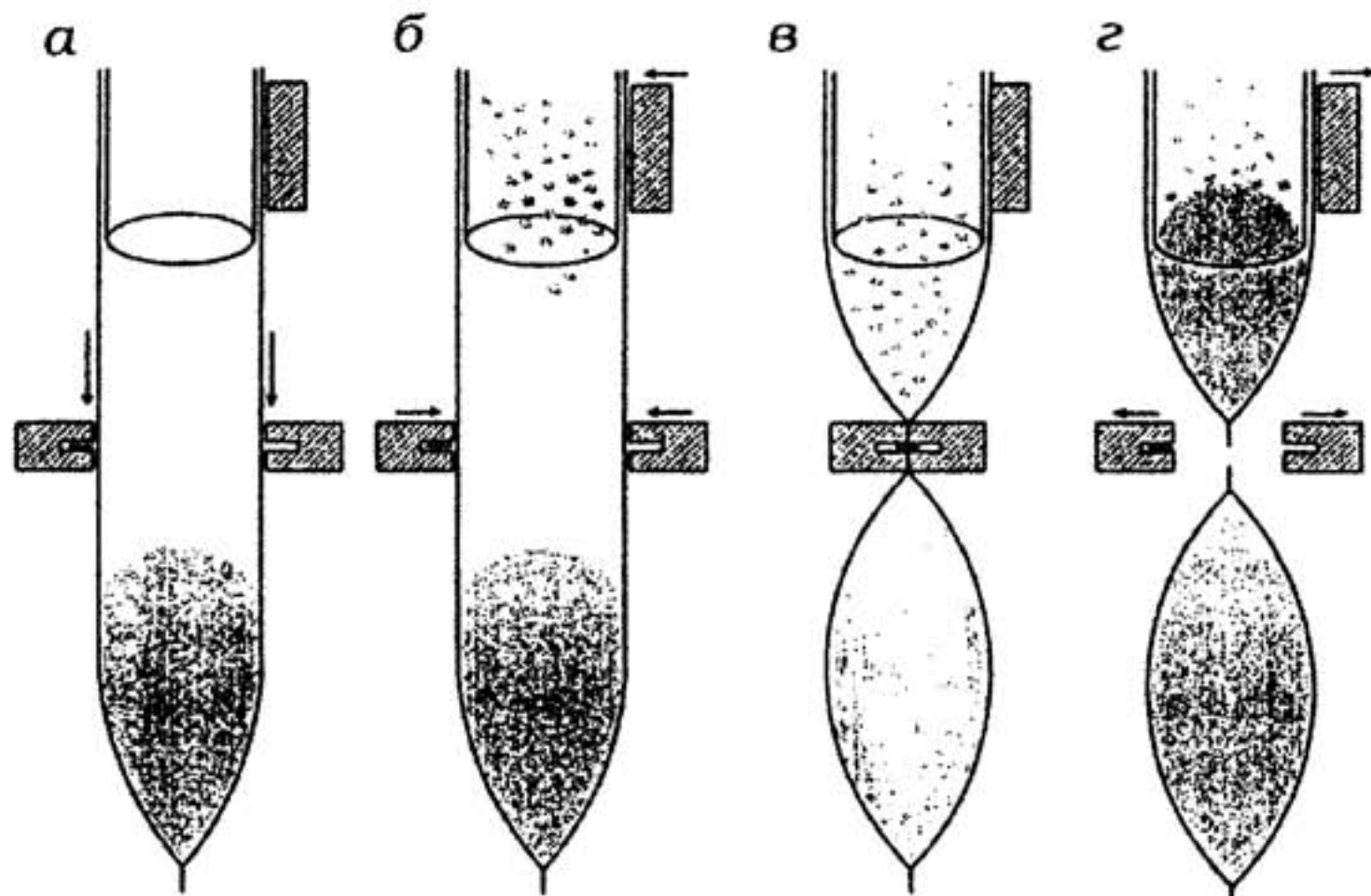


Рис. 5.39. Схема совмещенных процессов изготовления мягкой тары и заполнения ее продукцией

щие прочность упаковки. После завершения сварки горизонтальный шов разрезается (рис. 5.39, г), упакованная продукция отделяется, а верхняя цилиндрическая заготовка заполняется дозой продукта и процесс повторяется.

Существует и другой механизм снижения качества и уменьшения прочности сварного шва под влиянием упаковываемой продукции. После завершения процесса сварки нижний шов заготовки мягкой тары имеет расчетную ширину  $b_1$  (рис. 5.40). Под действием веса упакованной продукции горячий сварной шов деформируется и в некоторых местах может иметь меньшую ширину  $b_2$ :  $b_1 > b_2$ .

Оба механизма снижения качества и уменьшения прочности сварных швов зависят от свойств материала мягкой тары и упаковываемого продукта. Интенсивность их взаимодействия можно оценить коэффициентом снижения прочности сварного шва под действием упаковываемого продукта

$$K_{уп} = \frac{\sigma_{уп}}{\sigma_{ш}}, \quad (5.43)$$

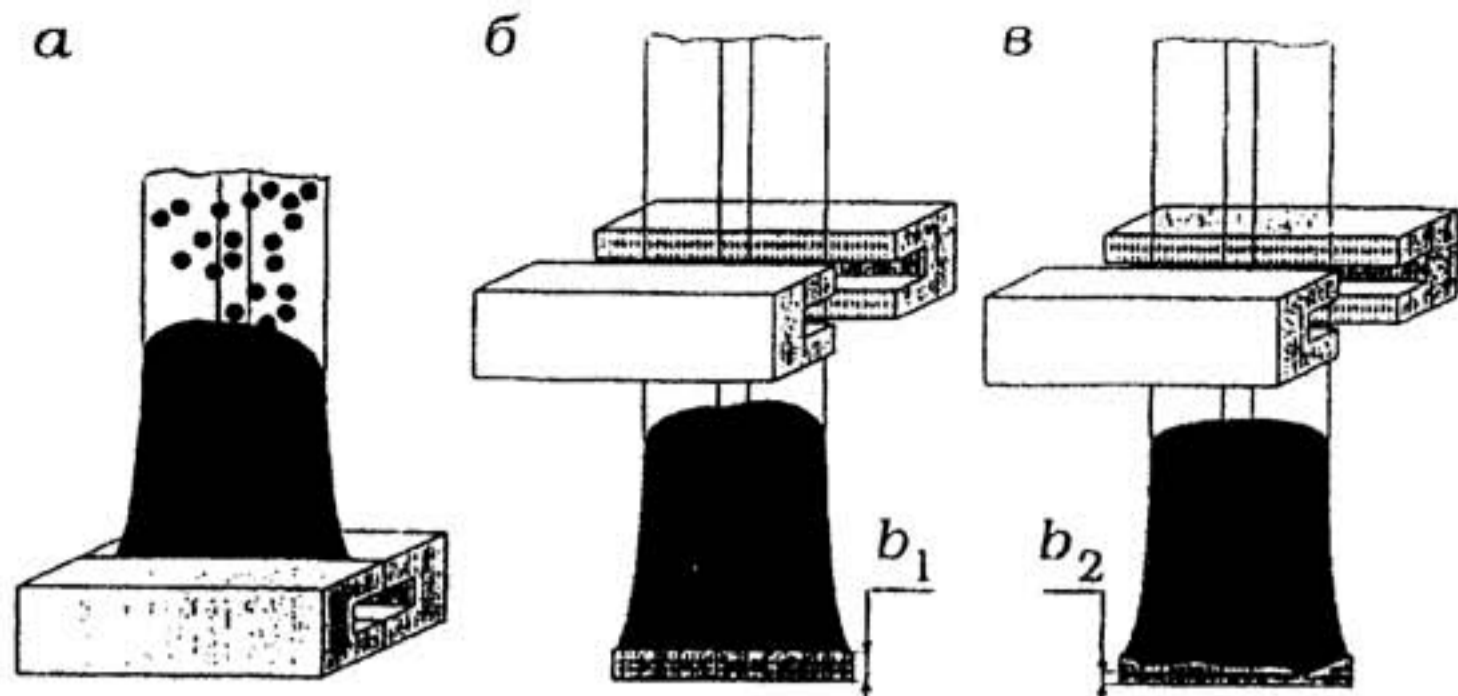


Рис. 5.40. Влияние упаковываемой продукции на качество сварных соединений:

а — сварка шва и одновременное заполнение продукцией;  
 б — качественный сварной шов; в — влияние продукции на качество шва

где  $\sigma_{уп}$  — прочность шва под воздействием упаковываемого продукта;  $\sigma_{ш}$  — прочность чистого сварного шва.

О влиянии различных упаковываемых продуктов на прочность сварных швов мягкой тары из некоторых полиолефинов можно судить по табл. 5.12.

С учетом коэффициента снижения прочности сварного шва  $K_{уп}$  под действием упаковываемого продукта уравнение (5.39) будет иметь вид

$$[\tau_{сд}] = \frac{\tau_{сд} K_c K_{уп}}{n}. \quad (5.44)$$

В случаях, когда прочность сварного шва соизмерима с прочностью основного материала, мягкую тару испытывают на разрушение избыточным давлением сжатого воздуха (рис. 5.41). Мягкую тару 8 помещают на неподвижную опору стенда 1, с помощью подвижного кронштейна 2 к ней подводят прибор для испытаний 5. Заостренным наконечником штуцера 6 протыкают стенку мягкой тары и с помощью линии 3 подают сжатый воздух. Герметизацию между штуцером 6 и мягкой тарой осуществляют с помощью уп-



### Влияние упаковываемой продукции на прочность сварных швов мягкой тары из некоторых полиолефинов [27]

Упаковываемая продукция	Материал мягкой тары					
	Ламинат ОРА/ЕХАСТ		ЕХАСТ		LLDPE	
	Прочность, мбар	$K_{уп}$	Прочность, мбар	$K_{уп}$	Прочность, мбар	$K_{уп}$
Без продукта	920	1,00	125	1,00	156	1,0
Смазочное масло	955	1,04	—	—	—	—
Кофе	925	1,01	—	—	—	—
Растительное масло	900	0,98	—	—	—	—
Вода	890	0,97	121	0,97	162	1,04
Мыльный раствор	875	0,95	—	—	—	—
Спирт	720	0,78	—	—	—	—
Лимонный сок	650	0,71	—	—	—	—
Апельсиновый сок	610	0,66	—	—	—	—
Молоко	590	0,64	120	0,96	0	0
Воздух	—	—	120	0,96	143	0,92
Оливковое масло	—	—	113	0,90	147	0,94
Томатный сок	—	—	125	1,00	152	0,97

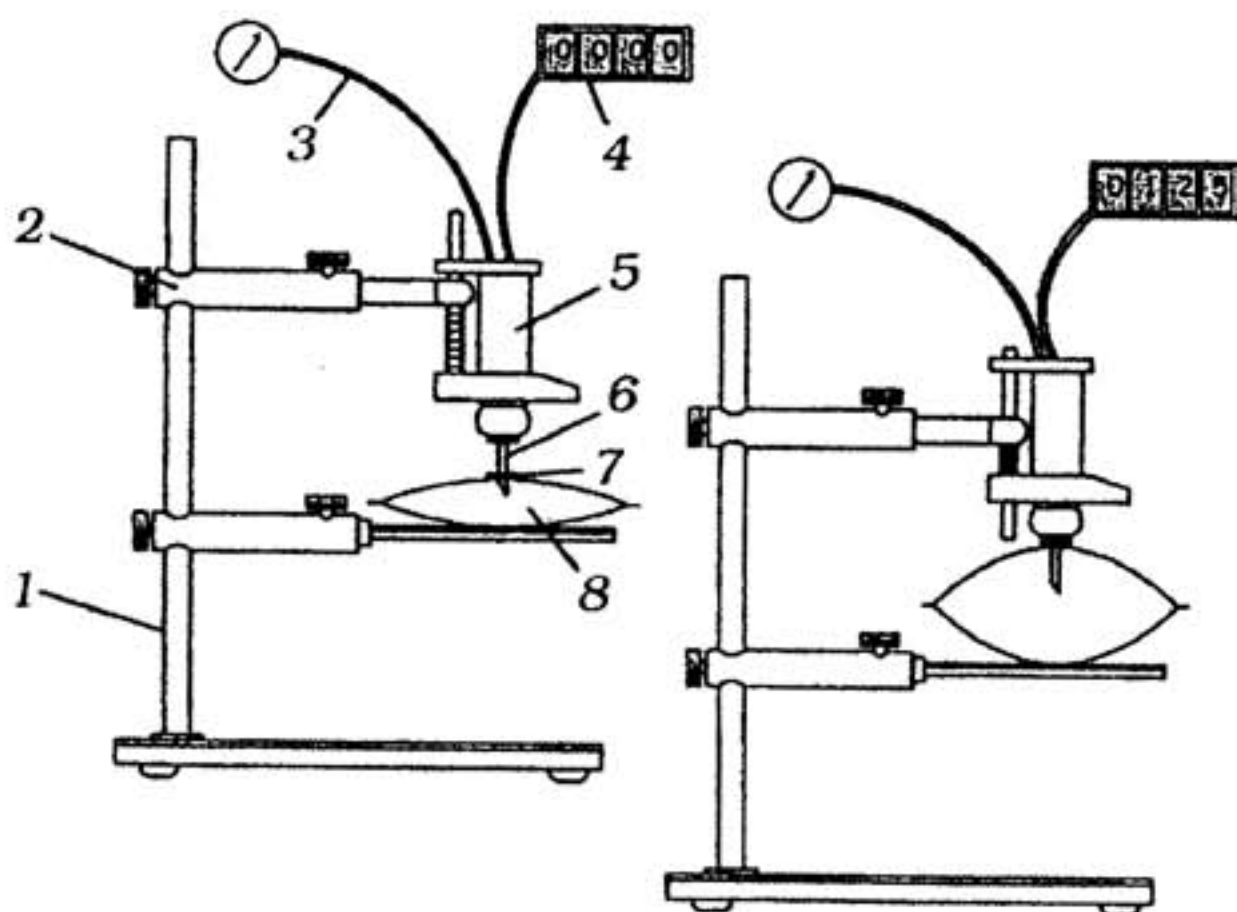


Рис. 5.41. Схема испытаний мягкой тары на разрушение:  
 1 — стеллаж для испытаний; 2 — подвижный кронштейн;  
 3 — линия подачи сжатого воздуха; 4 — регистратор давления  
 в мягкой таре; 5 — прибор для испытаний; 6 — игла;  
 7 — уплотнительные прокладки; 8 — мягкая тара



*Рис. 5.42. Зависимость результатов испытаний мягкой тары из ПЭНД на разрушение от технологических режимов ее изготовления*

лотнительных прокладок 7. Регистратор 4 фиксирует давление в мягкой таре.

Давление разрушения может служить критерием оценки качества сварных соединений, определять влияние процесса сварки на околошовную зону, а также производить оптимизацию технологических режимов изготовления мягкой тары (рис. 5.42).

### **5.3. Расчет расхода материалов на производство мягкой тары**

Расход материалов на производство мягкой тары зависит от вида упаковываемого продукта и массы упаковываемой дозы  $m$ . По этим заданным характеристикам рассчитывают объем упаковываемой дозы  $V_d$ :

$$V_d = \frac{m}{\rho}. \quad (5.45)$$

В случае жидкой или твердой штучной продукции под  $\rho$  понимают удельный вес или плотность. Для сыпучей продукции  $\rho$  выполняет роль насыпного веса.

Далее с учетом коэффициента заполнения мягкой тары продукцией  $K_3$  определяют объем мягкой тары:

$$V_{\text{МТ}} = \frac{V_{\text{Д}}}{K_3}. \quad (5.46)$$

Исходя из объема мягкой тары  $V_{\text{МТ}}$ , технических характеристик упаковочного автомата, дизайнерских решений, требований заказчика и т. п., определяют габаритные размеры мягкой тары:

$$V_{\text{МТ}} = l_{\text{T}} \times b_{\text{T}} \times h_{\text{T}}, \quad (5.47)$$

где  $l_{\text{T}}$ ,  $b_{\text{T}}$ ,  $h_{\text{T}}$  — длина, ширина и высота (или толщина) мягкой тары соответственно.

Затем рассчитывают основные размеры развертки упаковки. Например, для упаковочных автоматов с горизонтальной подачей продукта основными размерами развертки упаковки являются ширина  $B_{\text{r}}$  и длина  $L$  полимерной пленки (рис. 5.43). Их определяют по формуле [45]

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{r}} &= 2(b_{\text{T}} + h_{\text{T}} + c), \\ L &= l_{\text{T}} + 2(h_{\text{T}} + c), \end{aligned} \right\} \quad (5.48)$$

где  $c$  — припуск на сгиб и ширину продольного шва.

В зависимости от конструкции сварного шва и особенностей материала мягкой тары значение  $c$  выбирают в пределах 15–25 мм.

По известным значениям  $B_{\text{r}}$  и  $L$  можно определить:

количество пакетов мягкой тары из 1 м<sup>2</sup> пленки

$$n_{\text{M}} = \frac{1}{B_{\text{r}} L}, \quad (5.49)$$

где  $B_{\text{r}}$  и  $L$  выражены в метрах;

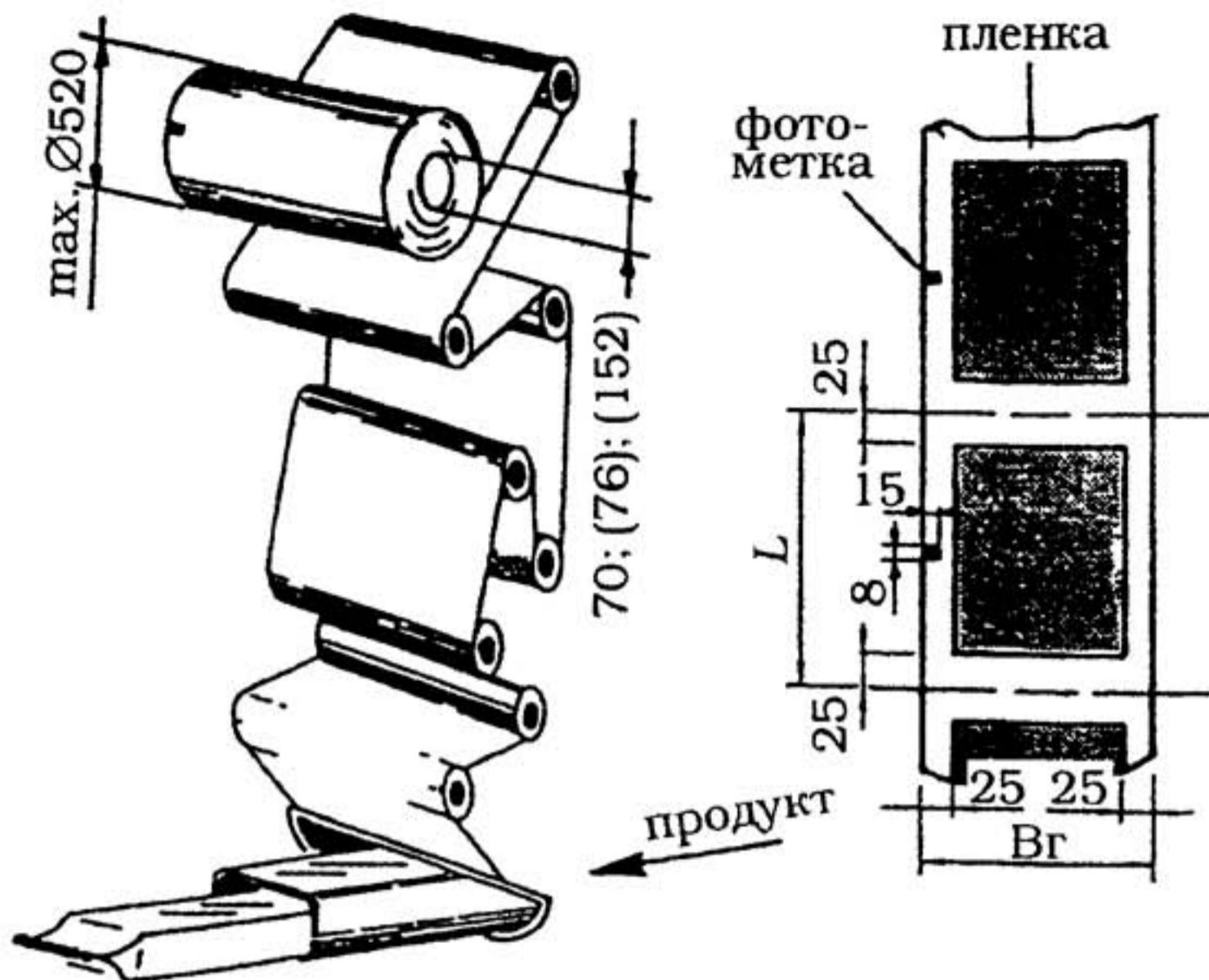


Рис. 5.43. Схема определения расхода пленки в зависимости от массы дозы упаковываемого продукта

количество пакетов из 1 кг пленки

$$n_{\text{в}} = \frac{1}{B_{\text{г}} L \delta \rho}, \quad (5.50)$$

где  $\delta$  — толщина пленки, м;  $\rho$  — плотность пленки, кг/м<sup>3</sup>.

Количество пленки в м<sup>2</sup>, получаемой из 1 кг полимера, можно определить по формуле

$$S_{\text{п}} = \frac{1}{\delta \rho}. \quad (5.51)$$

## **6. ПРОИЗВОДСТВО СКЛАДНЫХ КОРОБОК И ЯЩИКОВ ИЗ КАРТОНА И ГОФРОКАРТОНА**

---

Складные коробки и ящики из картона и гофрокартона являются самым популярным и широко применяемым видом тары. Объяснение этому кроется в их низкой стоимости, удобстве автоматического выполнения с ними основных технологических операций: изготовления, сборки, заполнения продукцией, укупоривания, штабелирования и т. д. Способность к складыванию в плоские заготовки позволяет экономить место при их хранении и транспортировке заказчику. При полиграфическом оформлении может быть использован практически любой способ печати и отделки, поэтому складные коробки отличаются прекрасным внешним видом, необычайным разнообразием дизайнерских решений. Они имеют различные конструкции и широкий ряд типоразмеров.

Складные коробки и ящики из картона и гофрокартона используются преимущественно для упаковки продовольственных товаров, фармацевтической продукции, изделий химической промышленности, например, стиральных порошков и др. В США производством складных коробок занято около 600 заводов, перерабатывающих 3 млн. тонн картона. Их объем продаж превышает 1 млрд. долларов. Ниже приведено распределение используемых в США складных коробок и ящиков по видам упаковываемой продукции.

## Распределение складных коробок и ящиков из картона и гофрокартона по видам упаковываемой продукции

Вид упаковываемой продукции	Объем использования коробок, %
Продовольственные товары .....	47
Фармацевтическая продукция .....	9
Стиральные порошки .....	8
Скобяные товары .....	8
Перевозка напитков .....	7
Ассортиментные коробки .....	5
Текстиль .....	3
Остальное .....	13

### 6.1. Основные требования к складным коробкам и ящикам

Основные требования к складным коробкам и ящикам из картона и гофрокартона продиктованы важнейшими функциями упаковки.

Такие функции упаковки, как защитная, транспортная и хранения, предполагают длительное сохранение у коробок и ящиков стабильности формы, способности к амортизации ударов, прочности при сжатии и растяжении, пригодности к штабелированию и т. п. Практически все перечисленные свойства зависят от соотношения объема коробки, массы упакованного в ней продукта и толщины картона, из которого изготовлены коробки. Некоторые рекомендуемые соотношения этих параметров приведены в табл. 6.1

Сохранение стабильности формы коробок и ящиков из картона и гофрокартона зависит от множества факторов. Картон отличается анизотропией свойств по длине и ширине листа. В машинном направлении (по длине листа) в процессе изготовления картона происходит преимущественная ориентация

**Ориентировочная зависимость  
толщины картона от объема складной коробки  
и массы содержащегося в ней продукта**

Объем коробки, см <sup>3</sup>	Масса продукта, г	Толщина картона, мм
до 325	до 110	0,45
325–650	110–225	0,50
650–980	225–340	0,55
980–1300	340–450	0,60
1300–1800	450–560	0,65
1800–2450	560–680	0,70
2450–3250	680–900	0,75
3250–4100	900–1130	0,80
4100–4900	1100–1700	0,90
4900–6150	1700–2250	1,00

макромолекул целлюлозы, приводящая к увеличению прочности и жесткости. Различие между прочностными свойствами в машинном и поперечном направлениях возрастает по мере увеличения толщины картона (рис. 6.1). Это явление следует учитывать при проектировании коробок. Наиболее прочное и жесткое машинное направление картона целесообразно располагать перпендикулярно высоте коробки (рис. 6.2). Это обеспечивает большую жесткость коробки по высоте, что способствует сохранению стабильности формы.

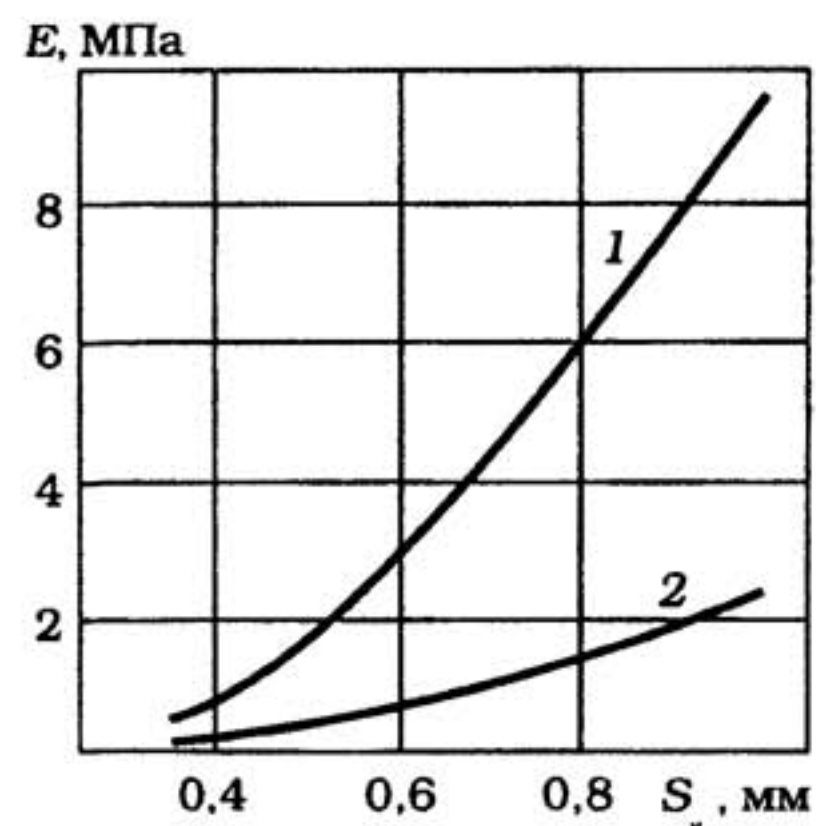


Рис. 6.1. Зависимость модуля упругости картона  $E$  от толщины в машинном (1) и поперечном (2) направлениях

Существенное влияние на прочность и жесткость, а следовательно, и на стабильность формы коробок оказывает влажность окружающей среды. Картон хорошо впитывает влагу, при этом значительно снижаются его прочностные свойства, особенно в машинном направлении (рис. 6.3). Эту осо-

бенность следует учитывать при выборе отделочных операций, которые должны не только значительно улучшать внешний вид упаковки, но и уменьшать влагопоглощение картона.

Оптимальное соотношение основных размеров коробок должно обеспечивать их хорошую устойчивость как при транспортировке и хранении, так и на витрине и стеллажах магазина. Коробки с товаром не должны падать, иначе теряется благоприятное впечатление при покупке. Вместе с тем габариты коробок необходимо выбирать в соответствии с размерами стандартных полок на складе или в магазине.

Увеличение объема производства и повышение производительности предъявляют новые требования к упаковке со стороны сфер распределения и розничной торговли. Прежде всего это сокращение затрат за счет рационализации распределения, экономии трудовых ресурсов и уменьшения потерь. Важность этих требований подчеркивается тем, что в среднем половина розничной цены товара приходится на затраты по его распределению и продаже.

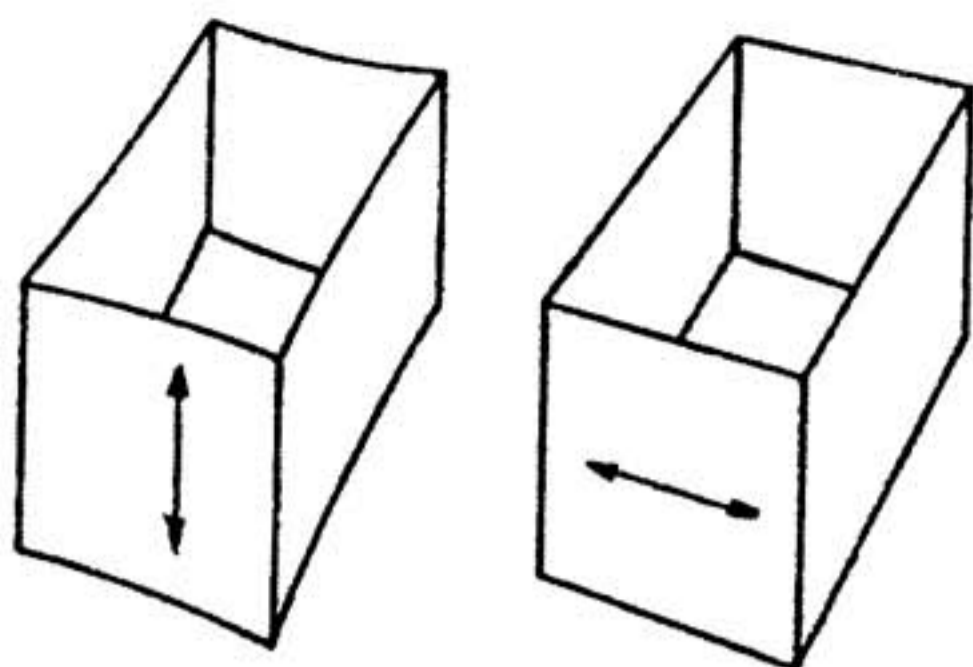


Рис. 6.2. Зависимость жесткости коробок от машинного направления картона

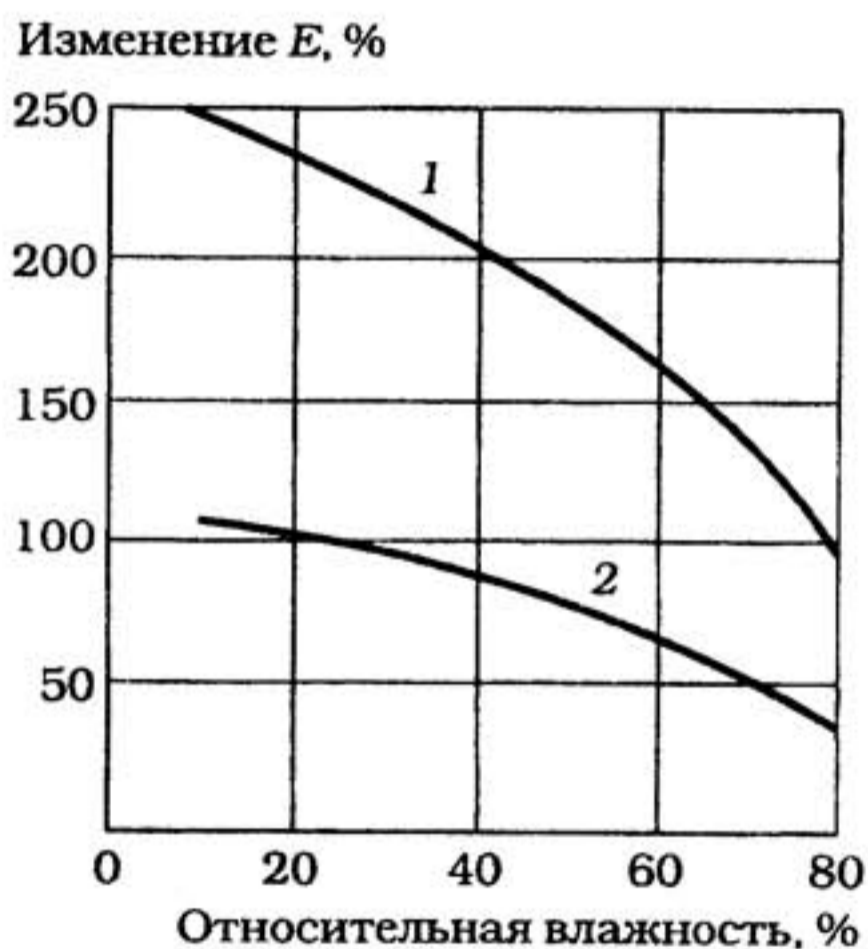


Рис. 6.3. Изменение модуля упругости картона от степени влажности в машинном (1) и поперечном (2) направлениях



Одним из наиболее эффективных путей снижения затрат на распределение и продажу является создание групповых модульных упаковок, пригодных для транспортировки, хранения и выкладки на стеллажи в магазинах. Для этого габаритные размеры коробок должны быть кратны размерам групповой модульной упаковки, которая, в свою очередь, создается с учетом размеров стандартных поддонов и магазинных стеллажей. Стандартные поддоны имеют размеры  $800 \times 1200$  мм и  $1000 \times 1200$  мм, готовая магазинная платформа —  $400 \times 600$  мм, стандартный роликовый контейнер —  $600 \times 800$  мм. Ширина магазинных стеллажей 900 мм, глубина полок 400 и 600 мм (рис. 6.4).

Важнейшим требованием к эксплуатационной функции упаковки является ее пригодность к автоматизированным процессам упаковывания и обработки на складах и в магазинах. Даже в высокоавтоматизированных производствах упаковывание продукции нередко является узким местом. Поэтому конструкция складных коробок из картона должна предусматривать возможность автоматизированной сборки коробок с последующими автоматизированными процессами упаковывания и формирования групповых модульных упаковок.

В магазинах самообслуживания индивидуальные потребительские коробки выполняют роль продавца. Они должны

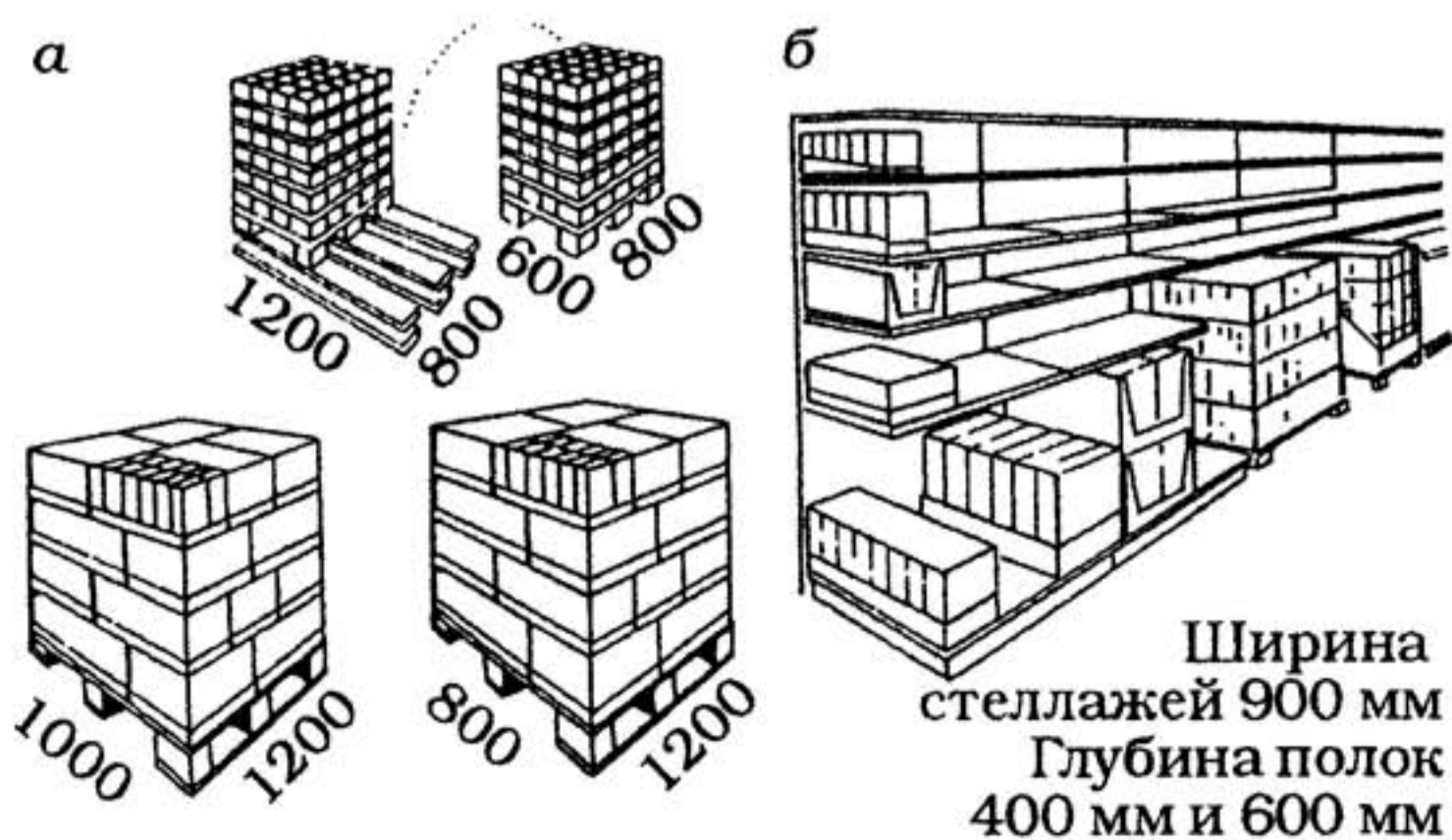


Рис. 6.4. Стандартные поддоны (а) и магазинные стеллажи (б) для размещения модульной упаковки

иметь привлекательный внешний вид и в полной мере выполнять требования информационной функции — отражать индивидуальные особенности товара, предоставлять необходимую информацию о нем, рекламу и т. п. Коробки, представляющие транспортную групповую упаковку, должны облегчать выкладку и обзор товаров. На них требуется меньше информации, чем на потребительских коробках. При тщательной разработке их внешнего вида, учитывая особенности укладываемой в них продукции, можно применять удачные дизайнерские решения при минимальных расходах на полиграфическое оформление.

## **6.2. Конструкции складных коробок и ящиков**

Рациональное конструктивное решение и определение расчетных параметров упаковки позволяют значительно уменьшить расход материала, трудоемкость при изготовлении, сборке и упаковывании продукции, а также сэкономить площадь и снизить трудозатраты при складировании, транспортировке и продаже.

При разработке конструкции складных коробок и ящиков из картона или гофрокартона учитывают качественные характеристики упаковываемого продукта, механические и физико-химические свойства материала упаковки, его цену и ряд других не менее важных показателей.

На первой стадии конструирования определяют основные характеристики коробок и ящиков: тип и толщину материала, вид отделки, основные габаритные размеры. Заканчивается первая стадия созданием трехмерного изображения упаковки, необходимых основных видов и сечений.

На второй стадии конструирования, которую можно назвать конструкторско-технологической, трехмерное изображение упаковки переводится в двухмерное плоское изображение ее заготовки, называемое разверткой или раскроем (выкройкой). По своей сути раскрой является технологическим чертежом заготовки, из которой впоследствии будет собрана короб-

ка или ящик. Раскрой должен изображать внешнюю (запечатываемую) сторону коробки и отражать особенности конструкции упаковки, технологии ее сборки и специфику процесса упаковывания.

Основные символы, используемые в чертежах раскроя складных коробок, приведены в табл. 6.2. Контуры собранной коробки или ящика, а также контуры их развертки изображаются основной толстой линией. Биговку, выполненную внутрь коробки вершиной биговочной канавки, показывают пунктирной линией. Если биговка вершиной канавки расположена наружу коробки,

Таблица 6.2

**Основные символы, используемые в чертежах раскроев складных коробок**

Символ на чертеже	Значение символа
	<p>Контур собранного ящика, коробки                      Контур развертки ящика, коробки                      Штампованные прорези                      Биговка внутрь                      Биговка наружу                      Насечка, рיצовка                      Двойная биговка                      Перфорация                      Линия мягкого или волнистого разреза (для предотвращения ранения)</p>
<b>СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ШВОВ</b>	
	<p>Сшивка скобами.                      Буквенный индекс S                      Склеивание при помощи клеевой бумажной или самоприклеивающейся полимерной ленты. Буквенный индекс T                      Склеивание по клапану.                      Буквенный индекс G</p>
<b>ОТВЕРСТИЯ ДЛЯ ПЕРЕНОСКИ</b>	
	<p>Полностью высеченное отверстие для рук.                      Тип P                      Частично высеченное отверстие для рук.                      Тип U</p>

ее изображают укороченной штрихпунктирной линией. Рицовку обозначают штрихпунктирной линией с тремя штрихами между пунктирами, а перфорацию — штриховой линией.

Основные элементы развертки складных коробок показаны на рис. 6.5. Все элементы можно условно разделить на главные и вспомогательные. К главным элементам складных коробок относят лицевую 1, заднюю 3, боковые 2 и 4 стороны (панели), а также верхнюю 8 и нижнюю 18 и 20 стороны (панели). На них наносят текстовую и изобразительную информацию. Вспомогательные элементы служат для крепления и фиксации основных элементов коробок. К вспомогательным элементам относят склеиваемый клапан 5, верхние клапаны 9 и 10, верхний лицевой клапан 11 и нижние боковые клапаны 19 и 21.

Система нижних боковых клапанов и нижних сторон образует дно коробки. Нижние стороны могут быть приклеены друг к другу или скрепляться различными замковыми затворами. На рис. 6.5 показан пример одной из конструкций затвора. На нижней стороне 20 выполнены прорезы 23 специального про-

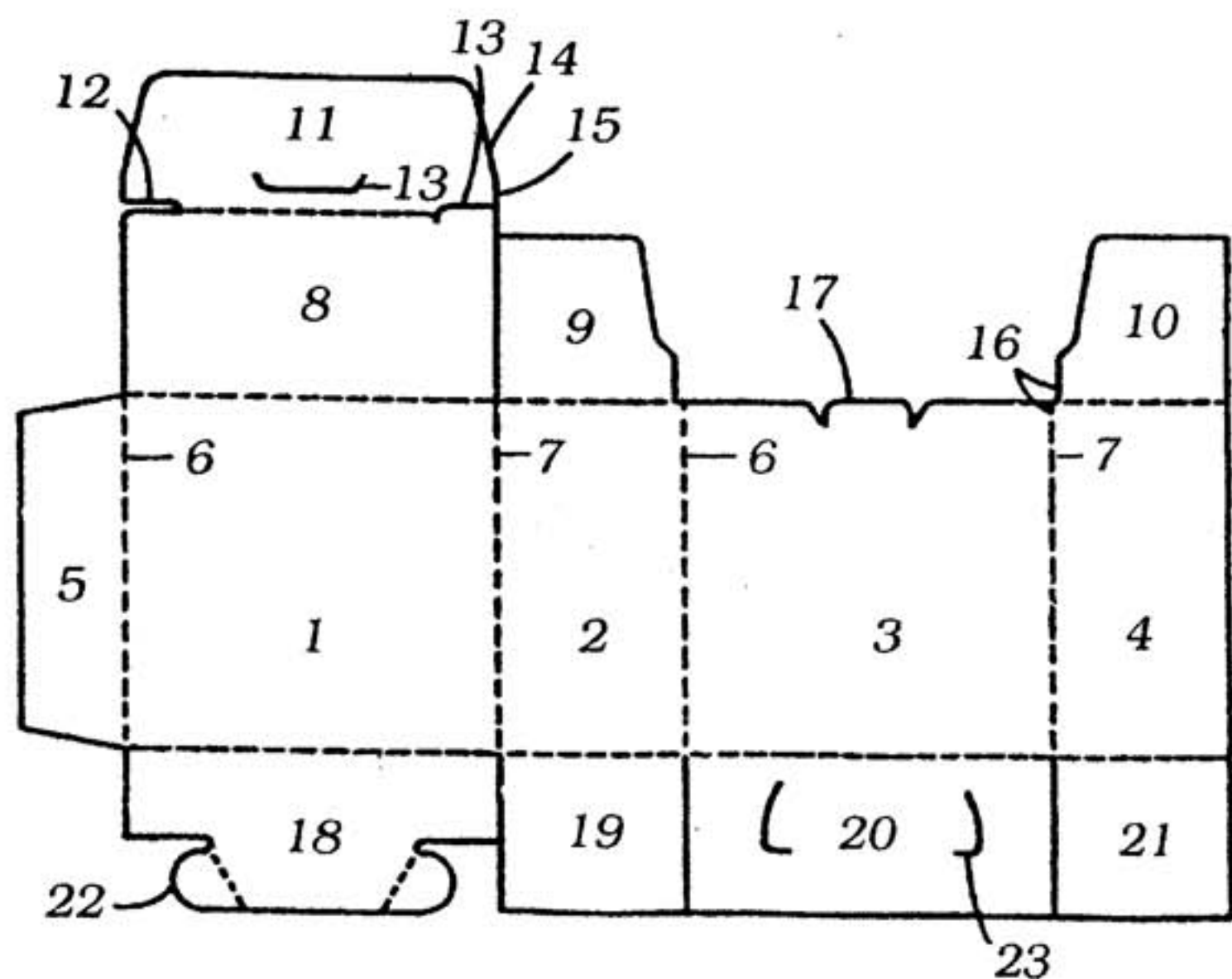


Рис. 6.5. Основные элементы развертки складных коробок

филя, в которые вставляются запирающиеся язычки 22 нижней стороны 18.

Верхние боковые клапаны 9 и 10 совместно с верхней стороной 8 и верхним лицевым клапаном 11 образуют крышку коробки. Крышка может быть приклеенной или многократно открывающейся с фиксацией разнообразными замковыми затворами. Замки выполняются преимущественно на верхнем лицевом клапане 11 в виде вырезов 12, прорезей 13. В них входят и выполняют роль затворов либо верхние боковые клапаны 9 и 10, либо язычки 17 на задней стороне 3. Повышают прочность и надежность замков плечи 15 верхнего лицевого клапана. Для удобства сборки крышки верхний лицевой клапан 11 имеет конусную заходную часть 14, а в основании верхних боковых клапанов 9 и 10 вырезаны специальные компенсаторы 16. Если изготовление складной коробки завершается процессом склеивания продольного шва по склеиваемому клапану 5, то складывание (фальцовку) коробки осуществляют по двум линиям биговки 7.

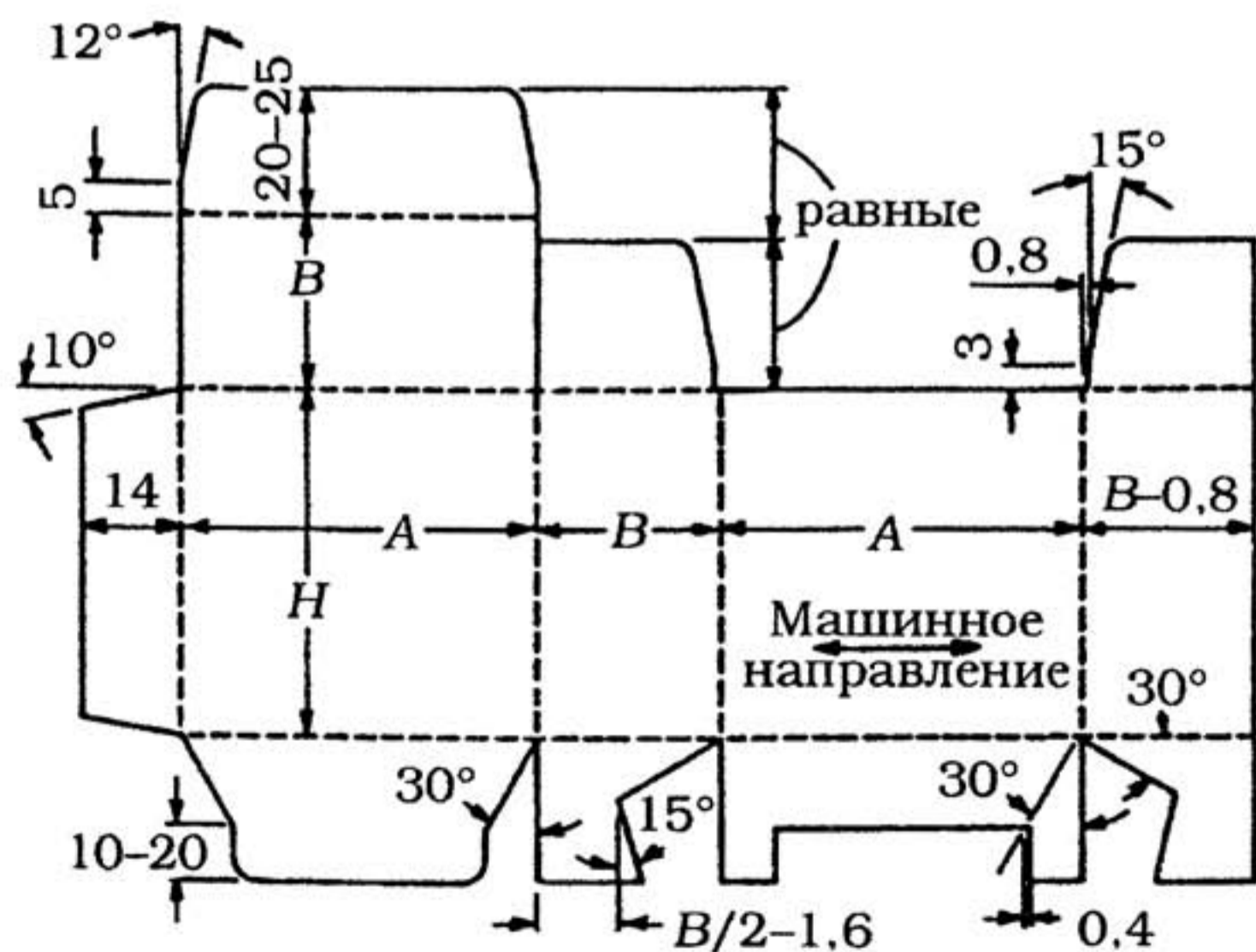


Рис. 6.6. Рекомендуемые размеры вспомогательных элементов развертки коробок

Рекомендуемые размеры вспомогательных элементов развертки коробок приведены на рис. 6.6.

В мире сложилась единая система обозначения основных габаритных размеров складных коробок. Размеры приводятся в такой последовательности (рис. 6.7):

$$A \times B \times H,$$

где  $A$ ,  $B$  и  $H$  — внутренние размеры сторон (в мм), определяемые по развертке как расстояние между серединами биговочных канавок, ограничивающих соответствующую сторону.

$A$  и  $B$  — размеры плоскости основания коробки, причем  $A$  — размер стороны основания, расположенной в плоскости, параллельной оси вращения верхней панели коробки.  $H$  — высота коробки.

Обычно дается трехмерное изображение упаковки в стоячем положении с открытой крышкой, как показано на рис. 6.7.

Для облегчения и автоматизации процесса проектирования коробок, создания системы унификации автоматизированного оборудования для их изготовления во многих странах основные типы коробок и их развертки стандартизованы. Некоторые виды наиболее популярных в США разверток складных коробок приведены на рис. 6.8.

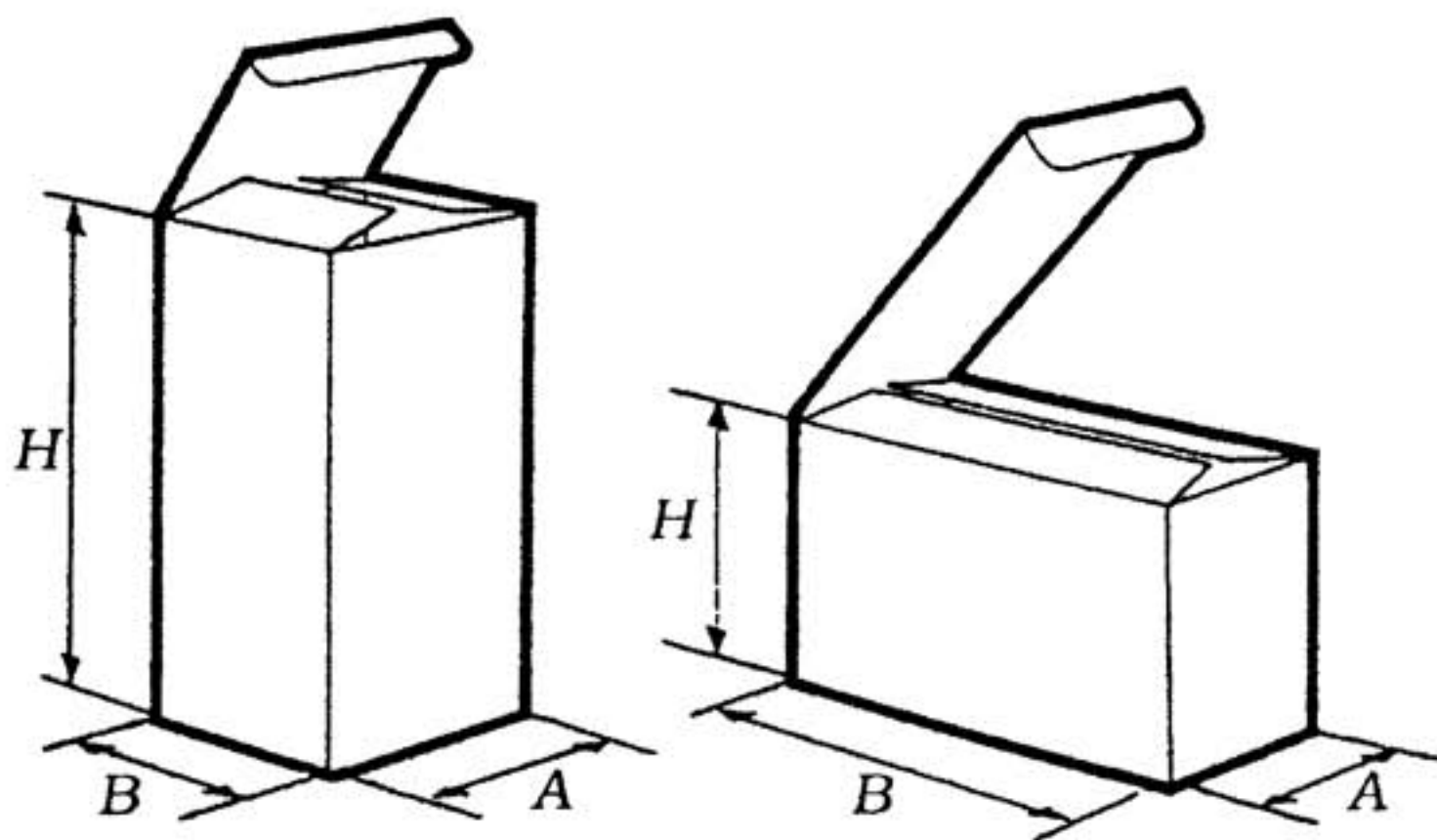
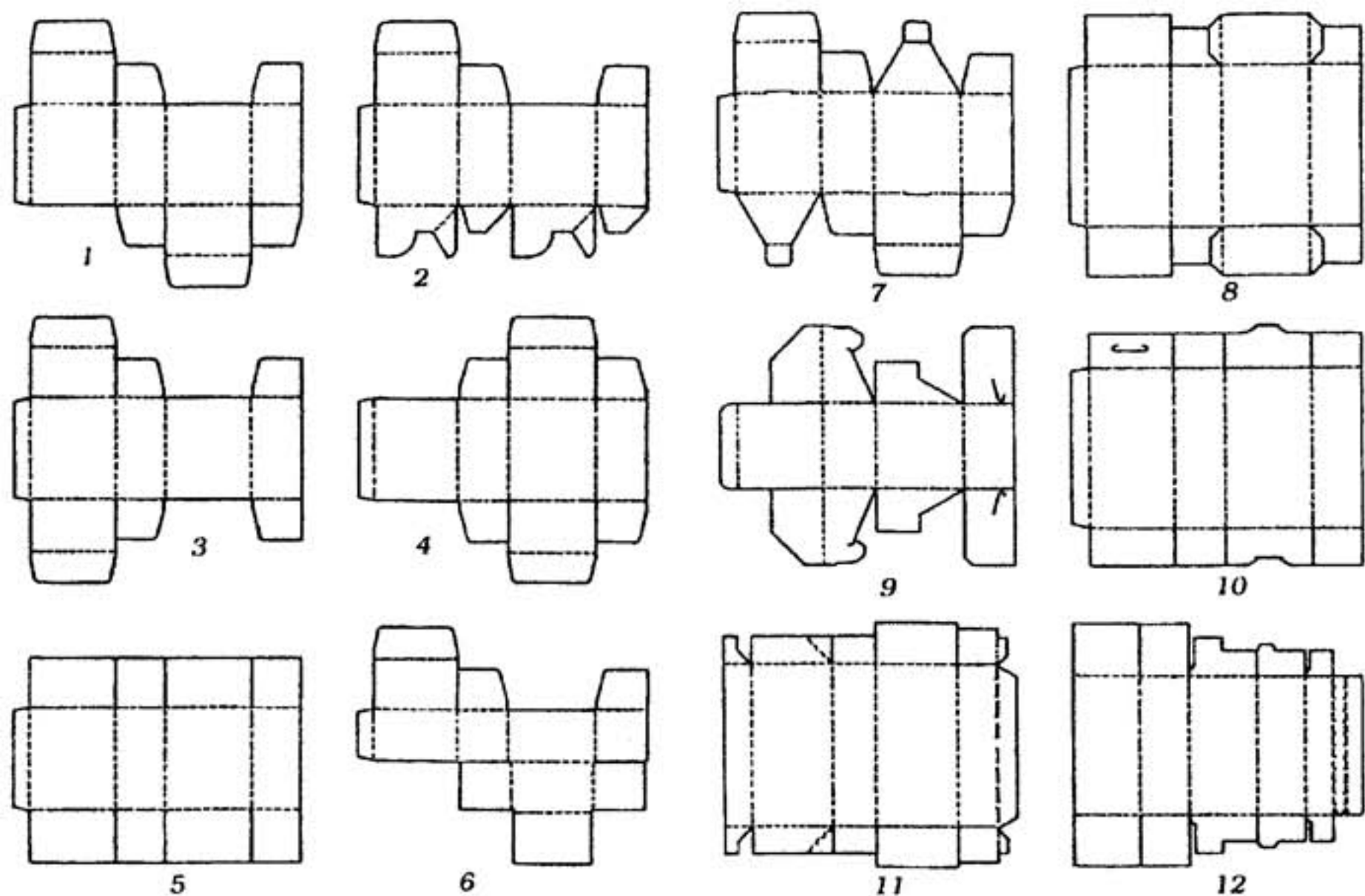


Рис. 6.7. Трехмерное изображение складных коробок



**Рис. 6.8. Некоторые виды разверток складных коробок США:**  
 1 — обратное сворачивание; 2 — автоматически складывающееся дно;  
 3 — стиль аэроплана; 4 — прямое сворачивание;  
 5 — со склеиваемым дном; 6 — скобяное дно;  
 7 — с замками типа «конверт»; 8 — с язычками типа  
 язычков Ван Бурена для склеивания дна; 9 — стиль взломщика;  
 10 — со склеиваемым дном и открывающейся крышкой;  
 11 — с отрывным верхом; 12 — для мороженого

Широко практикуется стандартизация коробок и в Европе. Объединяющая специалистов ведущих стран Европейская ассоциация производителей картонной упаковки (ЕСМА) в 1967 г. выпустила первый сборник стандартных конструкций складных коробок. В то время в конструкциях преобладала продольная склейка швов. В последующее время появилось новое поколение оборудования, материалов, получило дальнейшее развитие создание новых конструкций складных коробок, разработана система компьютерного конструирования коробок (САД). На базе этой системы и сборника стандартов Европейского центра стандартизации (СЕН) в 1992 г.

ЕСМА разработала новый каталог стандартных конструкций складных коробок.

Каталог ЕСМА классифицирует складные коробки на шесть групп от А до F, а также содержит отдельную классификацию (группа X) по функциям и конструкции затворов и вспомогательных приспособлений.

Группу А составили прямоугольные картонные коробки, имеющие по высоте  $H$  продольный клеевой шов. Все наружные плоскости таких коробок расположены под прямыми углами друг к другу (рис. 6.9).

В группу В вошли прямоугольные коробки без продольных клеевых швов. Соединение их сторон осуществляется с помощью затворов разнообразных конструкций (рис. 6.10).

Группу С образовали непрямоугольные картонные коробки с продольным швом на высоте  $H$ . Несколько внешних сторон коробок имеют различную непрямоугольную форму и могут быть расположены под углом к основанию (рис. 6.11).

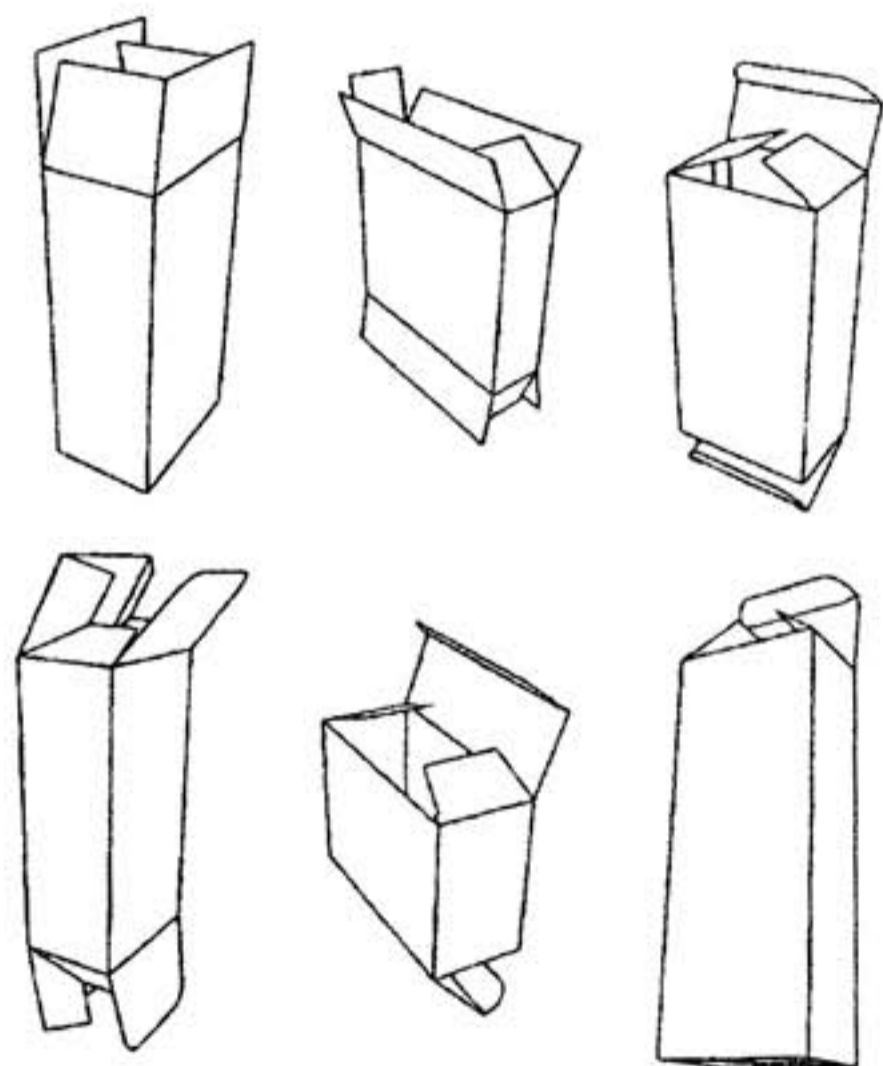


Рис. 6.9. Основные виды складных коробок группы А каталога ЕСМА

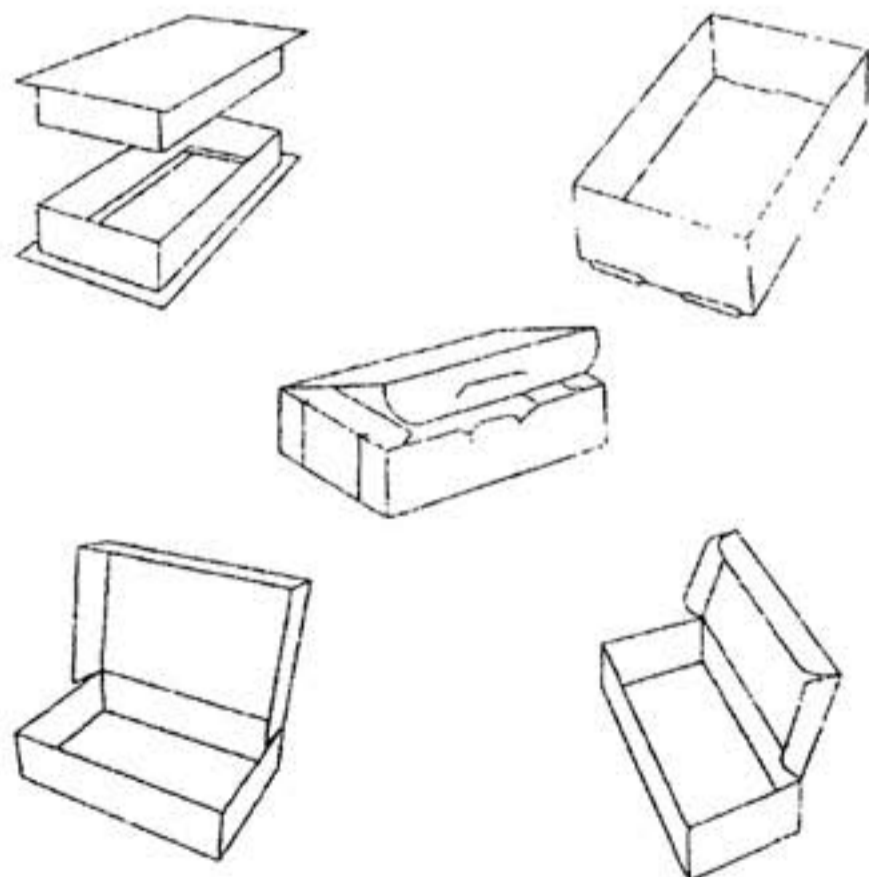


Рис. 6.10. Основные виды складных коробок группы В каталога ЕСМА



Группа D состоит из прямоугольных коробок без продольных клеевых швов. Соединение их сторон выполняется различными затворами (рис. 6.12).

Группа E включает конструкции коробок, находящихся в непосредственном контакте с упаковываемым продуктом или предназначенных для групповой упаковки (рис. 6.13).

Группу F составили прочие картонные коробки, конструкции которых не вошли в группы A — E (рис. 6.14).

Каждая группа разбита на подгруппы по совокупности конструктивных признаков — формы и конструкции дна, крышки, затворов и т. п. Подгруппы обозначаются десятками, например А-20, В-60, С-40 и т. д. Подгруппы, в свою очередь, разделены на типы, определяющие конкретную конструкцию коробки.

В системе компьютерного проектирования САД из базы данных выбирают подходящую конструкцию коробки и в режиме диалога с компьютером определяют конечные размеры, материал, место склеивания и другие конструктивные параметры.

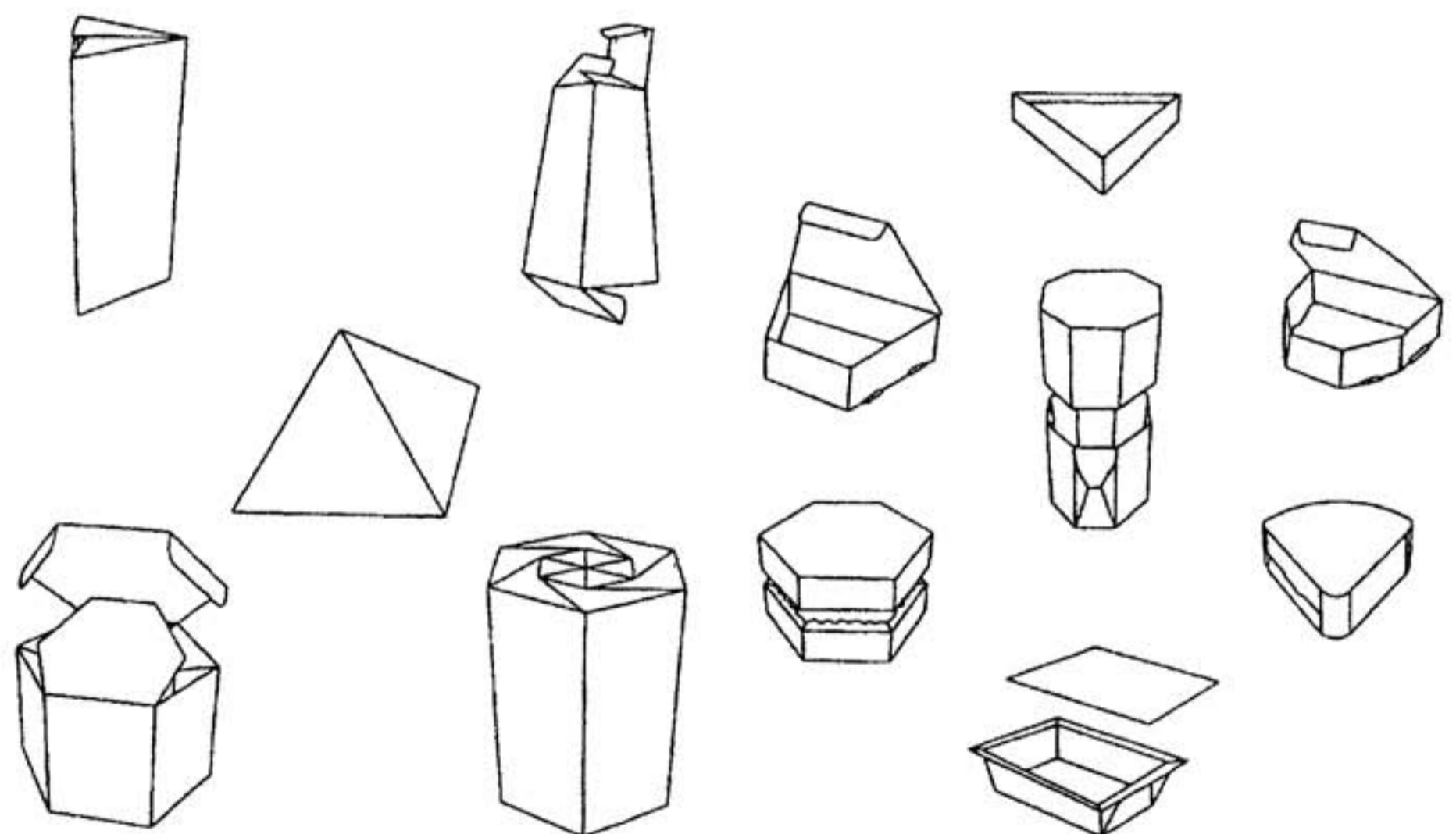


Рис. 6.11. Основные виды складных коробок группы С каталога ЕСМА

Рис. 6.12. Основные виды складных коробок группы D каталога ЕСМА

Каталог ЕСМА не содержит строгих норм для различных деталей развертки, особенно вспомогательных элементов. Эти задачи каждая фирма решает самостоятельно. Некоторые рекомендации по размерам вспомогательных элементов приведены на рис. 6.6.

Европейская федерация производителей ящиков из плотного картона (FEFCO) и Европейская ассоциация изготовителей гофрированного картона (ASSCO) разработали классификацию картонных ящиков. По конструктивным признакам все ящики из плотного картона и гофрокартона разбиты на шесть основных типовых групп, которым присвоены порядковые номера 02, 03, 04, 05, 06 и 07.

Группу 02 составили ящики обыкновенной конструкции, изготавливаемые из единой развертки. Они не содержат отдельных дополнительных частей для крышки и дна, закрываются при помощи клапанов. Боковой шов скрепляют металлическими скобами, либо с помощью клея, либо липких лент на бумажной или полимерной пленочной основе.

Группу 03 представляют ящики телескопической конструкции, собирающиеся из нескольких частей. Они имеют отдель-

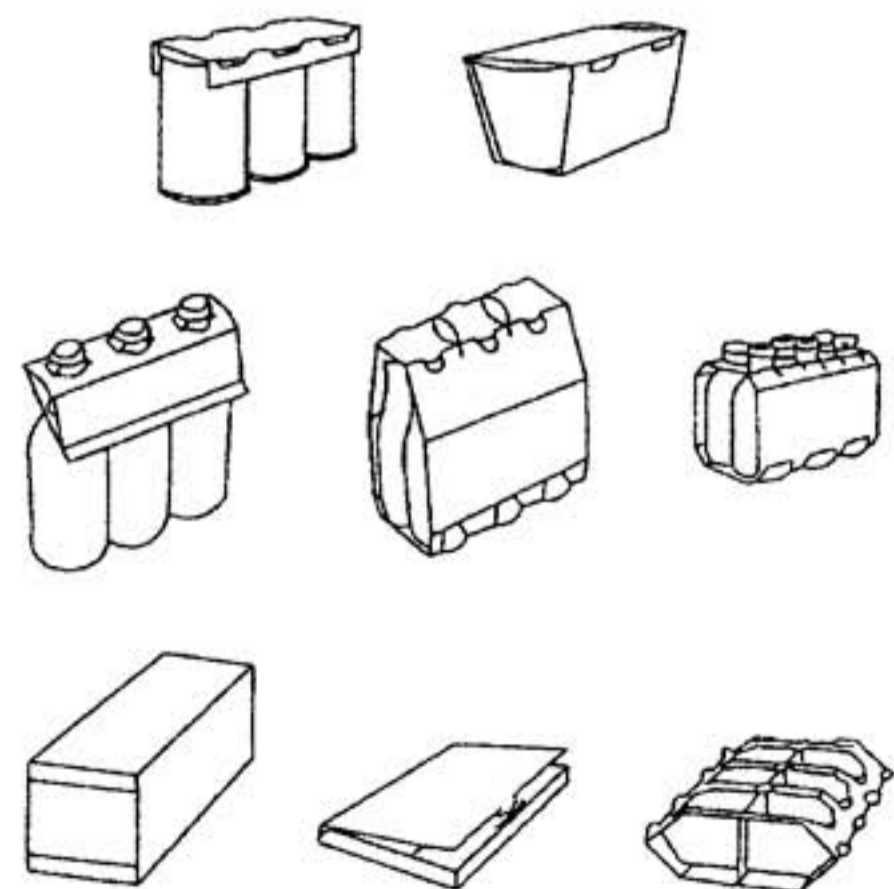


Рис. 6.13. Основные виды складных коробок группы E каталога ЕСМА

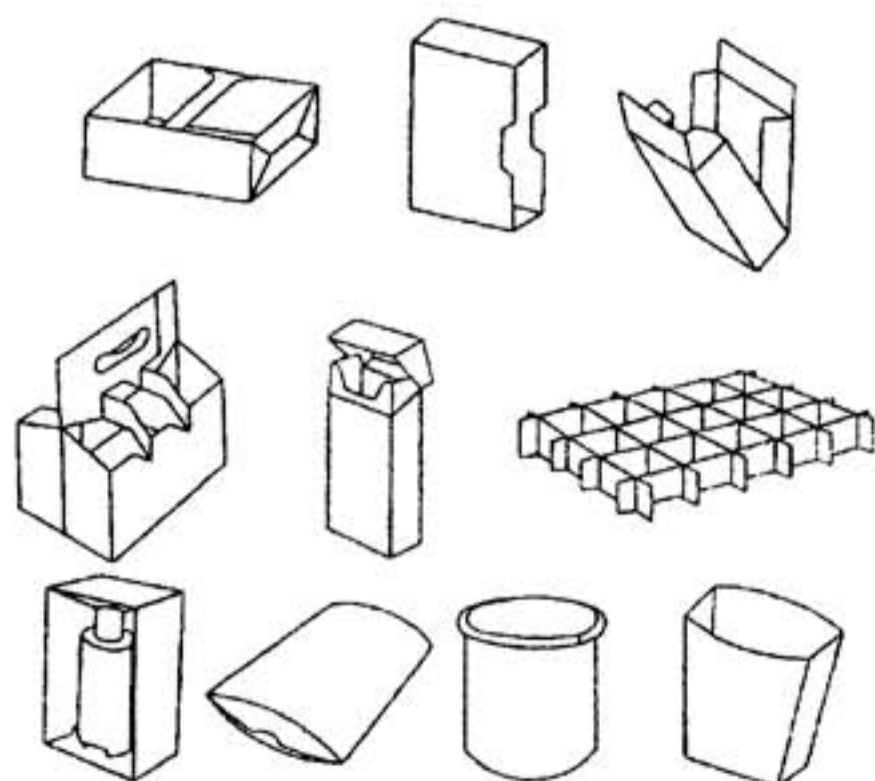


Рис. 6.14. Основные виды складных коробок группы F каталога ЕСМА

ные корпус с дном и крышку, которая частично или полностью закрывает корпус.

В группу 04 входят ящики оберточного типа и так называемые штампованные ящики. Заготовки ящиков имеют форму, позволяющую большинству конструкций осуществлять сборку без использования вспомогательных материалов для закрывания (скоб, клея, липких лент). Ящики часто имеют замковые затворы и отверстия для переноски.

Группа 05 состоит из ящиков, детали которых соединяются между собой традиционными способами — скобами, склеиванием, липкими лентами. В эту группу входят также внешние обечайки и внутренние корпуса ящиков других видов. Ящики могут поставляться потребителю в плоском виде.

Группа 06 включает жесткие ящики, состоящие из цельного корпуса и двух отдельных боковых стенок. Стенки присоединяются к корпусу скобами или склеиванием. Ящики не имеют отдельных крышек и дна.

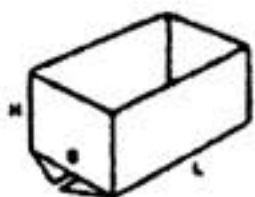
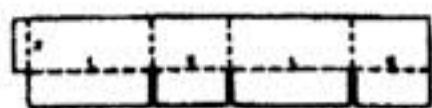
В группу 07 вошли полностью склеенные ящики, состоящие преимущественно из одного раскроя. Они поставляются потребителю в виде плоских заготовок, которые легко собираются в готовый ящик.

В отдельной группе 09 объединены внутренние вкладыши, например прокладки, донные листы, перегородки для разделения ящика на несколько отсеков, и другие внутренние детали.

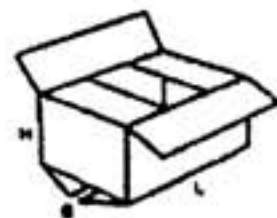
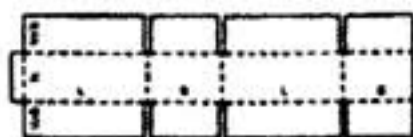
Эскизы трехмерного изображения и разверток ящиков, представляющих перечисленные группы, представлены на рис. 6.15.

Варианты исполнения ящиков по российским стандартам имеют соответствующие аналоги в европейской классификации FEFCO. Например, ящик со стыкующимися наружными клапанами (исполнение А по ГОСТ 9142–90) соответствует конструкции с кодом FEFCO 0201, ящик с частично перекрывающимися наружными клапанами аналогичен конструкции с кодом FEFCO 0202 и т. д. Варианты конструкций ящиков из гофрированного картона по ГОСТ 9142–90 с аналогами по коду FEFCO приведены в табл. 6.4.

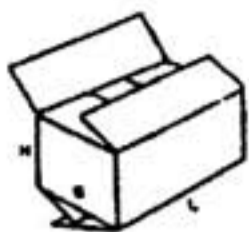
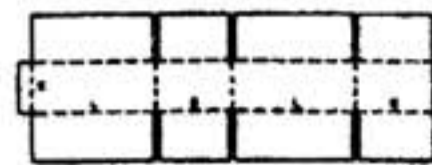
0200



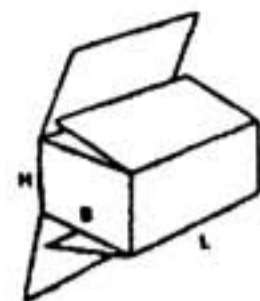
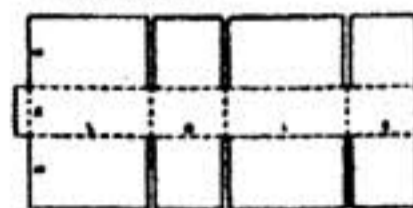
0201



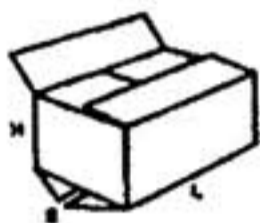
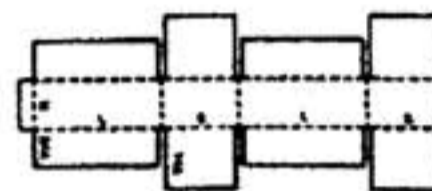
0202



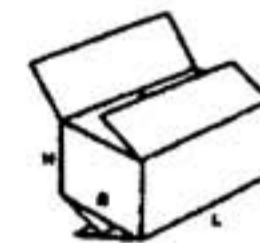
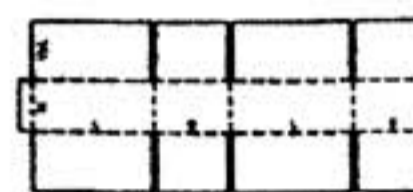
0203



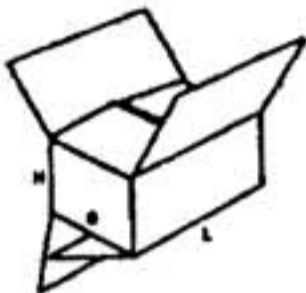
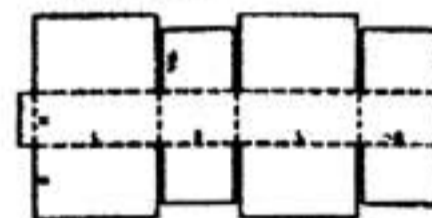
0204



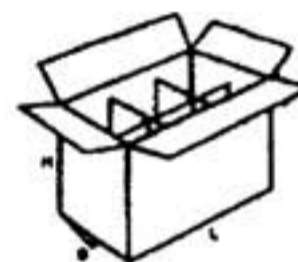
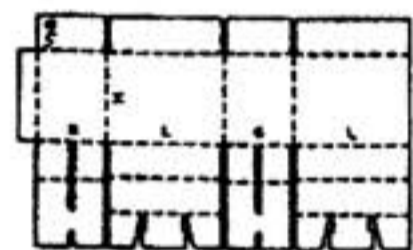
0205



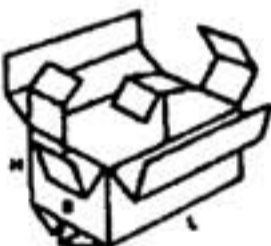
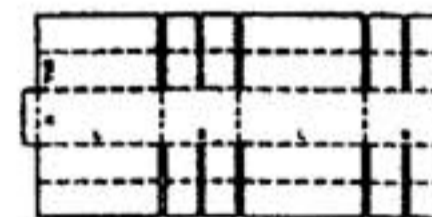
0206



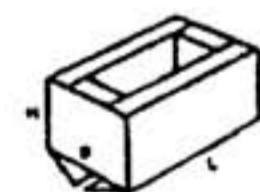
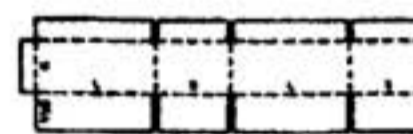
0207



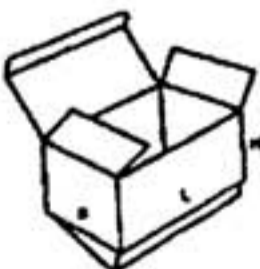
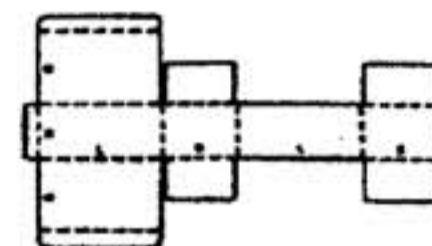
0208



0209



0210



0211

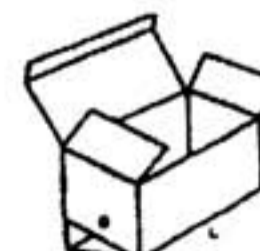
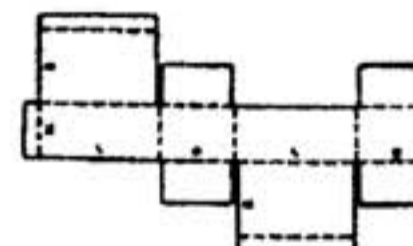
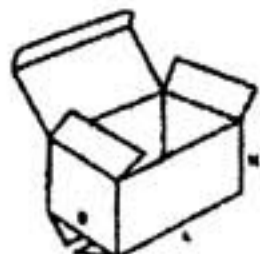
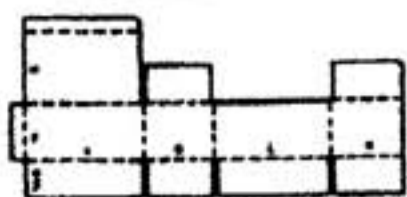
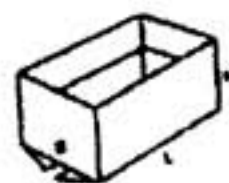
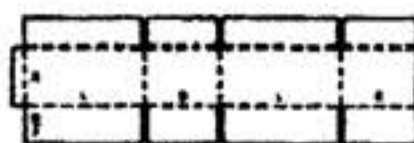


Рис. 6.15. Трехмерное изображение и развертки ящиков из картона и гофрокартона по европейской классификации FEFCO

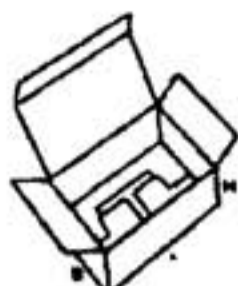
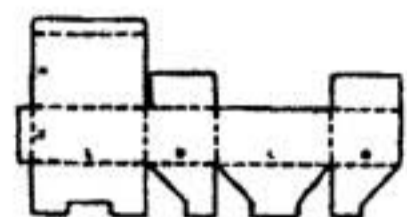
0212



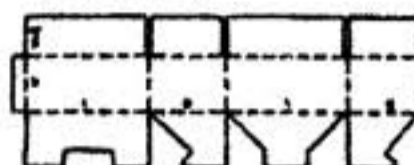
0214



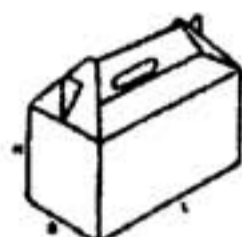
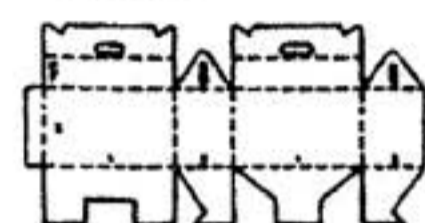
0215



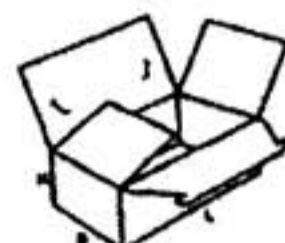
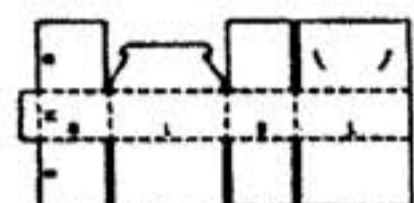
0216



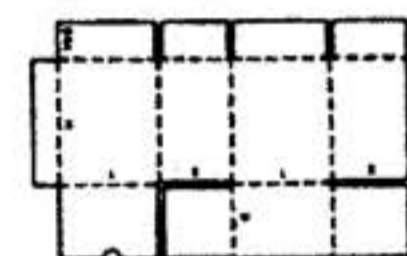
0217



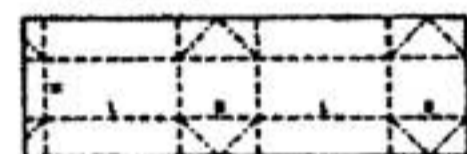
0218



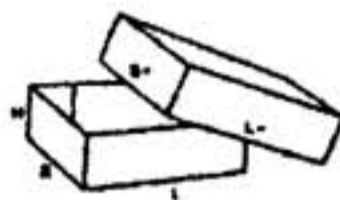
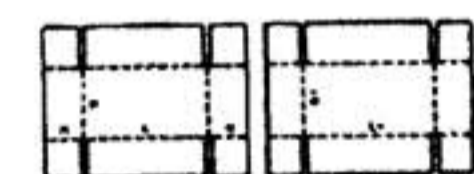
0225



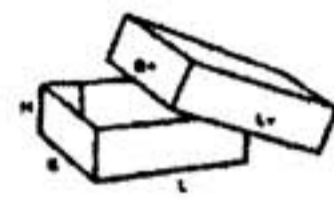
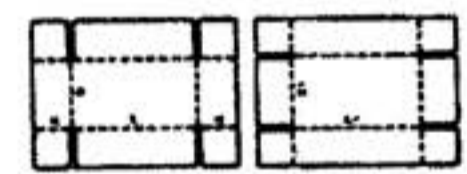
0226



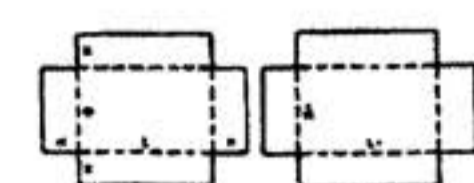
0300



0301



0302



0303

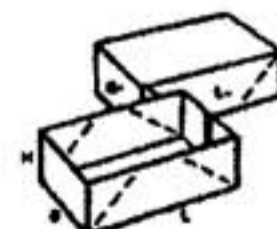
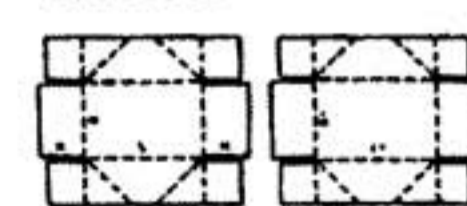
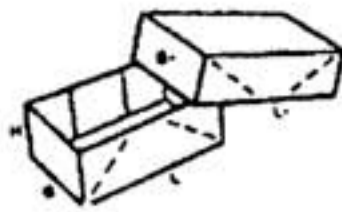
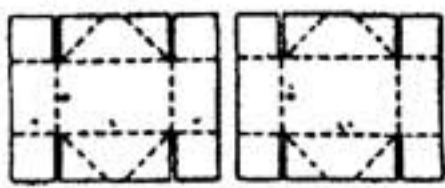
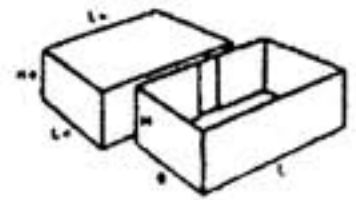
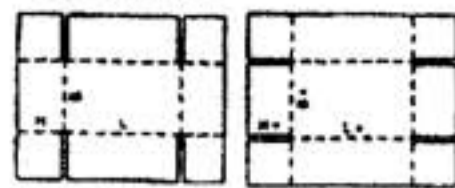


Рис. 6.15 (продолжение)

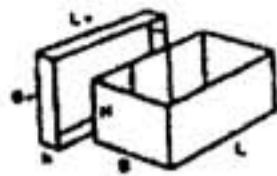
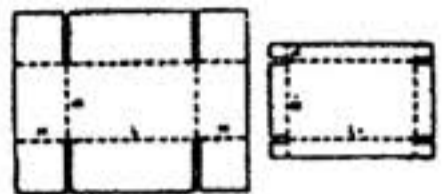
0304



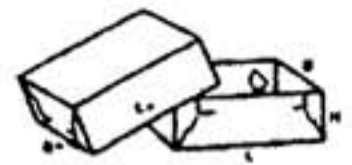
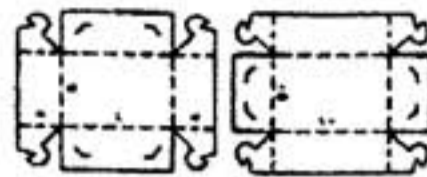
0305



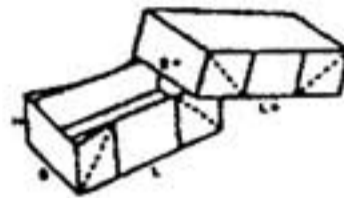
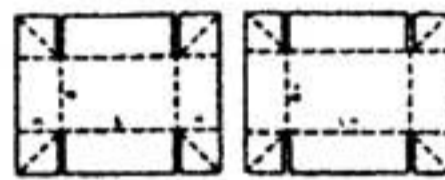
0306



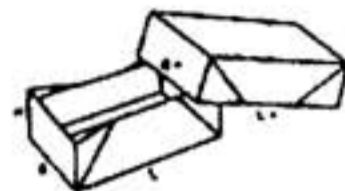
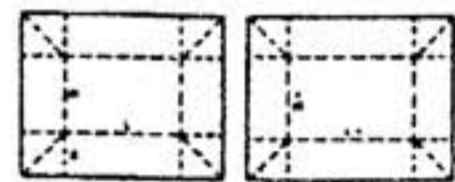
0307



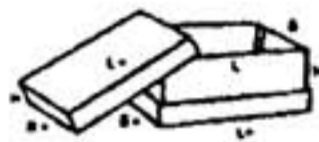
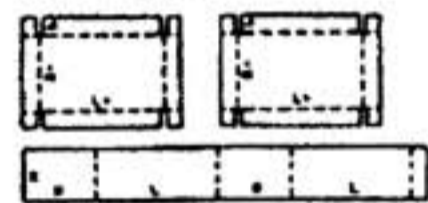
0308



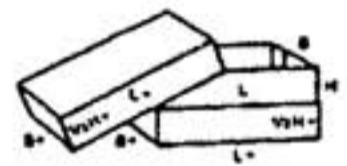
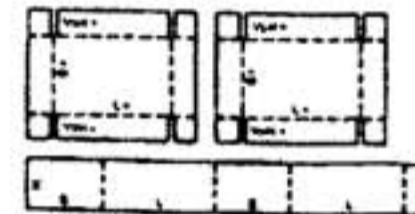
0309



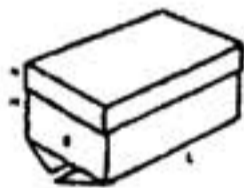
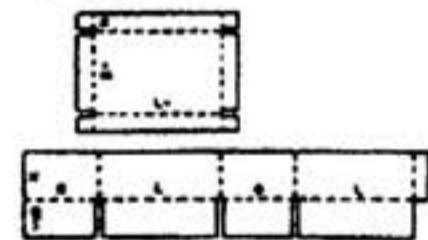
0310



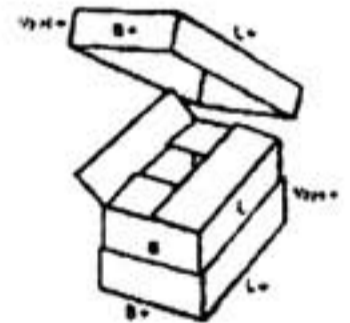
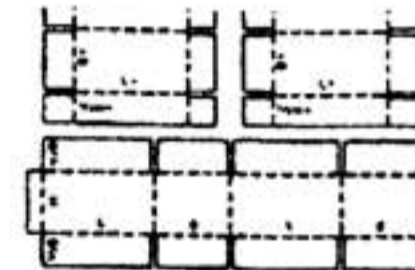
0311



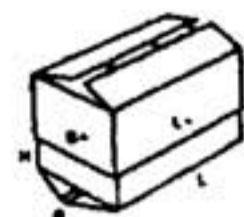
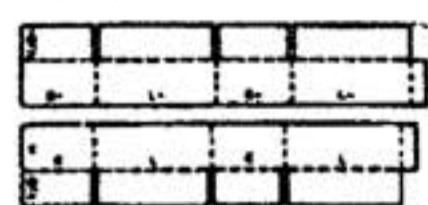
0312



0313



0320



0321

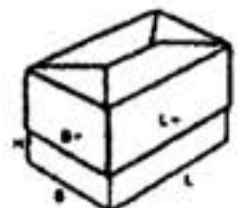
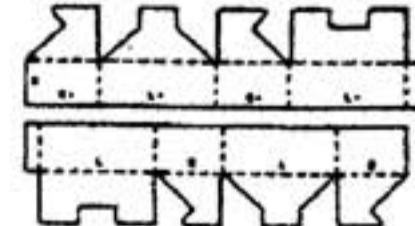
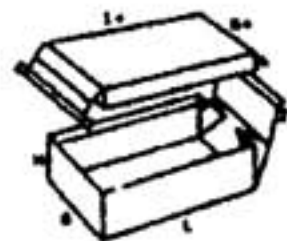
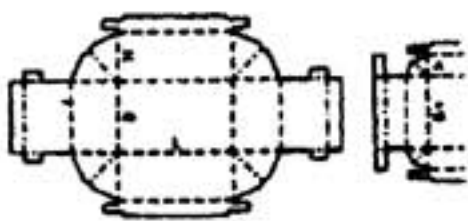
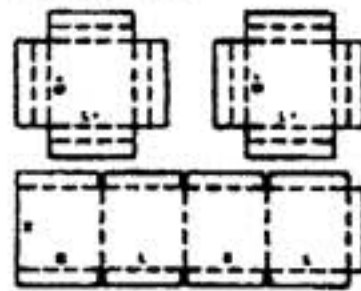


Рис. 6.15 (продолжение)

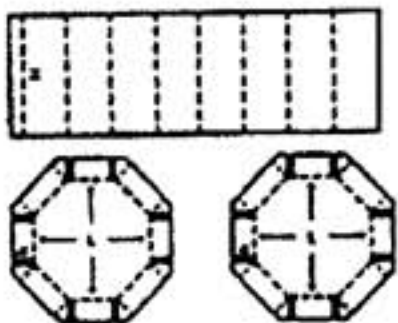
0322



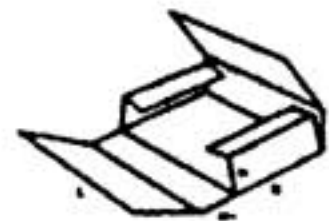
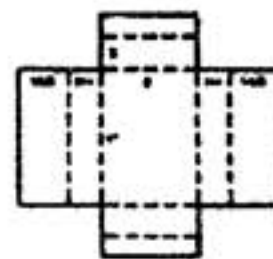
0325



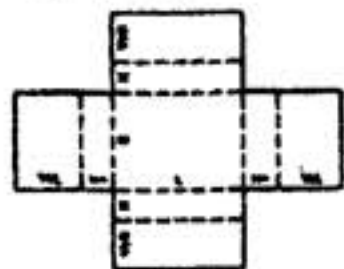
0350



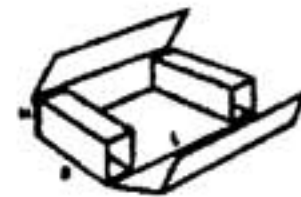
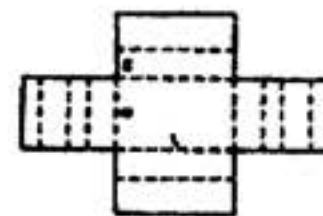
0401



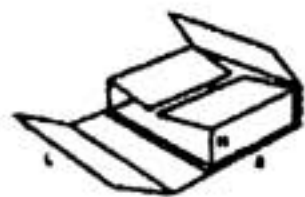
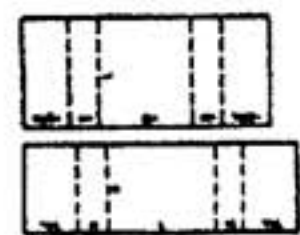
0402



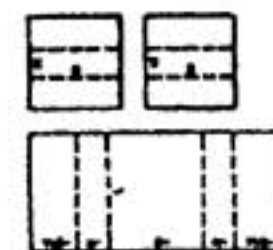
0403



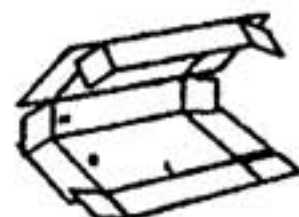
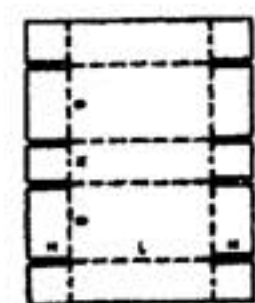
0404



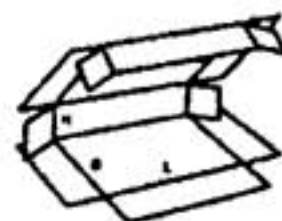
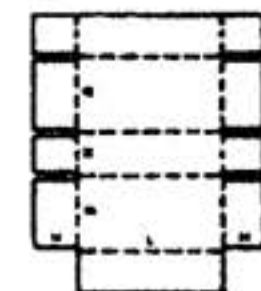
0405



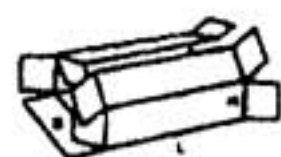
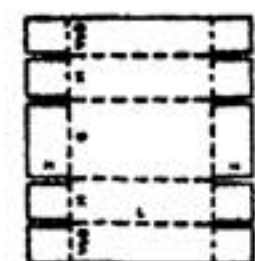
0409



0410



0411



0412

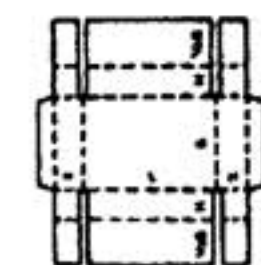
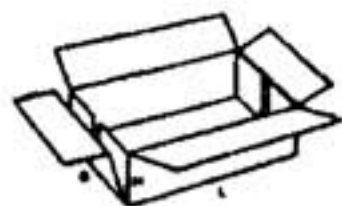
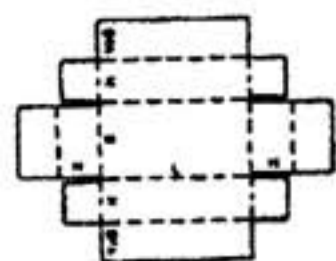
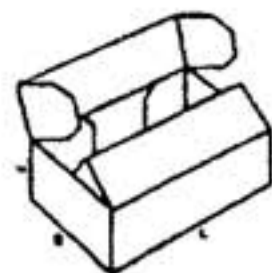
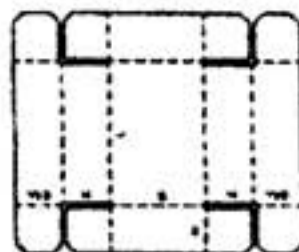


Рис. 6.15 (продолжение)

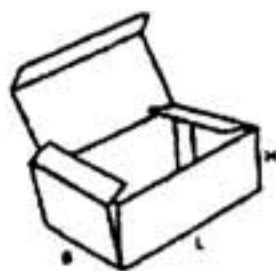
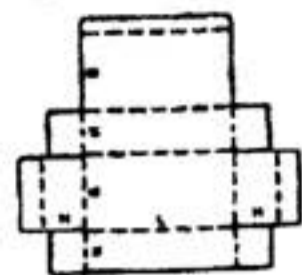
0415



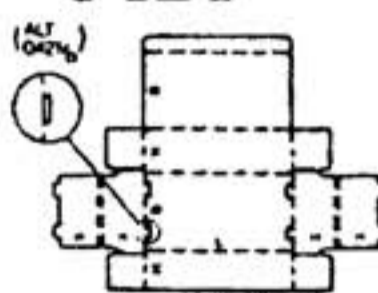
0416



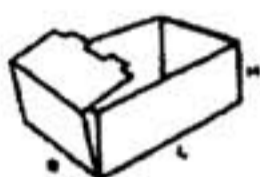
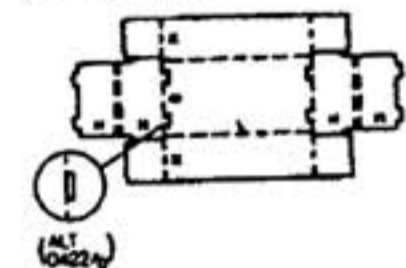
0420



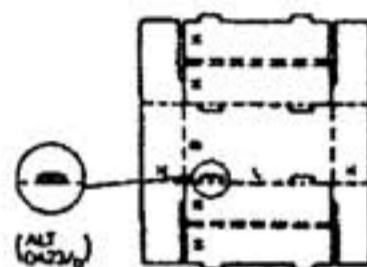
0421



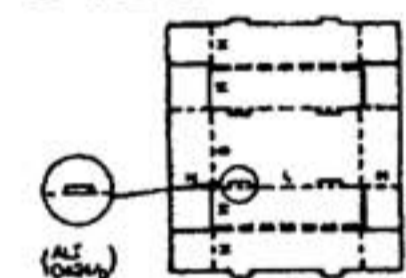
0422



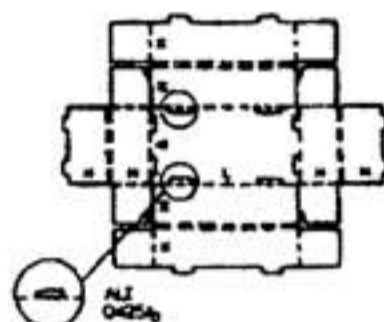
0423



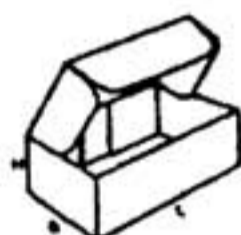
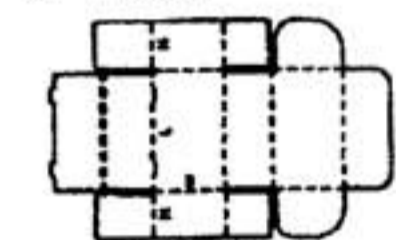
0424



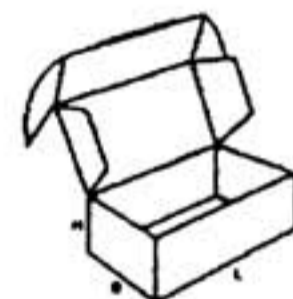
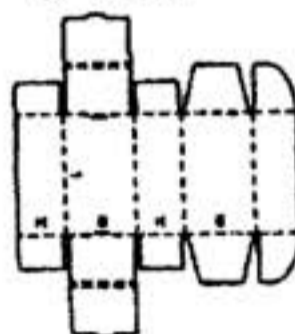
0425



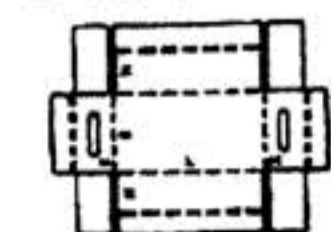
0426



0427



0430



0431

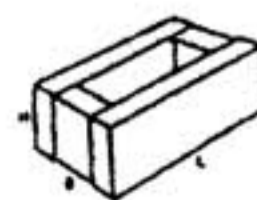
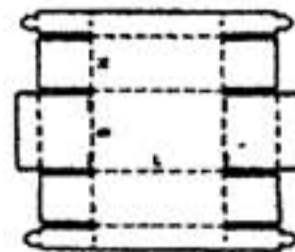
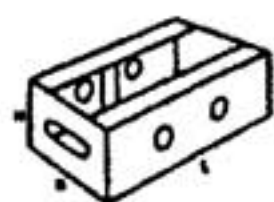
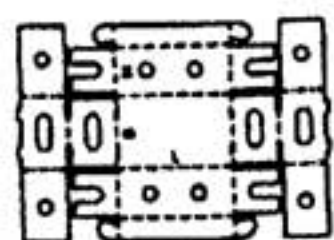


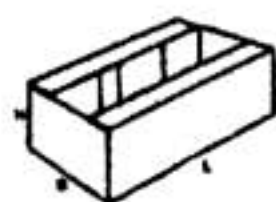
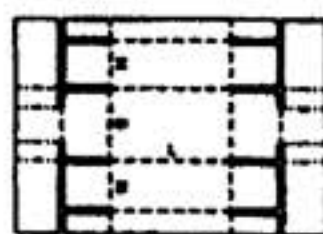
Рис. 6.15 (продолжение)



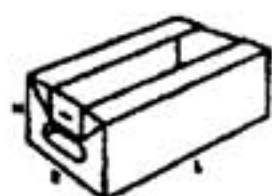
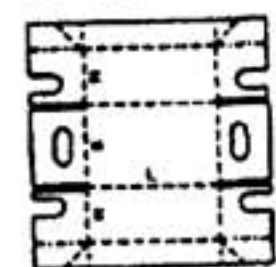
0432



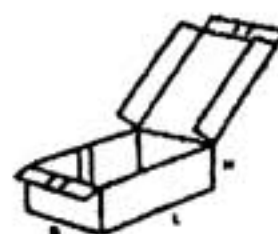
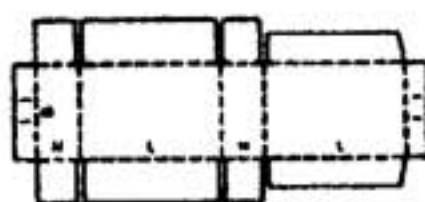
0433



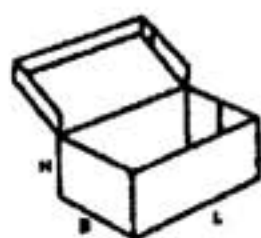
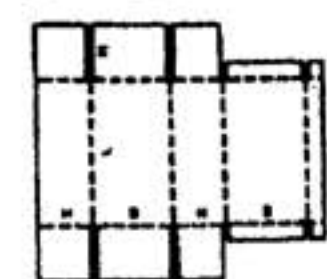
0434



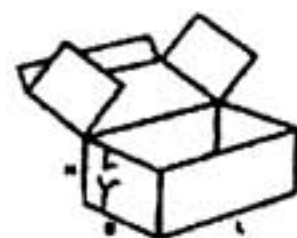
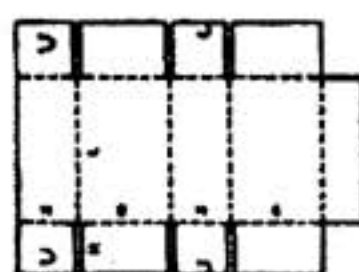
0440



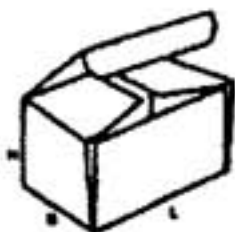
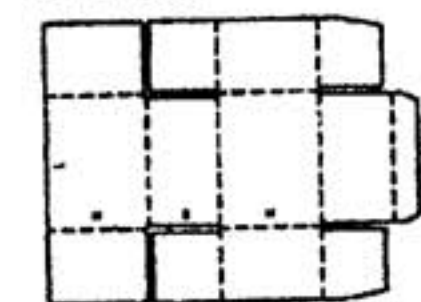
0441



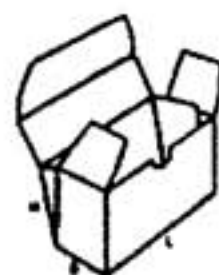
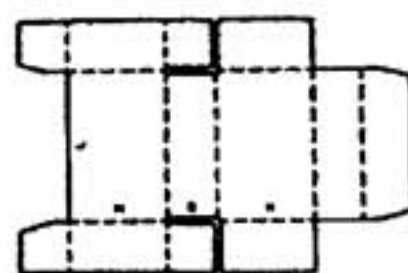
0442



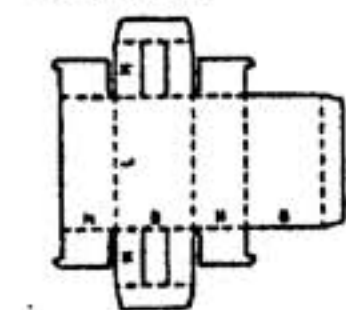
0443



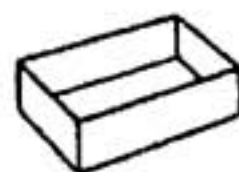
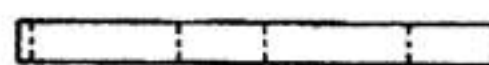
0444



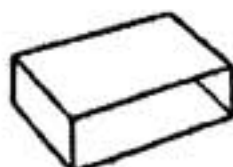
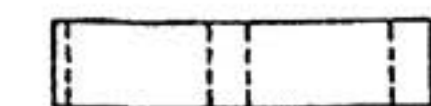
0445



0501



0502



0503

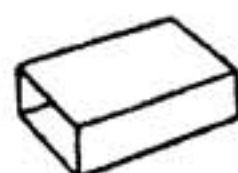
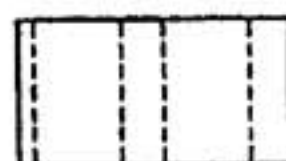
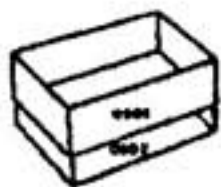
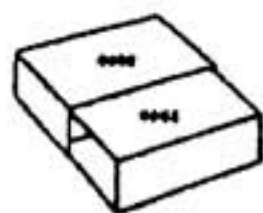


Рис. 6.15 (продолжение)

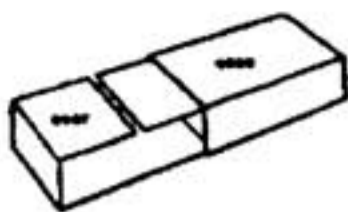
0501  
0502



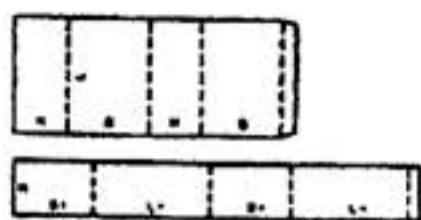
0502  
0503



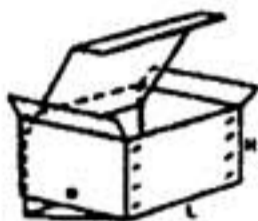
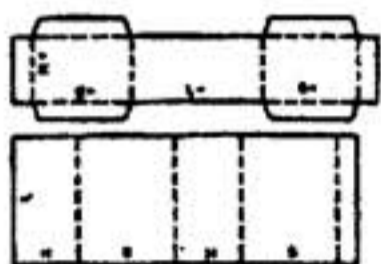
0503  
0907



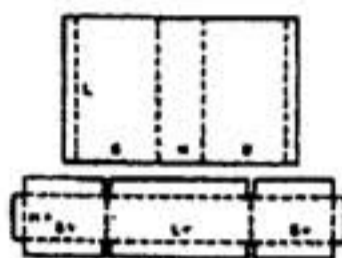
0510



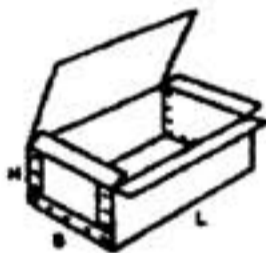
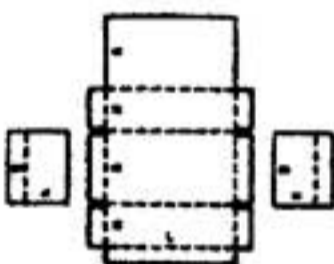
0511



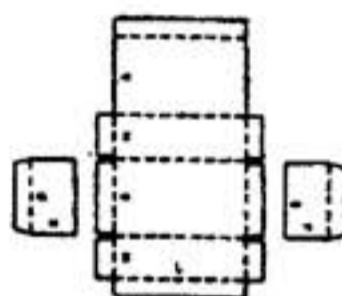
0512



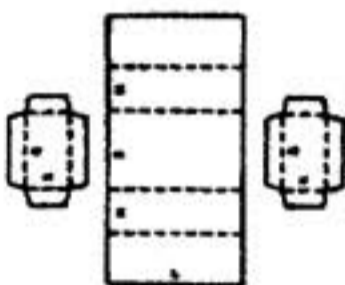
0601



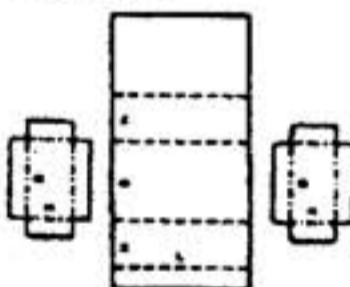
0602



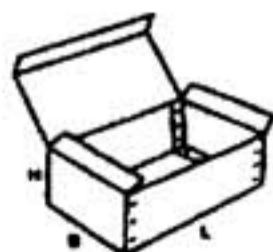
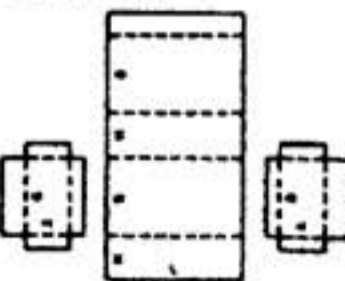
0605



0607



0608



0610

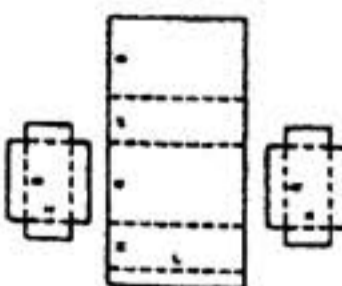
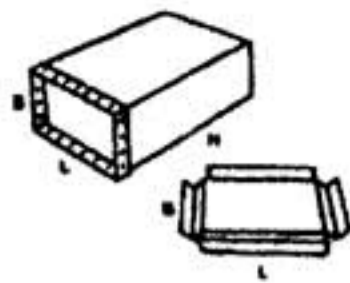
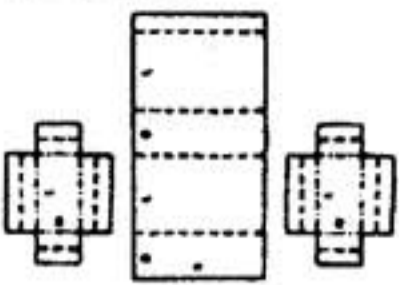
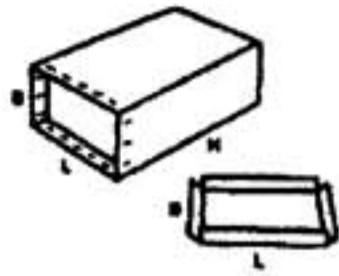
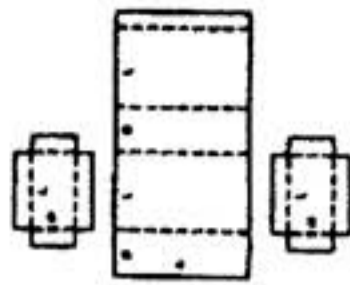


Рис. 6.15 (продолжение)

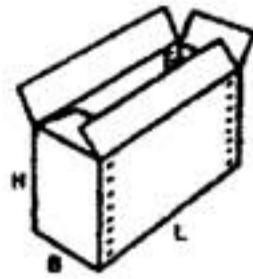
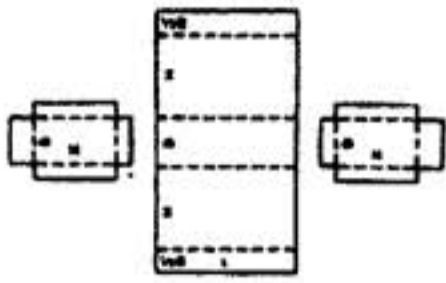
0615



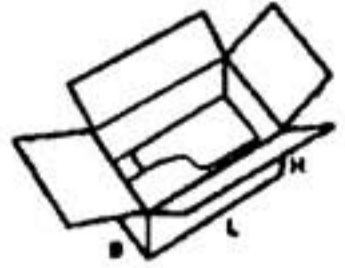
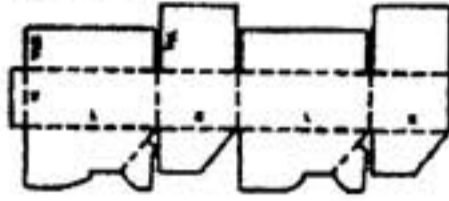
0616



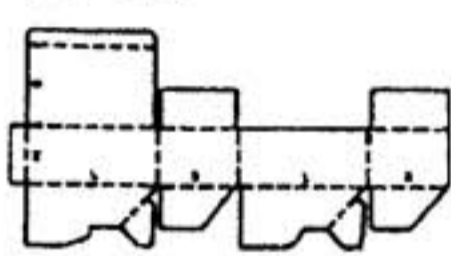
0620



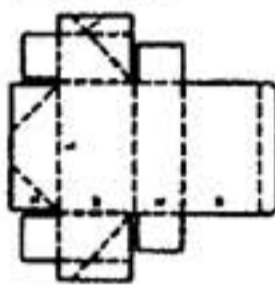
0712



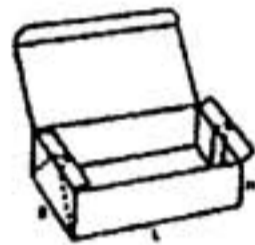
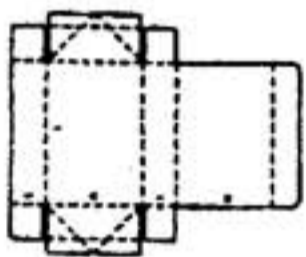
0713



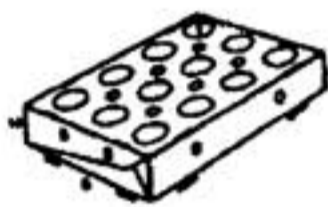
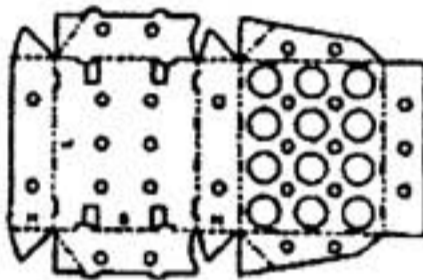
0747



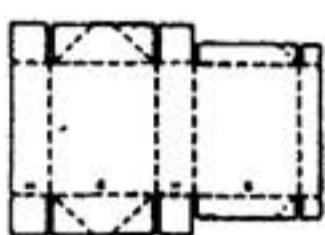
0748



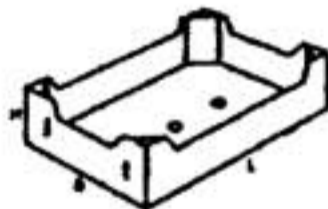
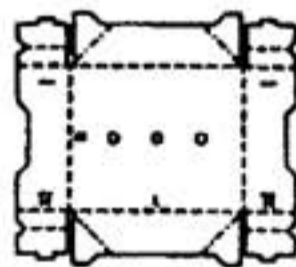
0751



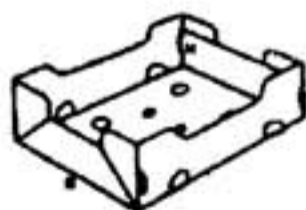
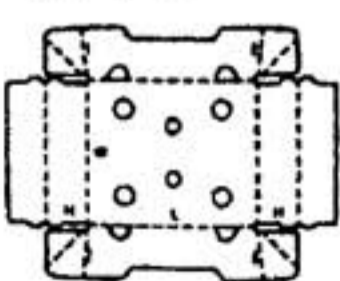
0761



0771



0772



0970



0971

Рис. 6.15 (продолжение)

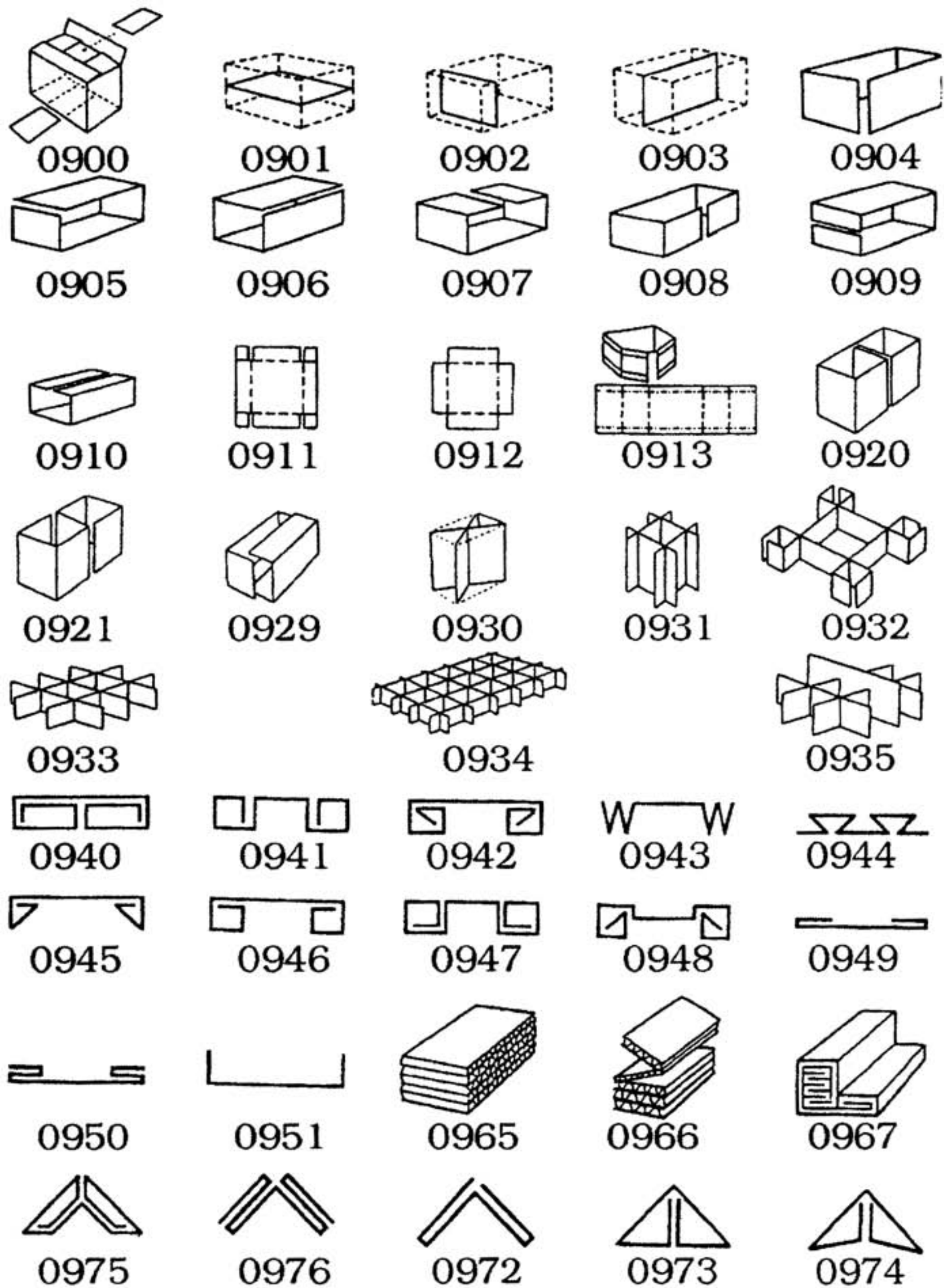
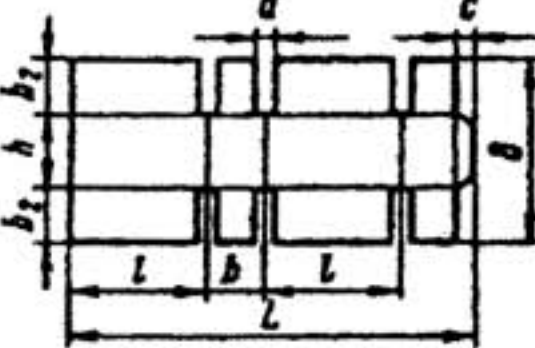
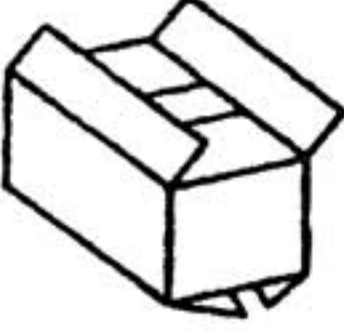
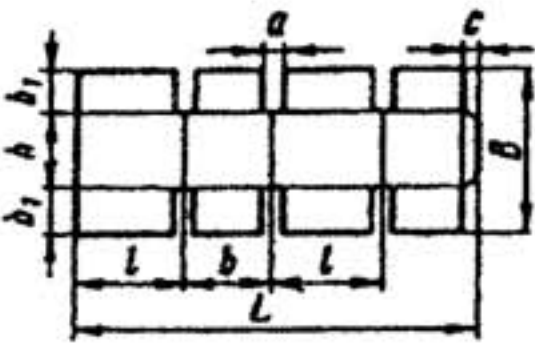
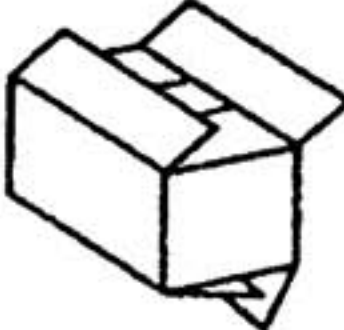
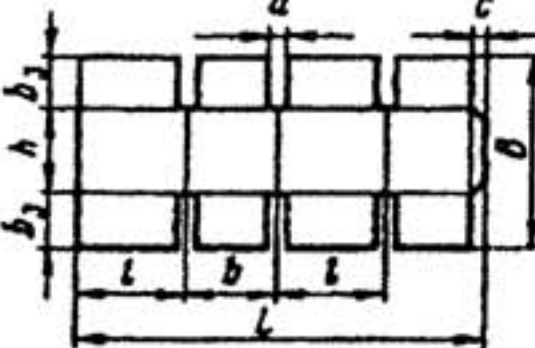
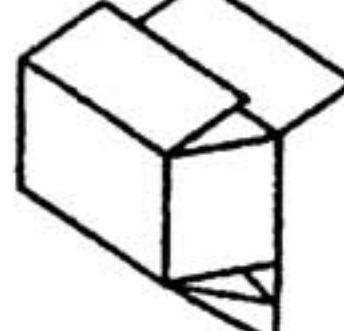
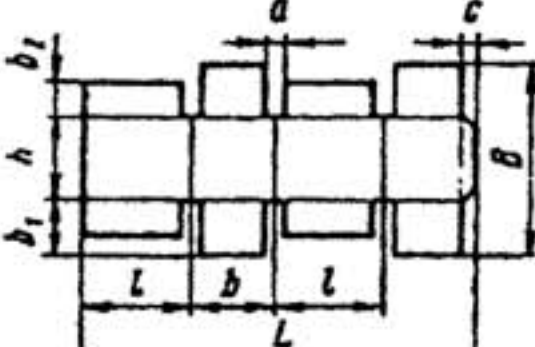
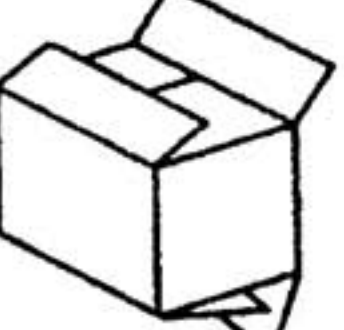
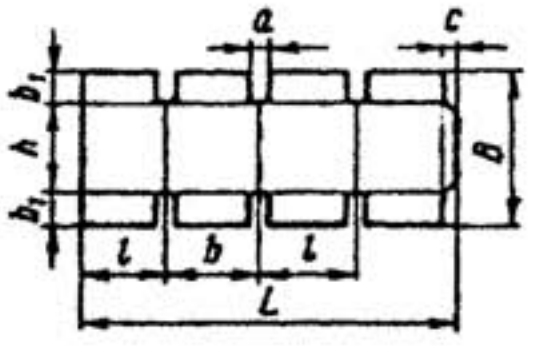
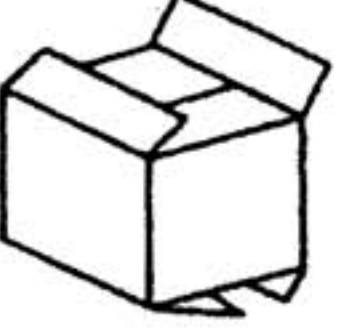


Рис. 6.15 (продолжение)

**Варианты конструкций ящиков  
из гофрированного картона (исполнение по ТУ ГОСТ 9142-90)  
и аналогов по коду FEFCO**

Характеристика складного ящика с четырехклапанным дном и крышкой	Исполнение	Развертка ящика	Ящик в собранном виде
Со стыкующимися наружными клапанами	А (0201)		
С частично перекрывающимися наружными клапанами	Б (0202)		
С полностью перекрывающимися наружными клапанами	В (0203)		
Со стыкующимися наружными и внутренними клапанами	Г (0205)		
Со стыкующимися наружными и внутренними клапанами	Д (0204)		

### **6.3. Стадии проектирования складных коробок**

В результате анализа технического задания с комплексом требований к упаковке разрабатывается проект дизайна складной коробки. В объем этого проекта входят выбор материала, определение конфигурации и габаритных размеров, цветовое решение, создание комплекса текстовой и изобразительной информации.

При выборе материала учитывается ряд разнообразных факторов. Материал должен удовлетворять требованиям, связанным с упаковываемой продукцией и способами обращения с ней. Прежде всего анализируются физико-механические свойства, непроницаемость для влаги, жира, водяного пара и других факторов. С другой стороны, рассматриваются технологические свойства. Запечатываемые свойства материала должны соответствовать выбранному способу печати и предусмотренному внешнему виду. Материал должен хорошо обрабатываться в технологических машинах и быть пригодным к склеиванию или к сварке. Кроме того, материал должен позволять создать конструкцию складной коробки, соответствующую заданному способу упаковывания продукции — ручному, полуавтоматическому или автоматическому. Следует учитывать и стоимость материала. Его доля в цене конечного продукта не должна быть значительной.

Определение конфигурации и габаритных размеров складных коробок требует сочетания технического и дизайнерского решений.

Рациональное техническое решение в определении конфигурации и габаритных размеров позволяет сократить расход материала, исключить дополнительную трудоемкость при сборке коробок, оптимизировать процесс распределения упакованной продукции.

После этого определяются конструктивные особенности коробки: наличие клеевых соединений, тип и вид замковых затворов, конструкции дна и крышки и т. д. В результате разрабатывается чертеж развертки коробки с использованием системы компьютерного проектирования САД. В зависимости от конструктивных особенностей из большой базы данных выбирается принятая за основу конструкция. По габаритным раз-

мерам, виду и типу материала, местам склейки и другим параметрам определяются особенности развертки коробки.

На следующей стадии чертеж развертки коробки переносится на выбранный материал и изготавливается индивидуальный образец коробки без текстовой и изобразительной информации. В процессе сборки коробки уточняются конструктивные особенности элементов ее развертки. Полученный образец коробки согласовывается с заказчиком, при необходимости вносятся изменения в чертеж развертки коробки.

Образец коробки подвергается комплексу механических испытаний, согласованному с заказчиком. Как правило, испытания должны моделировать возникающие нагрузки при перевозке, складировании и различных операциях обработки продукции. По результатам испытаний могут при необходимости изменяться материал и конструктивные особенности коробки.

Затем уточненный чертеж развертки коробки совмещается с текстовой и изобразительной информацией, осуществляется корректировка расположения надписей и других элементов оформления. Для выполнения этой операции разработан ряд компьютерных программных комплексов, который объединяет в себе возможности мощного гибридного графического редактора и процессора технологической подготовки. Развертка с текстовой и изобразительной информацией наносится методом цифровой печати на материал коробки. Современные средства цифровой печати позволяют обеспечить совпадение цветов с традиционной печатью, например офсетной, с точностью 90–95% [32]. Из развертки собирается натурная модель коробки. Она согласовывается с заказчиком. В случае необходимости изменений и дополнений составляется протокол. После их внесения в проект изготавливается вторая натурная модель, которая снова согласовывается с заказчиком. Утвержденная натурная модель становится эталоном для будущего серийного производства коробок. Процесс согласования натуральных моделей с заказчиком значительно облегчается с использованием компьютерной сети Internet.

Следующая стадия — позиционирование разверток коробки на формате заготовки картона. Формат заготовки картона определяется типом и маркой оборудования, задействованно-

го в технологическом процессе изготовления коробок: печатных и отделочных машин, штанцевальных прессов, фальцевально-склеивающих автоматов.

Позиционирование является сложной задачей. Оно определяет важнейшие технические характеристики процесса изготовления складных коробок.

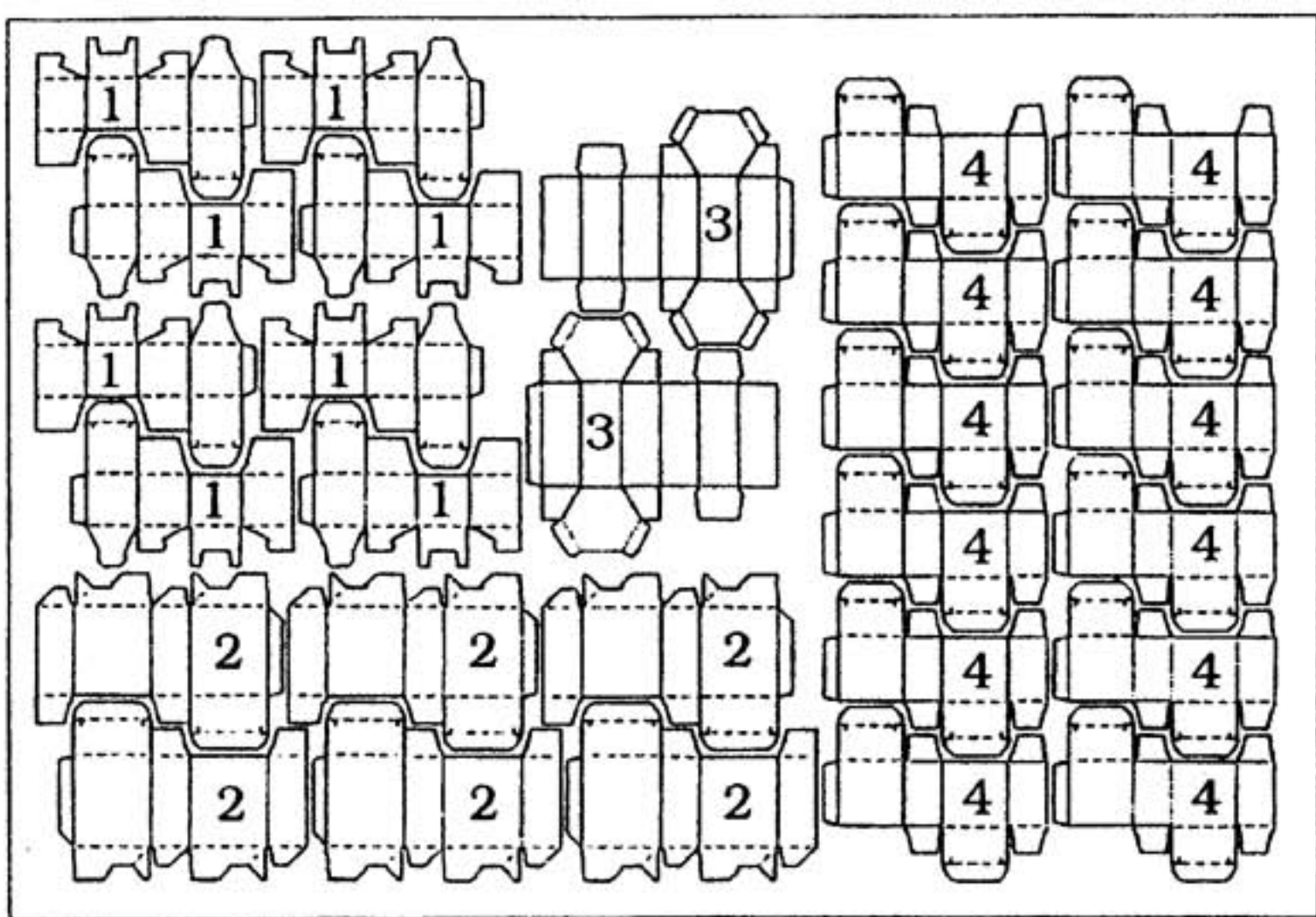
Во-первых, это технико-экономические показатели. От оптимальности позиционирования зависит количество отходов картона и гофрокартона, а также производительность процесса. Числовым показателем оптимальности позиционирования является коэффициент использования материала (КИМ), определяемый отношением площади заготовки картона ( $S_3$ ) к суммарной площади получаемых из нее разверток коробок ( $\sum_1^n S_i$ ):

$$\text{КИМ} = \frac{S_3}{\sum_1^n S_i}.$$

Чем больше КИМ приближается к единице, тем меньше отходов картона и ниже себестоимость изготавливаемых коробок. На позиционирование влияет и программа выпуска коробок различной конфигурации. В ряде случаев экономически выгоднее пойти на снижение КИМ, но разместить на одном формате заготовки различных коробок. На рис. 6.16 приведен пример позиционирования разверток восьми коробок профиля № 1, шести коробок профиля № 2, две коробки профиля № 3 и двенадцать профиля № 4. Количество коробок должно быть пропорционально общей программе их выпуска. Такой вариант целесообразен, если расходы на изготовление отдельных форм для четырех профилей коробок и требуемую последовательную переналадку оборудования превышают расходы от снижения КИМ.

Во-вторых, от правильности позиционирования зависит качество печати, отделки, штанцевания, отделения отходов и разделения разверток коробок по их отдельным профилям. При позиционировании следует предусматривать возможности равномерного распределения давления в процессе печати, балансировки штанцевальных форм по осям симметрии.





*Рис. 6.16. Позиционирование разверток нескольких коробок на формате заготовки картона*

В-третьих, позиционирование определяет механические свойства коробок. Развертки коробок необходимо ориентировать относительно машинного направления при изготовлении картона. Как правило, машинное направление соответствует длинной стороне формата заготовки.

Завершающей стадией проектирования складных коробок являются разработка конструкции штамцевальной формы и составление спецификаций необходимых для ее изготовления материалов.

## **6.4. Технология производства складных коробок из картона и гофрокартона**

Процесс производства складных коробок из картона и гофрокартона представляет собой совокупность выполняемых в строго определенной последовательности наиболее распространен-

ных в полиграфии технологических операций: печати текста и изображения, отделки внешней запечатанной поверхности, штанцевания, отделения технологических излишков материала (облоя), отделения друг от друга индивидуальных заготовок коробок (раскроя), фальцовки, склеивания продольных швов, stapелирования и упаковки заготовок коробок (рис. 6.17)

Различают два вида производства складных коробок и ящиков: без фальцовки и склеивания, а также сфальцованных и склеенных.

Складные коробки и ящики без фальцовки и склеивания изготавливают преимущественно на печатно-штанцевальных линиях. Такие линии состоят из секций самонаклада 1 и подачи 2 листов картона или гофрокартона в печатную машину (рис. 6.18). В зависимости от количества цветов, используемых в оформлении коробки, печатная машина может состоять из нескольких печатных секций (3, 4 и т. д.). При необходимости

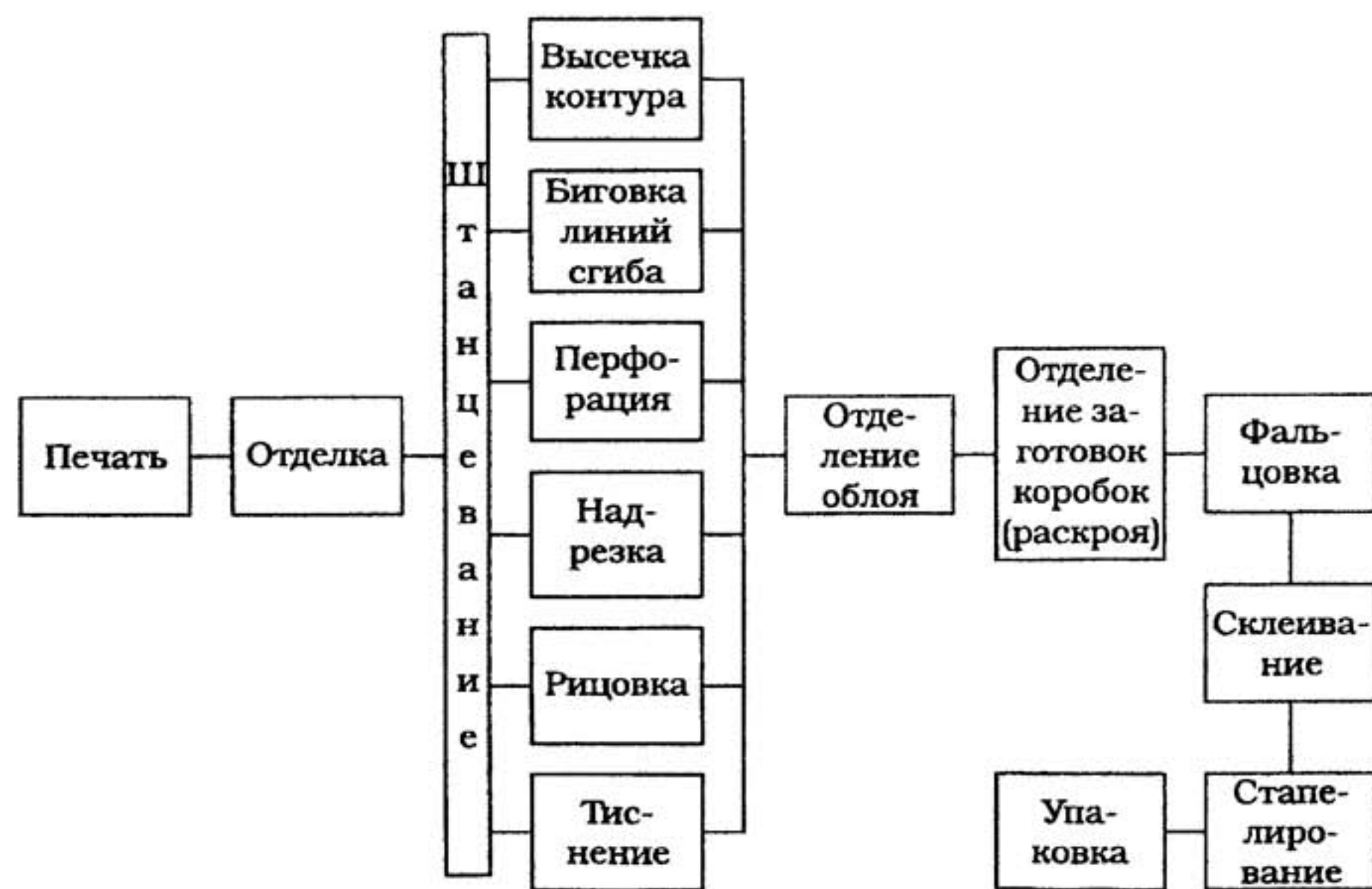
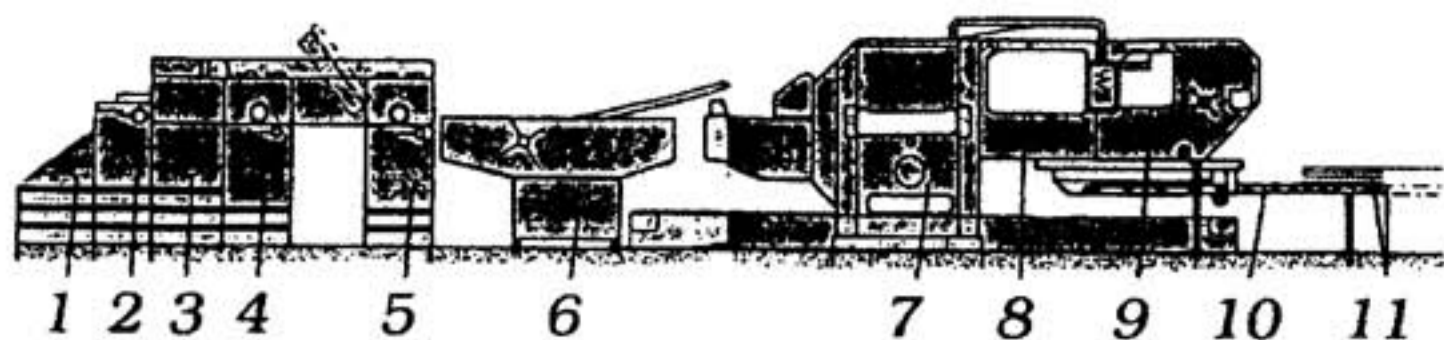


Рис. 6.17. Схема технологических операций производства складных коробок из картона



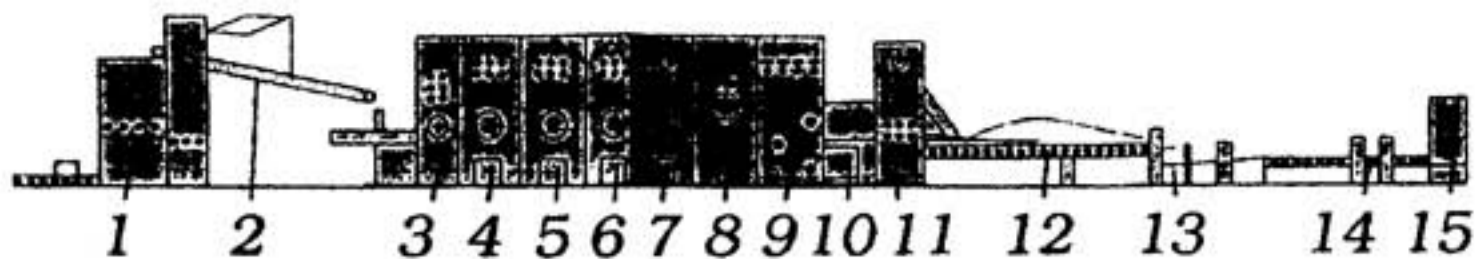
*Рис. 6.18. Печатно-штанцевальная линия*

*автоматизированного производства складных коробок и ящиков из картона и гофрокартона без фальцовки и склеивания:*

- 1 — самонаклад; 2 — подача листов картона или гофрокартона в печатную машину; 3, 4 — печатные секции; 5 — отделочная секция; 6 — промежуточный транспортер; 7 — секция штанцевания; 8 — удаление отходов; 9 — отделение высеченных заготовок коробок; 10 — транспортер; 11 — упаковывание стопок заготовок коробок*
- 

отделки полиграфического оформления в состав печатной машины включают отделочную секцию 5. Промежуточный транспортер 6 соединяет печатную и штанцевальную машины. Штанцевальная машина состоит из штанцевальной секции 7, а также секций удаления отходов 8 и отделения высеченных заготовок коробок 9. Собранные в секции 9 в стопу заготовки коробок с помощью транспортера 10 поступают на упаковочную операцию, откуда — на склад или к заказчику.

Сфальцованные и склеенные коробки и ящики изготавливают на печатно-штанцевально-фальцовочно-склеивающих линиях (рис. 6.19). В состав таких линий входят секции самонаклада 1 и автоматической подачи 2 листов картона и гофрокартона в печатную машину, содержащую требуемое количество печатных и отделочных секций (поз. 3–7). После секций штанцевания 8, отделения отходов 9 и заготовок коробок 10 штанцевальной машины следуют агрегаты для нанесения клея 11 на склеиваемые клапаны, для фальцевания (складывания) коробки по двум боковым линиям биговки и склеивания продольного шва 12. Сфальцованные и склеенные коробки в накопителе 13 укладываются в пачки, упаковываются в обвязочной машине 14, в штабелеукладчике 15 штабелируются и отправляются на склад или непосредственно к заказчику.



*Рис. 6.19. Печатно-штанцевально-фальцовочно-склеивающая линия производства сфальцованных и склеенных коробок и ящиков из картона и гофрокартона:*

- 1 — самонаклад; 2 — подача листов картона и гофрокартона; 3–7 — печатные и отделочные секции печатной машины; 8–10 — секции штанцевания, отделения отходов и заготовок коробок штанцевальной машины; 11 — агрегат нанесения клея; 12 — фальцовочно-склеивающая машина; 13 — накопитель; 14 — обвязочная машина; 15 — штабелеукладчик*

Наибольшее применение для нанесения текста и изображений на картон и гофрокартон нашли флексографский, офсетный и трафаретный способы печати. В случае затруднений при прямой печати на картоне и особенно на гофрокартоне используют метод каширования. При этом методе предварительно запечатывается лист бумаги, который затем на специальной кашировальной машине приклеивается к поверхности картона или гофрокартона.

Процесс штанцевания включает комплекс технологических операций, обеспечивающих необходимые геометрические размеры и конструктивные особенности изготавливаемых коробок и ящиков. В процессе штанцевания производится высечка контура развертки коробки, биговка линий сгибов на развертке, по которым впоследствии будет производиться фальцовка — складывание из плоской развертки объемной коробки или ящика. Если предусмотрено конструкцией, то в процессе штанцевания в соответствующих местах развертки коробки могут быть выполнены перфорация, надрезка, рифловка или тиснение. Завершается штанцевание операциями отделения облоя и отделения индивидуальных заготовок разверток коробок или ящиков.

Выполняют процесс штанцевания на штанцевальных машинах. Различают два основных типа штанцевальных машин: плоскоштамповочные и роторные.

Рассмотрим принципиальную схему работы плоскоштамповочной штанцевальной машины. Лист картона 1 (рис. 6.20) с помощью специальных зажимов подается в штанцевальную секцию между двумя плоскопараллельными плитами 2 и 5, одна из которых совершает возвратно-поступательное движение. На подвижной плите закреплена штанцевальная форма 3, совмещенная с контрматрицей 4, закрепленной на неподвижной плите. После процесса штанцевания лист картона с высеченными заготовками коробок, соединенными между собой и с контурной рамкой перемычками, поступает в секцию удаления облоя — отходов излишков материала. Для исключения деформации заготовок коробок лист картона фиксируют на опорной форме 7. При помощи тонких пуансонов формы 6, закрепленной на подвижной плите с возвратно-поступательным движением, и подпружиненных ответных пуансонов формы 8 происходит разрушение перемычек, удерживающих облой. Удаленный из листа облой 9 направляют в отходы. Далее лист транспортируется в секцию отделения заготовок коробок. Отделение заготовок осуществляется за счет разрушения перемычек между соседними заготовками и контурной рамкой. Разрушение перемычек осуществляется под действием тонких пуансонов формы 10, закрепленной на подвижной плите, и ответных подпружиненных пуансонов формы 11. Отделенные заготовки коробок укладываются в стопы 12

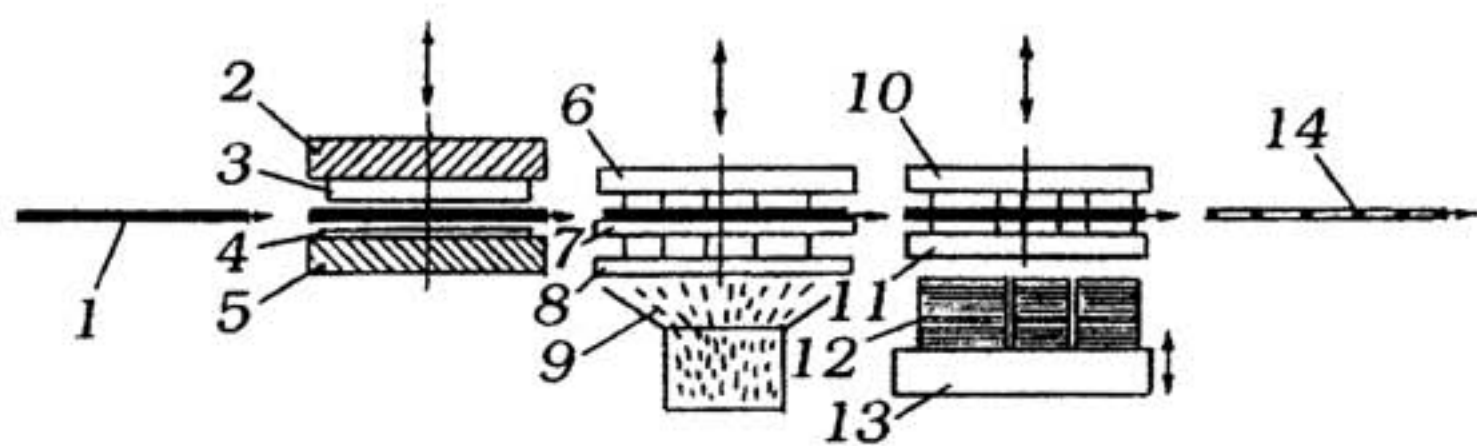


Рис. 6.20. Плоскоштамповочная машина:

- 1 — лист картона или гофрокартона; 2, 5 — плоскопараллельные плиты; 3 — штанцевальная форма; 4 — контрматрица; 6, 7, 8 — формы для отделения облоя; 9 — облой — в отходы; 10, 11 — формы для отделения заготовок коробок; 12 — стопы заготовок коробок; 13 — подвижный стол; 14 — рамки и перемычки листа — в отходы

на нижнем подвижном столе 13, который медленно опускается по мере увеличения высоты стопы 12. Оставшиеся рамки и перемычки листа 14 направляются в отходы.

В роторной штанцевальной машине (рис. 6.21) лист картона или гофрокартона подается в зазор между двумя вращающимися валами 2 и 3. На валу 2 закреплена роторная штанцевальная форма 4. Контрвал 3 облицован бандажом 5 из полиуретана. Под действием эжекторных материалов штанцевальной формы отходы 6 выталкиваются быстрее заготовки 7 и удаляются в сборник отходов. Заготовки коробок и ящичков 7 укладываются в пачки и отправляются на дальнейшие операции.

Преимуществом роторных штанцевальных машин является их более простая кинематическая схема, позволяющая обеспечивать и более высокую производительность. Вместе с тем необходимо отметить повышенную сложность изготовления роторных штанцевальных форм.

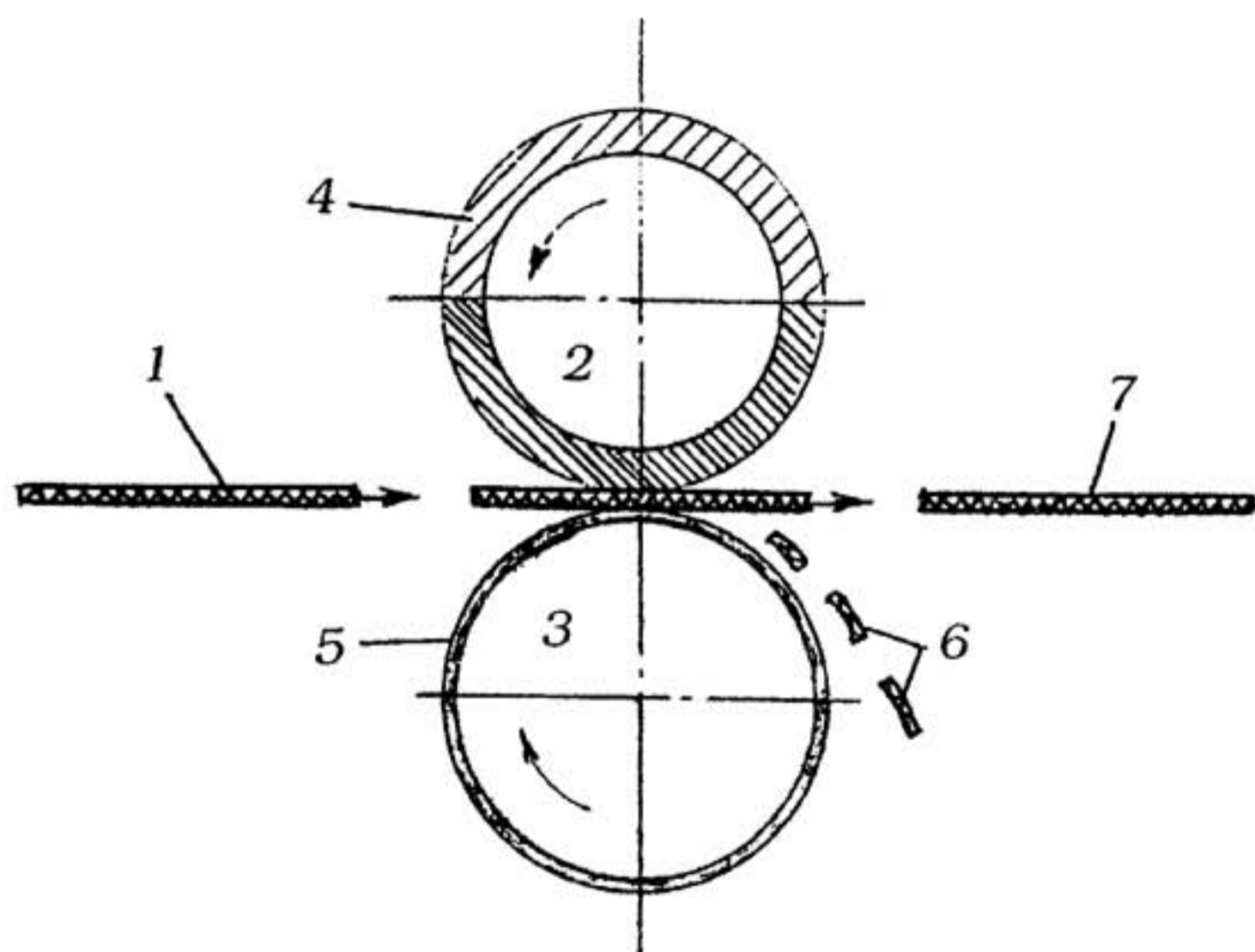


Рис. 6.21. Роторная штанцевальная машина:  
1 — лист картона или гофрокартона; 2, 3 — вращающиеся (роторные) валы; 4 — роторная штанцевальная форма;  
5 — полиуретановый бандаж; 6 — отходы;  
7 — заготовка коробки или ящичка

В массовом и крупносерийном производстве складных коробок и ящиков из картона и гофрокартона широко применяются плоскоштамповочные штанцевальные машины фирмы BOBST (Швейцария). Их производительность в зависимости от модели составляет от 6000 до 10 000 листов в час.

В средне- и малосерийном производстве предпочтительнее применение скоростных штанцевальных машин, например фирмы «Полиграф-КАМА» (Германия) производительностью 90–3300 листов в час. Максимальный формат листов составляет 720 × 1020 мм.

Для мелкосерийного производства коробок и ящиков из гофрированного картона применяют установки, в которых используется метод прокатывания плоской штанцевальной формы с уложенным на нее листом между двумя валами [24]. В России такие установки выпускает АО «КАРАТ» производительностью до 450 листов в час при форматах листов в зависимости от модели 850 × 2400, 1450 × 2700, 1720 × 2300 мм. КПЦ «Полиграфмаш» поставляет аналогичные установки производительностью 300 листов в час форматом 720 × 1020 мм.

#### *6.4.1. Штанцевание*

В технологии операцией называется часть технологического процесса, осуществляемая на одном рабочем месте над определенной деталью (или несколькими одновременно обрабатываемыми деталями) и охватывающая все последовательные действия рабочего и станка до перехода к обработке следующей детали [12, 30].

Комбинированная операция сочетает в себе две или несколько различных технологических операций. По способу совмещения различают три группы комбинированных технологических операций: совмещенные, последовательные и совмещенно-последовательные. В совмещенных операциях за один ход пресса и за одну установку заготовки в штампе одновременно выполняется несколько различных операций. В последовательных — несколько различных операций осуществляются последовательно отдельными пуансонами за несколько ходов пресса при перемещении заготовки между ними, причем за каждый ход

пресса получается готовая деталь. Совмещенно-последовательные операции сочетают в себе обе предыдущие группы [30].

Примером комбинированной совмещенной операции является штанцевание коробок и ящиков из картона. Оно включает комплекс операций, определяющих форму, геометрические размеры и конструктивные особенности коробок: высечку контура развертки, биговку линий сгиба на развертке, нанесение перфорации, надрезку и рицовку. В зависимости от конструкции получаемых коробок штанцевание могут составлять не все перечисленные операции, а лишь необходимые. Выполняют штанцевание на тигельных или роторных высекальных машинах, входящих в состав печатно-высекально-склеивающих автоматических поточных линий. Рабочим инструментом являются комбинированные штамповочные формы, конструкция которых предусматривает необходимую оснастку для выполнения соответствующих операций. Все перечисленные операции выполняются одновременно, как правило, на нескольких деталях, за один рабочий ход штамповочной формы. Очевидно, что различные операции оказывают взаимное влияние друг на друга, а конструктивные особенности комбинированных штамповочных форм определяют технологические возможности изготовления того или иного вида коробок, а также технико-экономические показатели процесса. Штанцевание осуществляют на плоских и ротационных автоматических или полуавтоматических прессах, на тигельных или плоскопечатных машинах фирм «Бобст», «Полиграф-КАМА», «Клюге» и др. Принцип работы таких машин заключается в подаче материала в штанцевальную секцию, штанцевании, выталкивании материала из штампа и выводе его из штанцевальной секции.

Комбинированная операция штанцевания определяет важнейшие технические характеристики получаемых коробок: точность и соответствие проекту геометрических размеров и формы, точность и качество последующей операции автоматической сборки коробок, их внешний вид, прочность, надежность, долговечность и т. д. Поэтому исследования основных конструктивных и технологических факторов составляющих ее отдельных операций, их взаимного влияния являются весьма актуальной задачей. Рассмотрим более подробно эти отдельные операции.



### 6.4.1.1. Высечка

Высечкой (в терминах холодной штамповки — просечка) называют разделение листовых неметаллических материалов главным образом по замкнутому наружному или по внутреннему контуру.

Высечка предназначена для придания заготовкам изделий из листовых материалов сложной конфигурации в соответствии с их конструкцией [6]. Одинаковый с высечкой вид деформаций материала характерен для родственных операций отрезки и надрезки. Отрезкой называют отделение материала от заготовки по незамкнутому контуру. Надрезкой — частичное отделение материала по незамкнутому контуру без удаления отделяемой части.

Процесс высечки можно представить в виде трех последовательных стадий деформации (рис. 6.22). Находящийся на недеформируемой жесткой матрице 1 листовый неметаллический материал 2 в зоне между прижимами 3 под действием приложенного к ножу 4 усилия высечки  $P$  прогибается. Величина прогиба оказывает заметное влияние на точность размеров заготовки и зависит от толщины материала 2 и его упругих свойств, расстояния между прижимами 3, состояния режущей поверх-

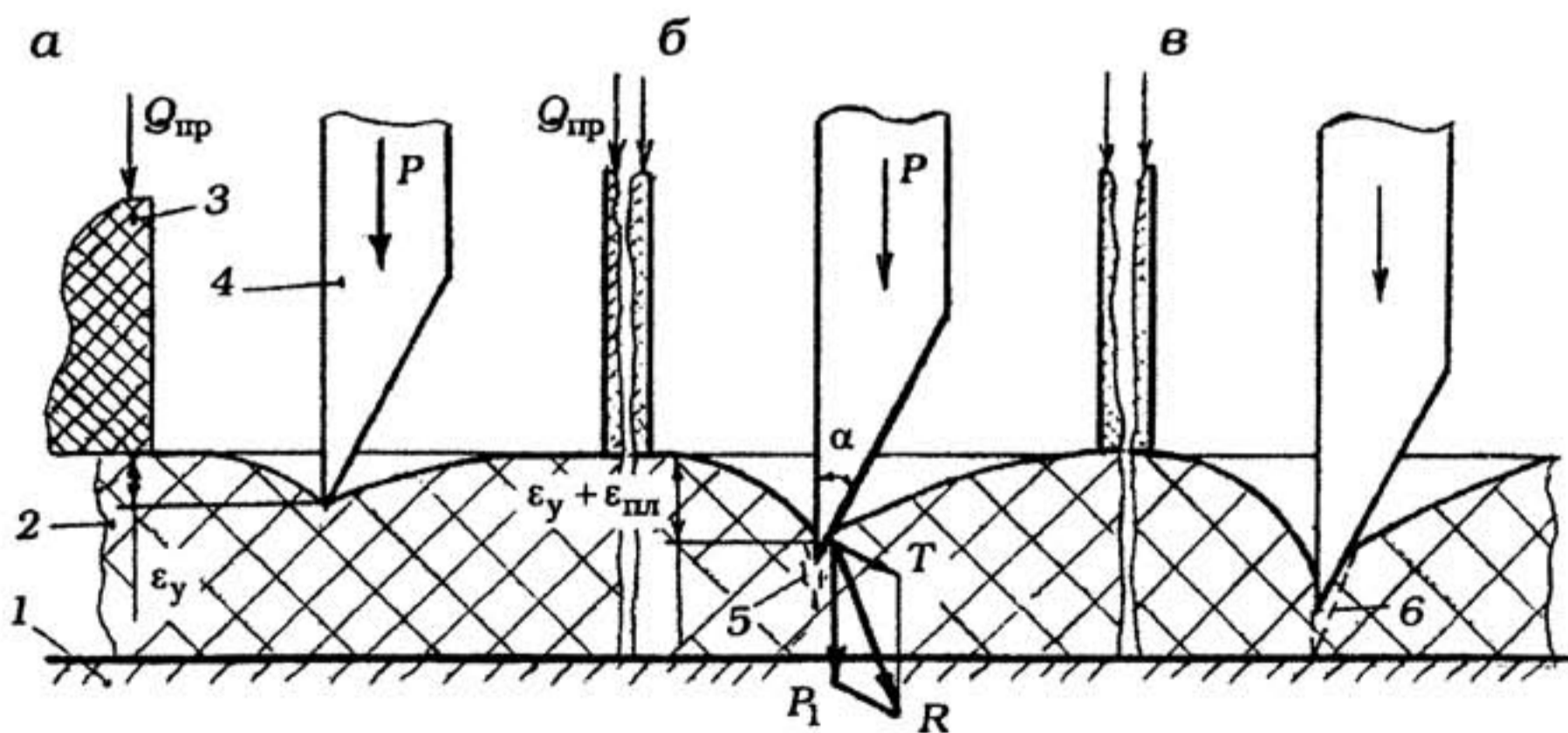


Рис. 6.22. Схема процесса высечки. Стадии деформации:  
а — упругая; б — пластическая; в — разрушение

ности и угла заточки ножа  $\alpha$ . На первой стадии упругих деформаций напряжения в материале не превосходят предела упругости. Для полимерных материалов упругие деформации  $\epsilon_y$  могут достигать 3–5%. На второй стадии пластической деформации напряжения в материале превышают предел текучести и постепенно возрастают, достигая максимума, соответствующего сопротивлению материала срезу. Наибольшие деформации сдвига расположены в плоскости скольжения, начинающейся у острия режущей кромки ножа. Для полимерных материалов вторая стадия носит характер вынужденных высокоэластических деформаций. Они могут достигать 100% и более. На этой стадии нож вдавливается в материал на 0,2–0,5 его толщины в зависимости от твердости и пластичности. На материал начинает действовать боковое распирающее усилие  $T$ :

$$T = P \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (6.1)$$

В этих условиях в плоскости скольжения происходит образование микро-, а затем и макротрещин 5. На третьей стадии разрушения наиболее опасная макротрещина стремительно переходит в магистральную трещину 6, вызывающую лавинное хрупкое разрушение и отделение одной части материала от другой. На срезанной кромке листа различают две зоны — блестящую, соответствующую пластической стадии, и матовую зону хрупкого лавинного разрушения.

**Необходимое для высечки усилие  $P$**  зависит от периметра развертки коробки  $\Pi_k$ , толщины  $S_M$  и механических свойств материала ( $\sigma_{ср}$ ), усилия сжатия прижима  $Q_{пр}$ :

$$P = \Pi_k S_M \sigma_{ср} + Q_{пр}. \quad (6.2)$$

Учитывая побочные явления при высечке, неравномерность толщины материала и затупление режущих кромок, требуемое усилие высечки принимают больше расчетного с поправочным коэффициентом 1,3–2,0.

Долговечность ножей, характеризующая длительность сохранения требуемой остроты, определяется оптимальным соотношением целого комплекса факторов: материала ножа, его

геометрической формы, угла и качества заточки, твердости режущей кромки, состоянием режущей поверхности, свойствами высекаемого материала и т. д.

Отечественные **ножи для высечки** изготавливают из полос высокоуглеродистой стали марки У8. Для повышения долговечности режущую часть закаливают до твердости  $HR_c = 55-58$ . Наиболее распространена односторонняя заточка с прямолинейной фаской. Угол заточки для картона  $\alpha = 21-22^\circ$ , для картона с полимерной пленкой  $\alpha = 23-24^\circ$ . При высечке заготовки изделия по периметру ножи устанавливают фаской наружу, в сторону обрезков. При высечке отверстий в заготовке ножи размещают фаской внутрь, в сторону удаляемой части материала. Однако такая форма заточки не является оптимальной. Во-первых, в процессе высечки на фаску ножа действует сила реакции материала в направлении, противоположном боковому распирающему усилию  $T$ . Она достигает значительной величины, поскольку напряжение сжатия бумаги, картона и полимерных материалов на второй стадии высечки под лезвием ножа превышает 200 МПа. Эта неуравновешенная сила реакции создает в теле ножа изгибающие напряжения, которые в условиях высокоскоростной многоциклового высечки сокращают срок его эксплуатации. Во-вторых, на фаску ножа со стороны высекаемого материала действует сила трения, приводящая при скоростном многоциклового нагружении к изменению геометрии фаски и затуплению ножа. В-третьих, ножами с односторонней фаской сложно получить высокую точность размеров высекаемых деталей, особенно при использовании ламинированных материалов. Отмеченные недостатки значительно уменьшаются при использовании односторонней заточки с двойной прямолинейной фаской (рис. 6.23). Ножи с односторонней заточкой предпочтительны для высечки заготовок со сложным контуром. Более высокие эксплуатационные характеристики отличают ножи с двусторонней заточкой с прямолинейной фаской. Самыми лучшими свойствами обладают ножи с двусторонней заточкой с двойной прямолинейной фаской. Для высечки материалов толщиной до 2 мм следует отдавать предпочтение ножам с прямолинейной фаской. При высечке бо-

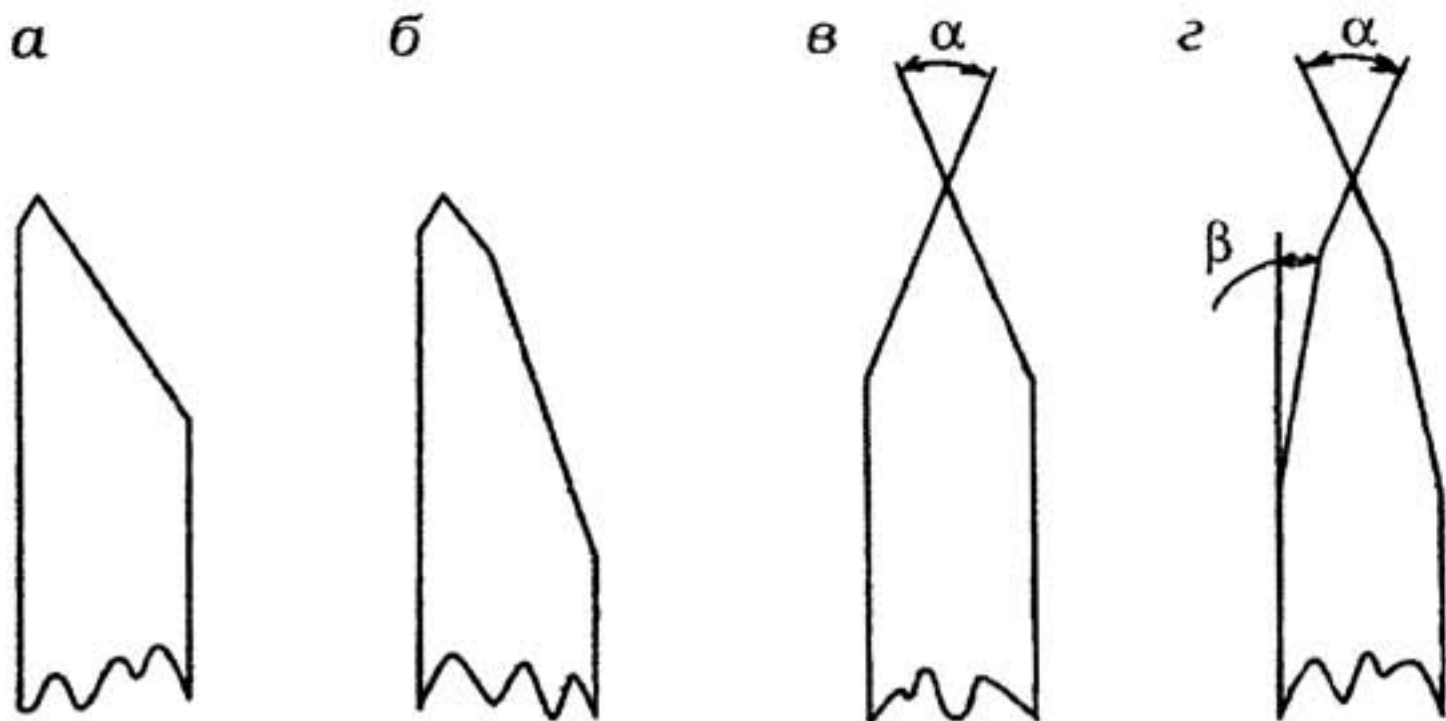


Рис. 6.23. Профили режущей части ножей для высечки: односторонняя заточка с прямолинейной фаской (а) и двойной прямолинейной фаской (б); двусторонняя заточка с прямолинейной фаской (в) и двойной прямолинейной фаской (г)

лее толстых материалов могут возникать дополнительные проблемы со съемом высеченного материала с ножа. В этом случае преимущество имеют ножи с двойной прямолинейной фаской. Вполне понятно, что каждый более совершенный профиль заточки ножей сложнее выполнить технически, поэтому он является и более дорогим. Целесообразность выбора соответствующего профиля заточки ножей должна быть подтверждена технико-экономическим анализом.

На российском рынке широко представлены режущие ножи ведущих мировых производителей — MARTIN MILLER (MM), GNU PENTRA (GNU), ESSMANN + SCHAEFER (E + S) и др. [47, 51].

Экспортируемые ножи представляют практически все применяемые для высечки геометрические профили режущей части: с одно- и двусторонней заточкой, с прямоугольной и двойной прямолинейной фаской. Условные обозначения различных профилей ножей приведены в табл. 6.4. Их поставляют в виде узких полос толщиной от 0,4 до 2 мм и длиной до 1 м, поэтому за внешнюю схожесть их часто называют режущими линейками. Они отличаются очень высокой точностью геометрических размеров (см. табл. 6.5). Стандартной считается высота  $H$  от 22,8 до 24,1 мм, допуск на отклонения высоты состав-

## Профили ножей для высечки

Вид заточки	Тип фаски	Условное обозначение	
		отечественное	иностранное
Односторонняя	Прямолинейная	ОП	В
	Двойная прямолинейная	ОДП	ВВ
Двусторонняя	Прямолинейная	ДП	А
	Двойная прямолинейная	ДДП	АА

Таблица 6.5

**Допустимые отклонения геометрических размеров ножей для высечки по DIN 1544 P и ориентировочный вес 100 м при стандартной высоте  $H = 22,8-24,1$  мм**

Толщина $S_H$			Эксцентриситет режущей кромки $M$ , мм	Эскиз	Вес 100 м, кг
пункты	мм	отклонение, мм			
1,1	0,40	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$		8,2
1,5	0,50	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$		10
2,0	0,71	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$		13
3,0	1,05	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$		20
4,0	1,42	$\pm 0,025$	$\pm 0,04$		26
5,7	2,00	$\pm 0,030$	$\pm 0,04$		36

ляет  $\pm 0,02$  мм. Наиболее часто на практике используются ножи высотой  $H = 23,8$  мм. В случае необходимости можно применять специальные ножи большей высоты: 25,4; 28,6; 30; 33,5; 35; 40; 50; 60; 70; 80; 90 и 100 мм.

Толщину принято измерять в пунктах (п) и миллиметрах (мм):  $1 \text{ п} = 0,351 \text{ мм}$ . Ножи толщиной 0,4, 0,5 и 0,71 мм высотой 8 и 12 мм применяют для высечки этикеток. Для высечки картона используют, как правило, ножи толщиной 0,71 мм. Высечку коробок из гофрокартона и других многослойных материалов осуществляют более толстыми ножами. Наиболее распространенный угол двусторонней заточки  $\alpha$  составляет  $52-54^\circ$ . При высечке на каждый погонный метр длины такого ножа прикладывается усилие около 1 т. Снижают усилие

высечки уменьшением угла  $\alpha$ . В Японии чаще всего применяют ножи с  $\alpha = 42^\circ$ , при этом усилие высечки снижается на 20–25%. В ножах с двойной прямолинейной фаской угол  $\beta \approx 4^\circ$ . В Европе ножи с  $\alpha = 42^\circ$  используют преимущественно для высечки ламинированных материалов, содержащих слои полимерных пленок.

Состояние режущей поверхности определяет способ заточки. Чем выше чистота поверхности, тем долговечнее нож и выше качество высечки. Заточку ножей выполняют двумя способами: протяжкой, условно обозначаемой *MM*, и шлифованием, обозначаемым *SL* [46, 53].

Протяжкой называется способ обработки металлов давлением в холодном состоянии, приводящий к изменению размеров заготовки путем уменьшения ее поперечного сечения при неизменном объеме материала. Протяжку режущей поверхности ножей осуществляют на специальных автоматах, пропускающая заготовку между расположенными под углом вращающимися валиками в несколько переходов с изменяющимся углом и зазором между валиками. Получаемый профиль отличается высокой точностью размеров. Протяжкой формируют только прямолинейный тип фаски у стальных заготовок, обладающих высокой пластичностью. Подвергнутая протяжке область материала вследствие упрочнения (наклепа) имеет повышенные прочностные характеристики и твердость, а также повышенное сопротивление деформированию. Заточенные протяжкой ножи характеризуются низкой стоимостью.

В процессе протяжки на режущей поверхности ножей возникают продольные риски от формообразующих валиков. Ориентация таких рисков перпендикулярна направлению движения ножа при высечке, что снижает качество реза, долговечность ножей и способствует образованию пыли (рис. 6.24).

Шлифованием называется способ обработки поверхности абразивным инструментом, приводящий к изменению размеров и формы заготовки за счет удаления слоя обрабатываемого материала. Шлифование осуществляют на шлифовальных станках шлифовальными абразивными кругами со специальными профилями, обеспечивающими получение деталей сложной конфигурации. Шлифованием можно обрабатывать

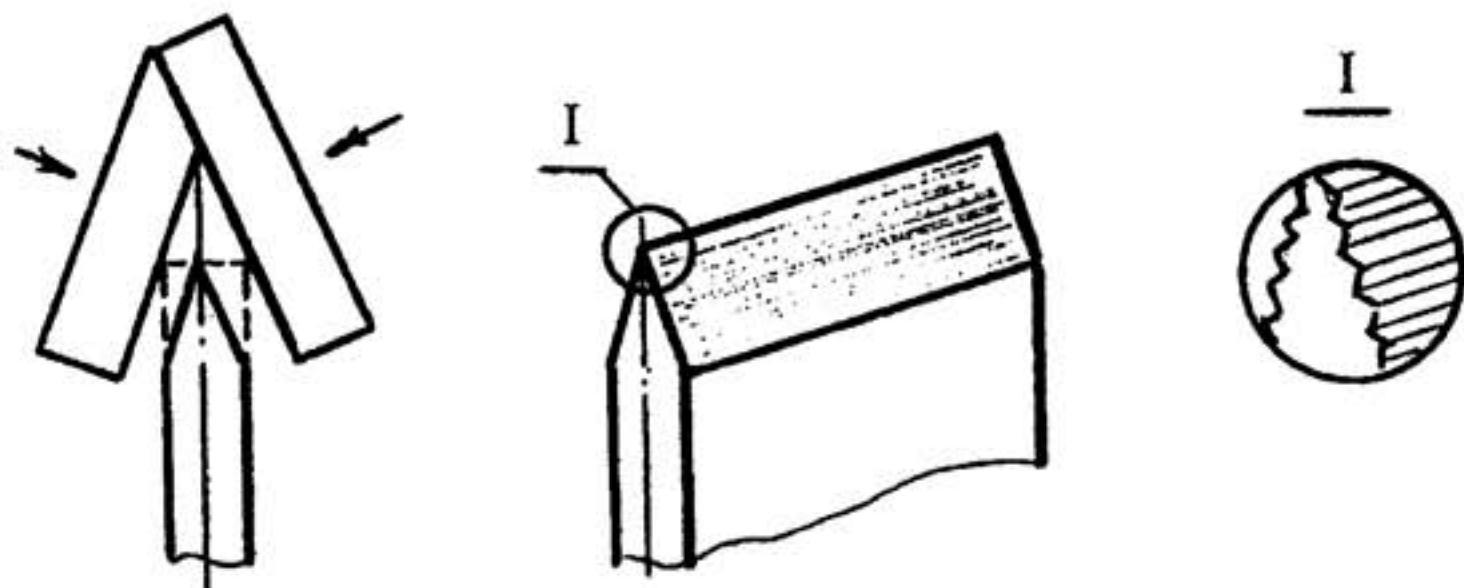


Рис. 6.24. Режущие ножи, изготовленные протяжкой

стальные заготовки повышенной твердости и прочности, в том числе подвергнутые специальной закалке. Этим способом получают любые профили ножей с гораздо более высокой чистой поверхностью фаски, чем при протяжке. Имеющиеся на режущей поверхности неглубокие риски от абразивного инструмента ориентированы по направлению движения ножа при высечке, поэтому они практически не отражаются на качестве реза и не снижают долговечности ножей (рис. 6.25).

**С точки зрения твердости** к ножам предъявляются противоречащие друг другу требования. С одной стороны, твердость режущей поверхности должна быть максимальная: чем выше твердость режущей кромки, тем долговечнее нож. С другой стороны, ножи должны обладать высокой пластичностью для обеспечения требуемых остаточных деформаций в процессе гибки с целью получения сложной конфигурации, соответствующей

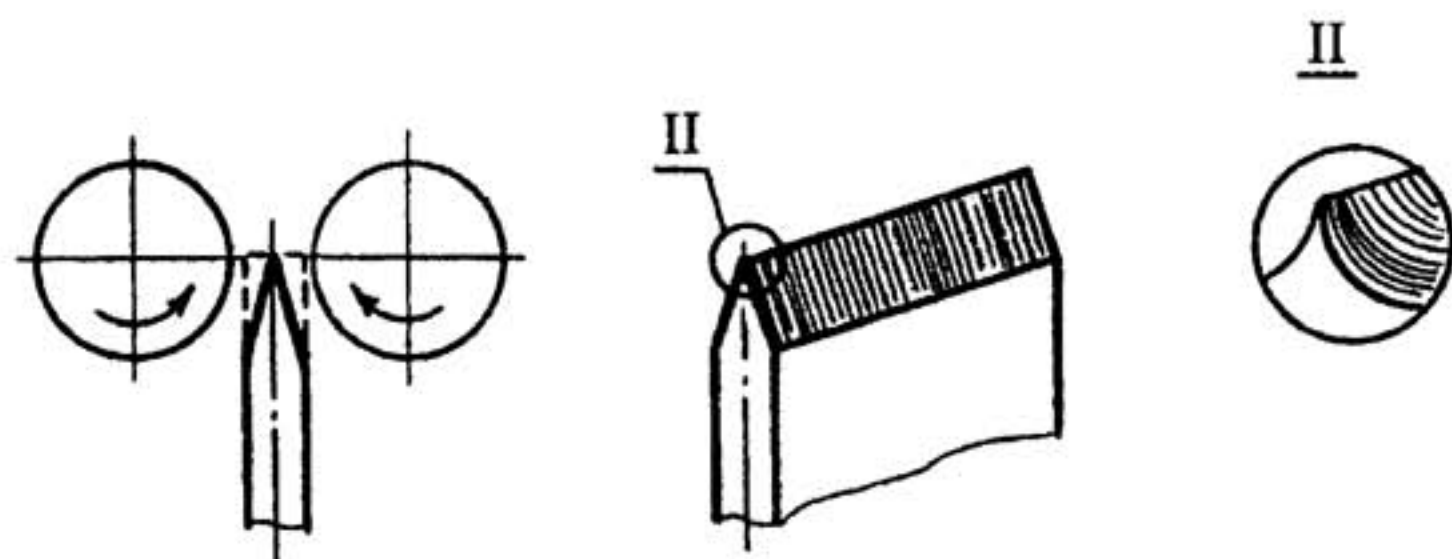


Рис. 6.25. Режущие ножи, изготовленные шлифованием

ющей развертке высекаемых деталей. Известно, что с повышением твердости сталей увеличивается их жесткость и уменьшается пластичность. Разрешается эта проблема за счет разной твердости тела ножа и его режущей части. Высокая твердость режущей части обеспечивается либо в процессе протяжки вследствие наклепа, либо путем местной закалки режущей части ножа.

Тело ножей имеет тонкий поверхностный слой толщиной 0,02–0,03 мм с пониженным содержанием углерода. Этот слой придает телу ножа повышенную мягкость и эластичность, способствует процессу гибки ножей без образования складок материала и поверхностных микротрещин.

Самой высокой пластичностью обладают ножи со средней твердостью тела и твердостью режущей части 35 HR<sub>c</sub> после протяжки (табл. 6.6). Их можно сгибать на максимальный угол 90°. Более твердые ножи (№ 3 и № 4) имеют заметное уменьшение деформационной способности. Местная закалка позволяет повышать твердость режущей части до 53 HR<sub>c</sub> при сохранении средней твердости тела ножа. Такие ножи выпускают, например, фирма ММ под торговой маркой Viking FLEX 40 HF. Ножи самого высокого качества, выпускаемые под маркой Viking FLEX 34 HP Starcut, имеют более жесткие допуски на отклонения по высоте ( $\pm 0,01$  мм) и дополнительное микронапыление на режущих фасках, что значительно повышает качество высечки, особенно для многослойных полимерных материалов.

Таблица 6.6

### Твердость ножей для высечки

Твердость		Условное обозначение ножа	Максимальный угол сгибания
тела ножа	режущей части		
40 HR <sub>c</sub>	40 HR <sub>c</sub>	ММ 40	130°
44 HR <sub>c</sub>	44 HR <sub>c</sub>	ММ 44	110°
45 HR <sub>c</sub>	45 HR <sub>c</sub>	ММ 47	100°
39 HR <sub>c</sub>	51 HR <sub>c</sub>	FLEX 40 HF	130°
34 HR <sub>c</sub>	61 HR <sub>c</sub>	FLEX 34 HP	130°
39 HR <sub>c</sub>	61 HR <sub>c</sub>	FLEX 40 HP	130°
39 HR <sub>c</sub>	67 HR <sub>c</sub>	FLEX 40 HP+	130°



Ножи с незакаленной режущей кромкой с твердостью от 35 до 49  $HR_c$  (№ 2–4, типа ММ фирмы ММ) имеют тиражестойкость от 20 тыс. до 500 тыс. резов. Закалка режущей кромки до 53  $HR_c$  повышает тиражестойкость ножей до 100 тыс. – 1 млн. резов.

Закалку режущей кромки ножей осуществляют электроиндукционным методом, а также с помощью обработки лазерным лучом и плазмой. Толщина закаленного слоя не должна превышать 22–25 мкм, в противном случае при гибке ножа режущая кромка сломается [46].

Фирма ММ разработала технологию закалки режущей кромки ножей до твердости 61–63  $HR_c$ . В процессе обработки плазмой при  $T = 4000^\circ C$  происходит расплавление вершин микронеровностей режущей поверхности. Такие ножи, выпускаемые под маркой НР, имеют гладкую режущую поверхность, образуют гораздо меньше пыли при производстве упаковки и отличаются повышенной тиражестойкостью, до 2 млн. резов [51].

Микронапыление на режущие фаски ножей осуществляют твердыми сплавами. Это повышает чистоту поверхности фасок, увеличивает срок службы ножей. Наиболее дорогое и высококачественное — покрытие из сплавов на основе молибдена. Покрытия из сплавов на основе нитридов титана (золотистого цвета) дешевле примерно на 30%, но такие покрытия не устраняют, а практически полностью повторяют дефекты поверхности режущих фасок [47].

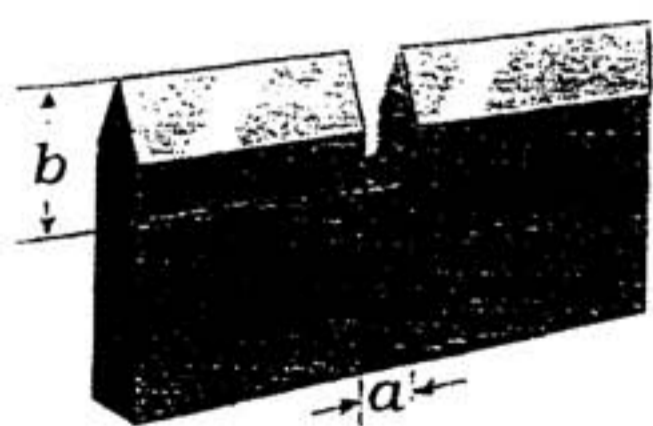


Рис. 6.26. Прорезы (засечки) в режущей части ножей для образования перемычек

Отделение деталей от отходов производят не в высекальных машинах, а в последующих за ними специальных установках. Для обеспечения транспортировки к этим установкам при высечке предусматривают систему тонких перемычек между деталями и отходами. Перемычки образуются на месте прорезей прямоугольной формы в режущей части ножей (рис. 6.26), часто называемых засечками. Ширину этих прорезей  $a$ ,

равную ширине перемычек, в зависимости от площади конфигурации развертки детали устанавливают для картона от 0,4 до 1 мм, для гофрокартона — от 1 до 3 мм. Глубина прорезей  $b$  примерно на 0,2 мм должна превышать толщину высекаемого материала. Выполняют такие прорезы специальными шлифовочными машинами с использованием калиброванных по размерам шлифовальных кругов. Фирма «Chappel», к примеру, выпускает два типа легких компактных специальных шлифовочных машин, обеспечивающих строгую вертикальность и постоянство ширины на всю глубину получаемых прорезей. Машина типа AG с высокоскоростным малошумящим пневматическим двигателем комплектуется набором шлифовальных кругов следующих толщин: 0,4; 0,5; 0,7; 0,8; 1 и 1,2 мм. Машина типа ТМРО1 имеет два варианта двигателей: пневматический и электрический. На нее можно устанавливать шлифовальные круги толщиной от 0,3 до 3 мм [46].

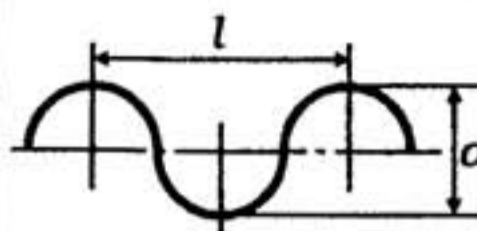
Некоторые материалы при высечке могут образовывать острые кромки, опасные для пользователя упаковки. В этом случае применяют волнистые ножи. По высекаемому профилю различают волнистые с периодически повторяющейся симметричной волной и с хаотичной несимметричной волной. Наиболее часто применяемая высота волнистых ножей от 22,8 до 23,8 мм. Ножи с симметричной периодически повторяющейся волной выпускают двух видов — А и В. Вид А представляют ножи с волной, проходящей через все тело. Их изготавливают из стали средней твердости около 35 HR<sub>c</sub> толщиной  $S_H = 2\Pi = 0,71$ . У ножей вида В волна выполнена только на режущей кромке. Ножи с симметричной волной вида В и с хаотичной волной выполняют из сталей средней твердости 35 HR<sub>c</sub> и твердых 40 HR<sub>c</sub> толщиной  $S_H = 0,71$  мм и  $S_H = 1,05$  мм. Основные геометрические параметры профиля ножей с симметричной волной приведены в табл. 6.7.

#### 6.4.1.2. Рицовка

Рицовкой (от нем. ritzen — царапать) называют неглубокий надрез поверхности заготовки.

По своей сути рицовка схожа с процессом высечки, но заканчивается на ее второй стадии — пластических деформа-

## Характеристики профиля ножей с симметричной волной

Контур профиля	Размер профиля		Вид А фирмы GNU-WLA, фирмы E+S, фирмы MM	Вид В		
	длина волны $l$	амплитуда волны $a$		фирмы GNU-WLB	фирмы E+S	фирмы MM
	2,0	1,25	—	+	+	+
	3,5	1,50	—	+	+	+
	5,0	2,00	+	+	+	+
	6,3	2,30	—	—	+	+
	8,0	2,80	—	—	+	+
	10,0	3,50	—	—	+	+
	11,0	4,00	+	+	+	+

ций. Рицовку выполняют ридовочными ножами несколько меньшей высоты (22,6–23,6 мм), чем у ножей для высечки. Профиль режущей части ридовочных ножей — двусторонняя заточка с прямолинейными фасками. Их изготавливают из сталей различной твердости: средней (35 HR<sub>C</sub>), твердых (40 HR<sub>C</sub>) и очень твердых (49 HR<sub>C</sub>), толщиной 0,71, 1,05 и 1,42 мм.

Для выполнения ридовки в местах клеевого скрепления коробок, обеспечивающей быстрое проникновение клея в надрезанный поверхностный слой материала и, как следствие, значительное повышение прочности клеевого соединения, фирма E+S разработала специальную конструкцию ножа. Режущая поверхность имеет прорезы шириной, равной длине режущей части. Образованные таким способом режущие зубчики развернуты под углом друг к другу (рис. 6.27), поэтому ридовка получается в виде прерывистой змейки с максимальной амплитудой 5 мм. Такие ридовочные ножи выпускают с размерами прорези и режущей фаски соответственно (в п): 2:2; 3:3; 2:4; 4:4.



Рис. 6.27. Ридовочные ножи для клеевого скрепления коробок

### 6.4.1.3. Перфорация

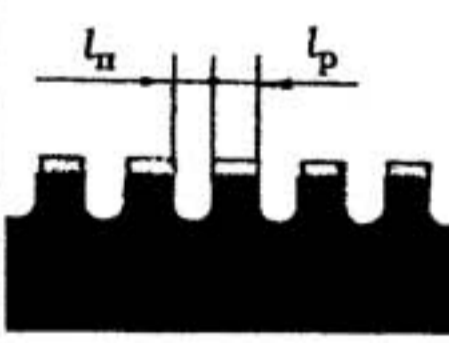
Перфорацией называют высечку цепочки близко расположенных друг

от друга круглых, продолговатых или щелеобразных отверстий небольшого размера. Высечку щелеобразных отверстий осуществляют перфорационными ножами. По форме профиля режущей части, твердости стали и номенклатуре толщин они не отличаются от ридовочных ножей. Наиболее употребляемая высота от 22,0 до 23,8 мм.


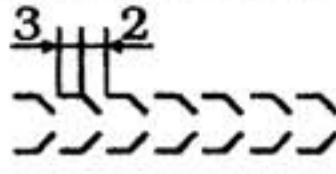
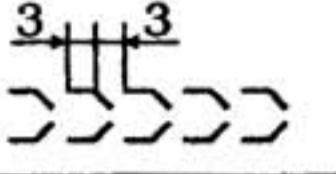
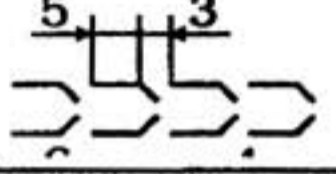
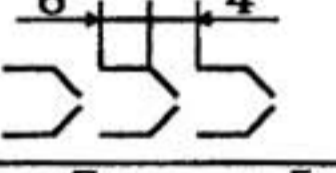
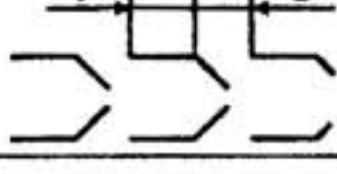
Линейную перфорацию выполняют ножами с двусторонней прямолинейной заточкой, у которых в режущей части через одинаковые промежутки  $l_p$  имеются прорезы шириной  $l_n$ , напоминающие прорезы (засечки) у ножей для высечки. Обычно выражаемые в пунктах (п)  $l_p$  и  $l_n$  не могут быть меньше толщины материала коробки. Наиболее часто встречающиеся на практике значения  $l_p$  и  $l_n$  ножей для линейной перфорации приведены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

**Стандартные размеры ножей для линейной перфорации**

Эскиз режущей части перфорационного ножа	Размер (п)		Эскиз перфорации	Фирма-производитель		
	прорези $l_n$	режущей кромки $l_p$		GNU-PL	E+S	MM
	2	2	-----	+	+	+
	2	4	-----	+	+	+
	2	6	-----	+	+	+
	2	8	-----	+	+	+
	2	10	-----	+	+	+
	2	12	-----	+	+	+
	2	16	-----	+	+	+
	2	18	-----	+	—	+
	2	24	-----	+	—	+
	2	30	-----	+	—	+
	3	3	-----	+	+	+
	3	4	-----	—	+	+
	3	6	-----	—	+	+
	3	12	-----	—	+	+
	4	4	-----	+	+	+
	4	6	-----	—	+	+
	4	12	-----	—	+	+
	6	6	-----	+	+	+
	6	8	-----	—	+	+
	6	12	-----	—	+	+

Типовые размеры угловых перфорационных ножей

Эскиз режущей части ножа	Шаг перфорации, мм	Эскиз перфорации	Фирма-изготовитель		
			GNU-RL	E+S	MM
	5		—	+	+
	6		+	+	+
	8		+	+	+
	10		+	+	+
	12		—	+	+

Угловую перфорацию получают с помощью ножей, режущая часть которых через одинаковые расстояния имеет надрезки, загнутые под тупым углом к оси ножей. Режущая кромка таких ножей и нанесенная ими перфорация представляют собой последовательность тупых углов, отогнутая сторона которых равна расстоянию между соседними элементами перфорации. Угловые перфорационные ножи изготавливают из твердой стали 40 HRC толщиной 0,71 и 1,05 мм. Как правило, их выпускают парами: левого и правого исполнения. Такой парой ножей обычно выполняют перфорацию в виде полос, которые впоследствии вырываются из материала коробки, образуя соответствующие отверстия. Типовые размеры угловых перфорационных ножей приведены в табл. 6.9.

#### 6.4.1.4. Биговка

Биговкой называют предварительное нанесение на материал линий сгибов (биггов) в виде выдавленных канавок определенного профиля.

Биговка предназначена для снижения жесткости листовых заготовок по линии сгиба. Она значительно облегчает условия образования сгибов и является эффективным средством повышения качества складных коробок, особенно в условиях автоматизированной сборки.

Биговка представляет собой процесс местной вытяжки материала и осуществляется по следующей схеме. Материал заготовки 1 эластичными пружинящими прижимами 3 плотно фиксируется на жесткой матрице 5 и обтягивает поверхность биговальной матрицы 4 по линии  $ABCDEF$  (рис. 6.28), после чего специальным пуансоном 2, называемым биговальным ножом или биговальной линейкой, осуществляется местная вытяжка в зоне биговального канала. При таком процессе напряженно-деформированное состояние материала заготовки 1 непрерывно изменяется от сочетания одноосного сжатия и растяжения в зоне прижима до двухосного растяжения в зоне вытяжки биговальным ножом. Наибольшая интенсивность напряженно-деформированного состояния возникает в областях перехода от плоской части заготовки к формуемой канавке и по оси вытяжки в вершине канавки.

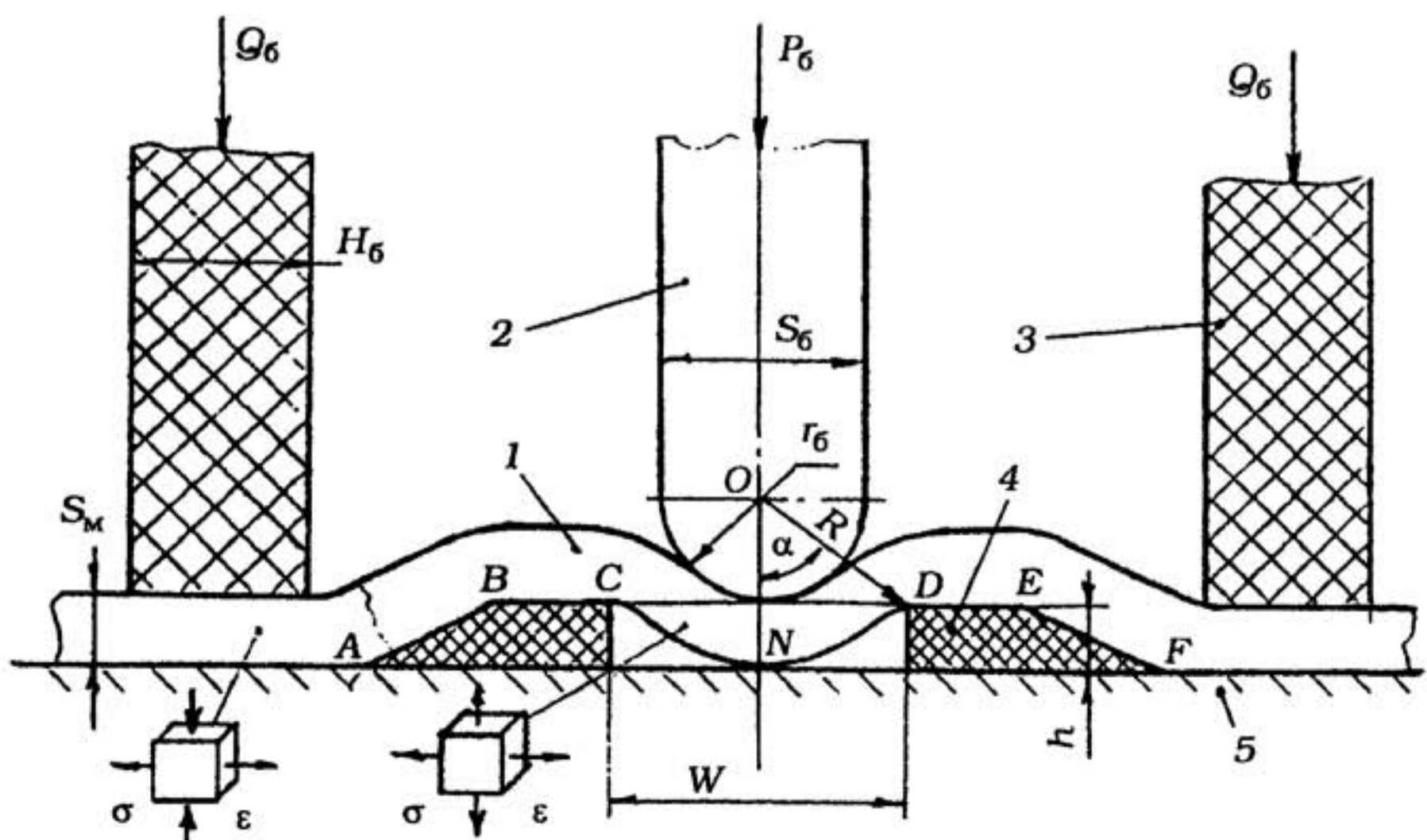


Рис. 6.28. Схема процесса биговки

Усилие биговки  $P_6$  может быть определено по формуле

$$P_6 = L_6 S_M \sigma_6 k, \quad (6.3)$$

где  $L_6$  — длина биговочной канавки;  $\sigma_6$  — предел прочности материала коробки;  $k$  — коэффициент, зависящий от профиля биговочной канавки.

Усилие прижима при биговке  $Q_6$  должно равномерно распределяться вдоль биговального ножа:

$$Q_6 = q L_6 H_6, \quad (6.4)$$

где  $q$  — удельное давление прижима;  $H_6$  — толщина эластичного пружинящего прижима.

Соотношение между усилиями прижима и биговки должно удовлетворять условию

$$\frac{Q_6}{f_1} \geq \frac{P_6}{f_2} \geq \frac{L_6 S_M \sigma_M k}{f_2}, \quad (6.5)$$

где  $f_1$  — коэффициент трения между материалом и прижимом;  $f_2$  — коэффициент трения между материалом и матрицей.

Процесс вытяжки материалов приводит к явлению ориентации их внутренней структуры и, как следствие, к изменению механических свойств. Если образец из листового материала подвергать вытяжке в одном направлении (одноосная вытяжка), то с увеличением степени вытяжки многие его свойства — ударная вязкость, прочность, жесткость и др. — будут возрастать в направлении вытяжки и уменьшаться в перпендикулярном направлении. Различия в свойствах будут тем больше, чем больше степень вытяжки. Такая анизотропия свойств не возникает при двухосной вытяжке, примером которой служит биговка.

Необходимо учитывать, что для каждого материала существует предельное значение вытяжки, при превышении которого происходит его самопроизвольное расслоение. Предельное значение вытяжки зависит и от условий ее проведения: температуры, влажности, скорости деформирования, конструктивных особенностей технологического оснащения и т. п.

Поэтому определение оптимального геометрического профиля биговального канала, зависящего от величины (степени) вытяжки, для каждого материала является предметом дополнительных исследований.

Степень вытяжки  $\epsilon_{\text{в}}$  принято выражать в процентах относительного увеличения площади формуемой заготовки:

$$\epsilon_{\text{в}} = \frac{F_{\text{д}} - F_{\text{з}}}{F_{\text{з}}} \cdot 100\%, \quad (6.6)$$

где  $F_{\text{д}}$  — площадь поверхности отформованной детали;  $F_{\text{з}}$  — площадь поверхности заготовки.

Для изделий многих конфигураций  $\epsilon_{\text{в}}$  проще выражать как относительное увеличение определяющего линейного размера, например длины периметра сечения формуемой детали:

$$\epsilon_{\text{в}} = \frac{l_{\text{д}} - l_{\text{з}}}{l_{\text{з}}} \cdot 100\%, \quad (6.7)$$

где  $l_{\text{д}}$  — определяющий линейный размер детали;  $l_{\text{з}}$  — тот же размер в заготовке.

Степень вытяжки  $\epsilon_{\text{в}}$  часто выражают и как относительное утонение материала формуемой детали:

$$\epsilon_{\text{в}} = \left( \sqrt{\frac{S_{\text{м}}}{S_{\text{д}}}} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (6.8)$$

где  $S_{\text{м}}$  — толщина заготовки;  $S_{\text{д}}$  — толщина стенки детали в зоне максимальной вытяжки.

Если допустить, что в области между прижимами и биговальным ножом (на участках  $ABC$  и  $DEF$ , см. рис. 6.23) материал не подвергается вытяжке, а местная вытяжка осуществляется лишь на участке  $CD$ , в результате чего плоская поверхность преобразуется в участок цилиндрической поверхности с внешним радиусом  $R$ , центральным углом  $2\alpha$  и высотой  $h$ , то, согласно формуле (6.7), степень вытяжки при такой схеме биговки можно выразить соотношением



$$\varepsilon_B = \frac{\cup CD - CD}{CD} \cdot 100\%. \quad (6.9)$$

На практике обычно выбирают высоту биговального канала  $h$  приблизительно равной толщине материала заготовки:  $h = S_M$ . Зазор между нижней точкой биговального ножа и дном биговального канала также принимают равным толщине материала заготовки  $S_M$ . В этом случае, пренебрегая утонением материала, можно принять, что

$$R = r_6 + S_M, \quad (6.10)$$

где  $r_6$  — радиус головки биговального ножа.

Из  $\triangle OND$  с учетом (6.10) можно определить величину  $\alpha$  и  $ND$ :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{r_6}{r_6 + S_M}\right), \quad (6.11)$$

$$ND = \frac{W}{2} = \sqrt{R^2 - r_6^2} = S_M \sqrt{\frac{2r_6}{S_M} + 1}, \quad (6.12)$$

откуда

$$CD = W = 2S_M \sqrt{\frac{2r_6}{S_M} + 1} = 2S_M \sqrt{\frac{S_6}{S_M} + 1}. \quad (6.13)$$

Следует отметить, что уравнение (6.13) определяет минимально допустимую ширину биговального канала  $W$ , при которой в заготовке не будет возникать напряжений сдвига (в области между вертикальными стенками биговального ножа и биговального канала), вызывающих растрескивание материала или его разрушение. На практике широкое применение получил упрощенный вариант формулы (6.13):

$$W = S_6 + K S_M. \quad (6.14)$$

Коэффициент  $K$  выбирают в диапазоне 1,5–2. Нетрудно рассчитать, что при условии  $S_6 = S_M$  из формулы (6.13)  $W \approx 2,8 S_M$ .

В зависимости от значения  $K$  по формуле (6.14) при  $S_6 = S_M$  величина  $W = (2,5-3,0) S_M$ .

Длина дуги

$$\cup CD = 2\pi R \frac{2\alpha}{360}. \quad (6.15)$$

Подставляя в (6.15) значения (6.10) и (6.11), получаем

$$\cup CD = 2(r_6 + S_M) \arccos\left(\frac{r_6}{r_6 + S_M}\right). \quad (6.16)$$

С учетом (6.13) и (6.15)

$$\varepsilon_6 = \frac{(r_6 + S_M) \arccos\left(\frac{r_6}{r_6 + S_M}\right) - S_M \sqrt{\frac{2r_6}{S_M} + 1}}{S_M \sqrt{\frac{2r_6}{S_M} + 1}}. \quad (6.17)$$

По вычисленной величине  $\varepsilon_6$  (6.8) можно рассчитать минимальную толщину заготовки в зоне биговки  $S_d$ :

$$S_d = \frac{S_M}{\varepsilon_6^2 + 1}. \quad (6.18)$$

Качество биговки определяют точность геометрических размеров и состояние рабочей поверхности биговального ножа и биговального канала, а также точность совмещения их осей симметрии.

В Европе выпускают три разновидности биговальных ножей: стандартные или нормальные, с утолщенной формующей головкой и с зауженной формующей головкой. Их изготавливают из листовой стали в виде полос длиной 1 м, твердостью 37–43 HR<sub>c</sub>, формующая поверхность головки шлифованная, высокой чистоты.

Стандартные биговальные ножи (условное обозначение R) имеют полуцилиндрическую поверхность формующей головки  $r_6$  (рис. 6.29):

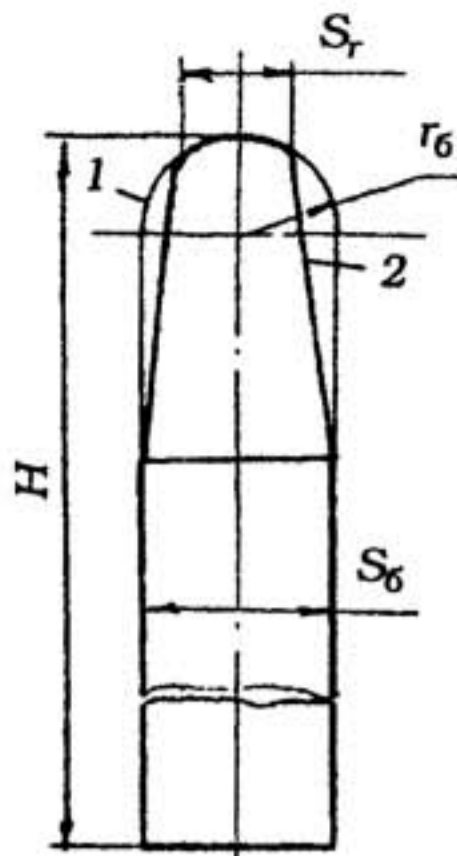


Рис. 6.29. Стандартные (1) и зауженные (2) биговальные ножи

$$r_6 = \frac{S_6}{2} \pm 0,05 \text{ (мм)}.$$

Их выпускают высотой от 21,0 до 23,6 мм с допуском  $-0,04$  мм и повышенной точности с допуском  $-0,02$  мм, толщиной от 0,4 до 2 мм и допустимыми отклонениями толщины такими же, как у ножей для высечки (см. табл. 6.6). По специальному заказу можно получать и биговальные ножи другой высоты, а также ножи толщиной 3 мм из алюминиевых сплавов.

Биговальные ножи с утолщенной формующей головкой (условное обозначение RT и FRT) выпускают общей

высотой от 21,0 до 23,6 мм, допустимое отклонение по высоте  $\pm 0,03$  мм, они имеют ножку высотой  $F_h = (18,5 \pm 0,5)$  мм, толщины ножек от 0,4 до 2,0 мм с допустимыми отклонениями такими же, как у стандартных ножей. Формующая головка большей толщины  $K_d$  с допустимым отклонением  $\pm 0,3$  мм заканчивается полуцилиндрической поверхностью с радиусом  $r_r$ :

$$r_r = \frac{K_d}{2} - 0,05 \text{ (мм)},$$

эксцентриситет осей симметрии ножки и формующей головки  $M = \pm 0,05$  мм.

Размеры наиболее распространенных биговальных ножей с утолщенной формующей головкой приведены в табл. 6.10.

Для биговки толстого картона и гофрокартона применяют биговальные ножи с утолщенной формующей головкой, не цилиндрической, а плоской формующей поверхностью (условное обозначение FRT фирмы MM). Они незаменимы при биговке вдоль направления волны гофрокартона.

Биговальные ножи с зауженной формующей головкой (условное обозначение RL, RR или RKante) предназначены глав-

**Размеры биговальных ножей  
с утолщенной формирующей головкой**

Толщина, мм		Радиус головки $r_r$ , мм	Высота, мм		Эскиз
ножки $S_0$	головки $K_d$		ножа $H$	ножки $F_h$	
0,70	1,05	0,525	21,0–23,6	18,5	
0,70	1,50	0,750		18,5	
1,05	1,50	0,750		18,5	
1,05	2,00	1,000		18,5	
1,05	3,00	1,500		18,5	

ным образом для малогабаритных коробок из тонкого картона. По конфигурации они представляют собой стандартные биговальные ножи с конусным переходом к полуцилиндрической формирующей поверхности. Как правило, их изготавливают толщиной  $S_0 = 0,7$  мм, высотой  $H = 22,8-23,6$  мм, толщиной формирующей головки  $S_r = 0,5$  и  $0,35$  мм.

В некоторых случаях биговочные канавки чередуются с длинными щелеобразными отверстиями. Такое сочетание биговки и перфорации получают с помощью комбинированных ножей с режущими и биговочными поверхностями. Комбинированные ножи изготавливают из твердой стали 40 НРс толщиной 0,71, 1,05 и 1,50 мм.

Качество биговки в значительной степени зависит от биговальной матрицы с главным формирующим элементом — биговальным каналом. Распространившееся название «биговальная матрица» следует считать достаточно условным, применимым только к процессу биговки канавки определенного профиля и длины. Биговальная матрица является лишь составным элементом матрицы для штанцевания.

Биговальная матрица состоит из двух параллельных пластин 1 (рис. 6.30), закрепленных на основании 2, нижняя по-

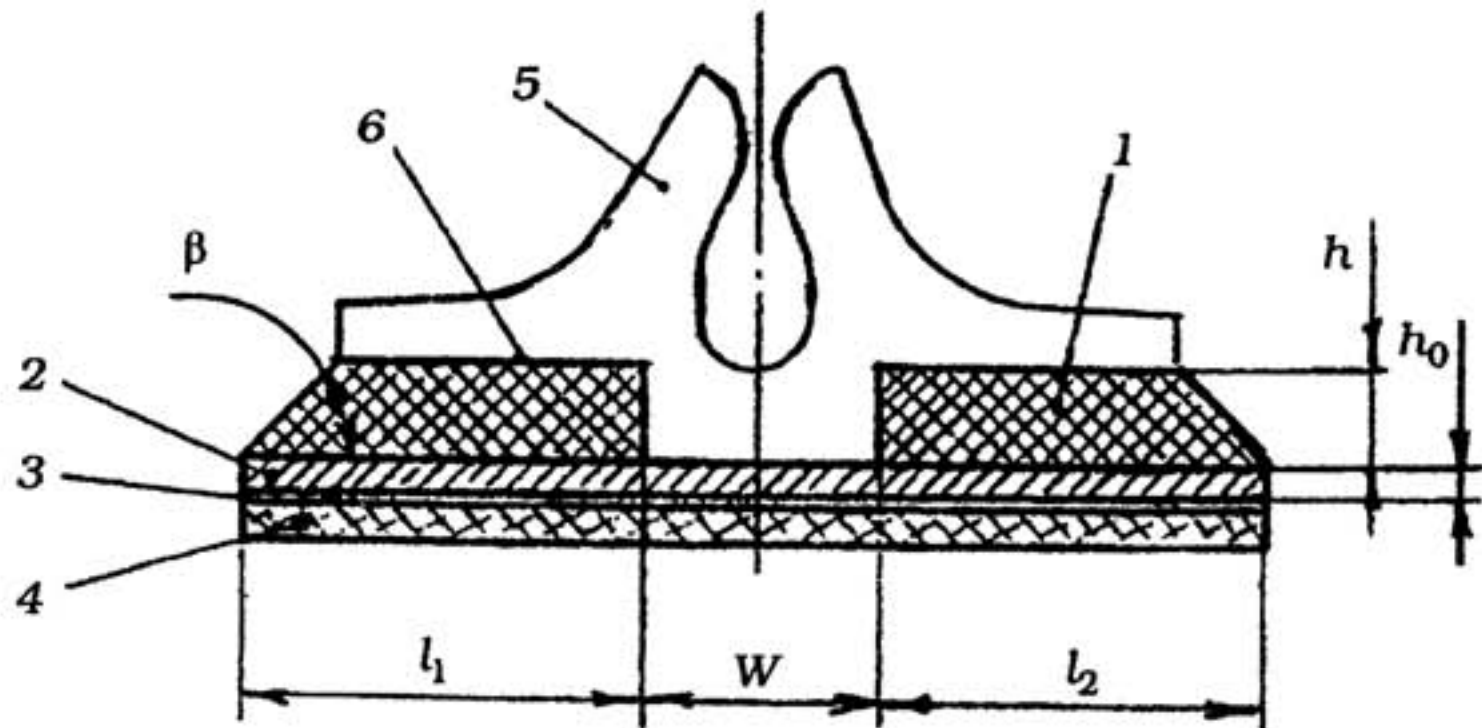


Рис. 6.30. Биговальная матрица с центральным биговальным каналом

верхность которого покрыта тонким слоем липкого высокопрочного клея 3. Обеспечивает сохранность клеевого слоя и стабильность его свойств защитная бумага 4 с антиадгезионным покрытием. В качестве антиадгезионных покрытий наиболее часто используют кремнийорганические полимеры, называемые силиконами. Они предназначены для легкого и удобного удаления защитной бумаги в процессе изготовления штампа. Высокую точность ширины биговального канала  $W$  ( $\pm 0,05$  мм) гарантирует автоматизированная технология соединения биговальных пластин с основанием. Для требуемой точности совмещения осей симметрии биговального канала и биговального ножа разработаны юстировочные направляющие 5, которые крепятся к биговальным пластинам с помощью клеевого слоя 6. Юстировочные направляющие изготавливают из полимерных термопластичных материалов методом экструзии. С целью обеспечения высокой точности размеров сразу после выхода из экструдера их охлаждают в водяной ванне. На одной оси симметрии у юстировочных направляющих — комбинированный прямоугольный выступ шириной  $W$  и высотой  $h$ , вставляемый без зазора в биговальный канал, и паз специального профиля. В этот паз с натягом, предотвращающим смещение и обеспечивающим соосность, входит биговальный нож в процессе изготовления штампа.

По конструктивному исполнению различают три типа биговальных матриц:

- 1) с биговальным каналом по центру (см. рис. 6.30), условное обозначение KF (табл. 6.11, 6.12);
- 2) со смещенным биговальным каналом (рис. 6.31) [OCF] (табл. 6.13);
- 3) с двумя параллельными биговальными каналами (рис. 6.32) [PF] (табл. 6.14);
- 4) с биговальным валиком (рис. 6.33) [GR].

Определяющим фактором при выборе типа биговальной матрицы является расстояние  $x_6$  между центрами соседних биговочных канавок или биговальных ножей (рис. 6.34). При  $x_6 > 10$  мм используются матрицы с биговальным каналом по центру. Для  $x_6 = 5-10$  мм применяются биговальные матрицы со смещенным каналом, для  $3 \text{ мм} \leq x_6 \leq 5 \text{ мм}$  разработаны матрицы с двумя параллельными биговальными каналами. Матрицы с биговальным валиком созданы для биговки двумя биговальными ножами толстого и гофрированного картона. При этом фор-

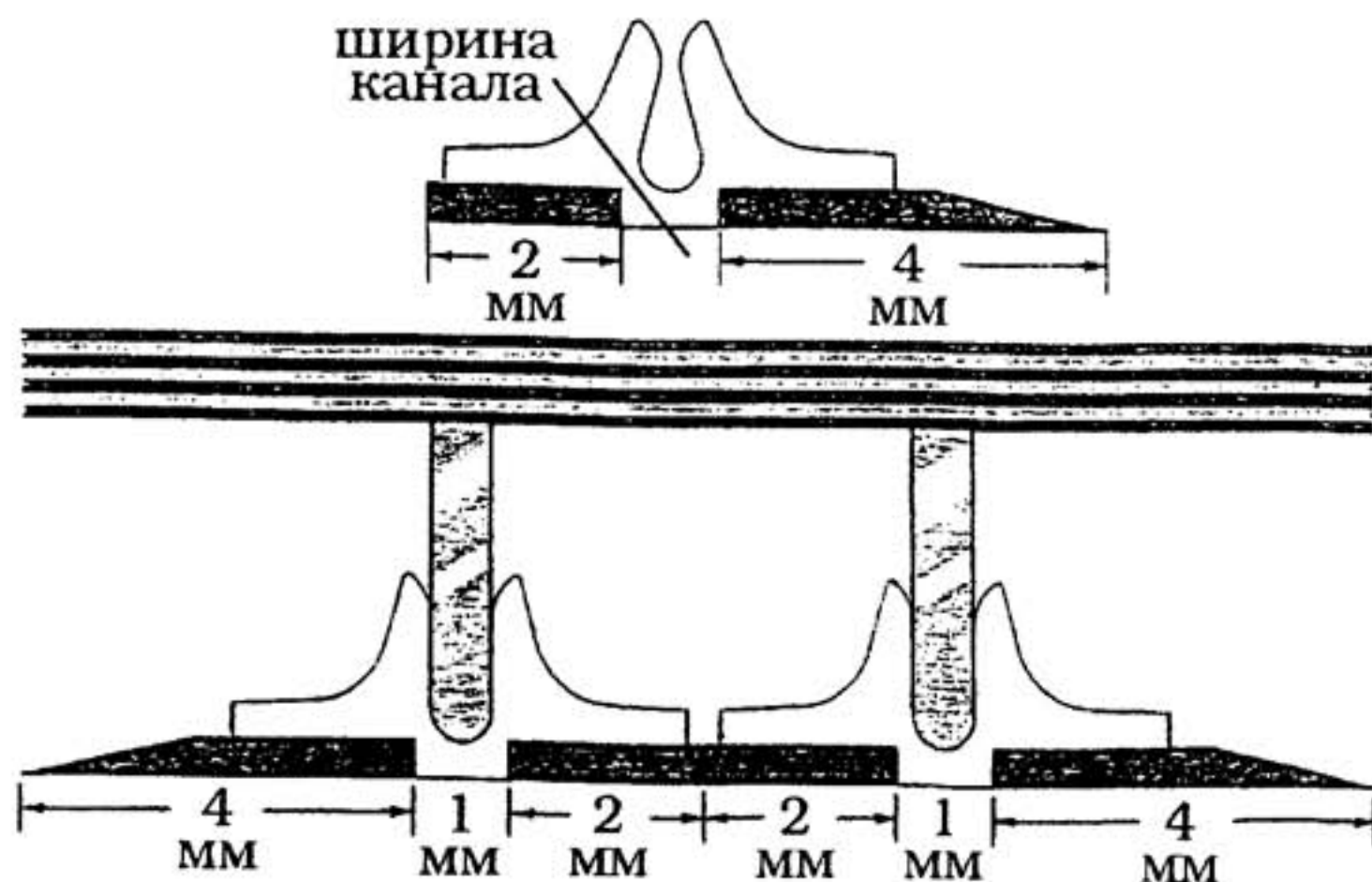


Рис. 6.31. Биговальная матрица со смещенным биговальным каналом

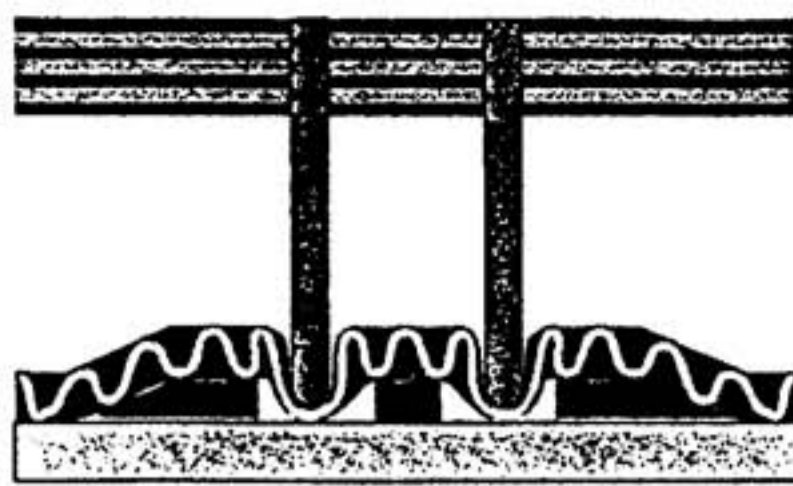


Рис. 6.32. Биговка на матрице с двумя параллельными биговальными каналами

Таблица 6.11

**Основные размеры биговальных матриц с пластмассовыми стандартными пластинами, металлическим основанием, каналом по центру и с юстировочной направляющей**

Толщина картона $S_m$ , мм	Размеры матрицы, мм		Толщина биговального ножа $S_6$		Маркировочный цвет
	толщина пластины $h$	ширина канала $W$	п	мм	
до 0,15	0,38	0,56	1,1 и 1,5	0,40 и 0,50	золотой
до 0,15	0,38	0,80	1,1 и 1,5	0,40 и 0,50	оранжевый
до 0,15	0,38	1,00	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	св.-желтый
0,15–0,25	0,38	1,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	голубой
0,20–0,40	0,43	1,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	белый
0,20–0,40	0,43	1,50	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	св.-зеленый
0,35–0,50	0,48	1,50	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	желтый
0,35–0,50	0,48	1,70	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	фиолетовый
0,45–0,60	0,53	1,70	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	св.-голубой
0,45–0,60	0,53	1,90	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	оливковый
0,50–0,70	0,58	1,90	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	зеленый
0,50–0,70	0,58	2,10	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	розовый
0,65–0,80	0,63	2,10	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	тем.-бордовый
0,75–0,90	0,68	2,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	красный
0,85–1,00	0,79	2,70	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	синий
0,95–1,20	1,00	3,00	3,0 и 4,0	1,05 и 1,42	коричневый
0,95–1,20	1,00	3,00	4,0 и 6,0	1,42 и 2,00	коричневый
1,15–1,40	1,30	3,80	3,0 и 4,0	1,05 и 1,42	серый
1,15–1,40	1,30	3,80	4,0 и 6,0	1,42 и 2,00	серый
1,30–1,60	1,60	5,00	3,0 и 4,0	1,05 и 1,42	черный
1,30–1,60	1,60	5,00	4,0 и 6,0	1,42 и 2,00	черный
1,50–3,00	2,00	6,30	3,0 и 4,0	1,05 и 1,42	кремовый
1,50–3,00	2,00	6,30	4,0; 6,0 и 8,0	1,42 и 2,00	кремовый

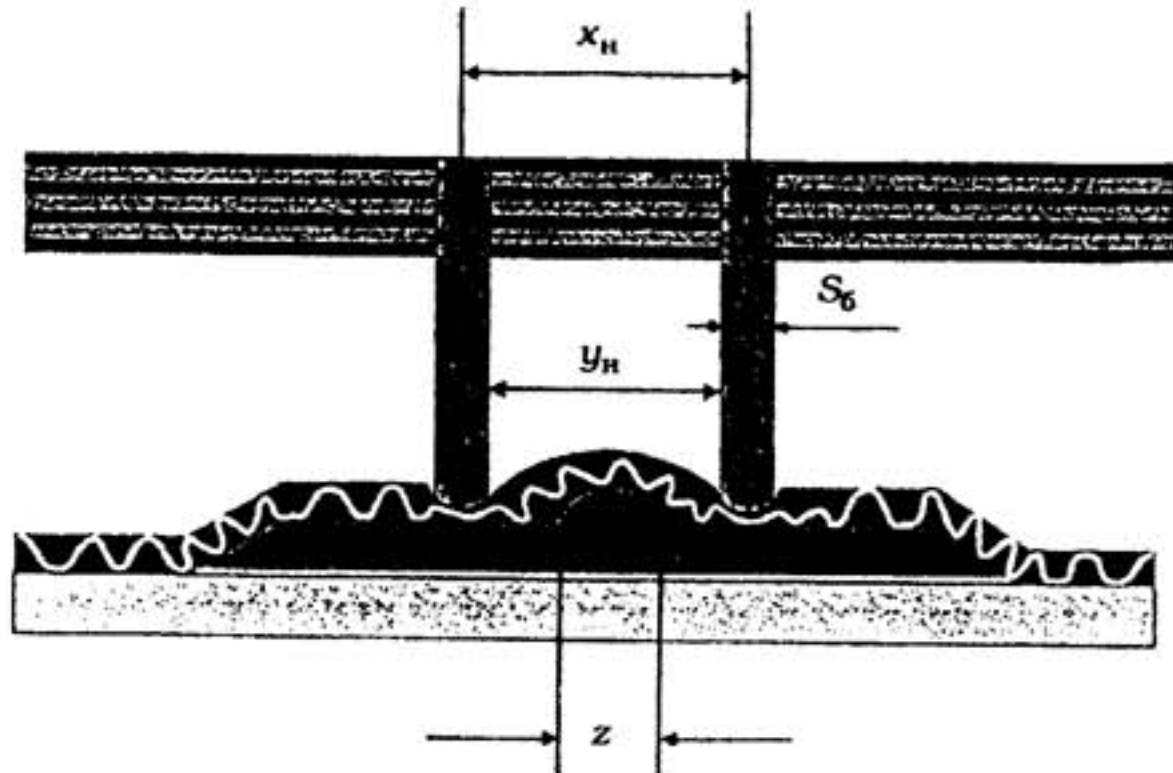


Рис. 6.33. Биговка с помощью матрицы с биговальным валиком

Таблица 6.12

**Основные размеры биговальных матриц с пластмассовыми пластинами увеличенной толщины, металлическим основанием, каналом по центру и с юстировочной направляющей (марка Original фирмы Channel)**

Толщина картона $S_m$ , мм	Размеры матрицы, мм		Толщина биговального ножа $S_6$		Маркировочный цвет
	толщина пластины $h$	ширина канала $W$	$\Pi$	мм	
0,25–0,40	0,55	1,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	черный
0,38–0,55	0,70	1,50	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	коричневый
0,50–0,70	0,80	1,90	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	серый
0,65–0,90	0,90	2,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	оранжевый

мируется биговочная канавка обратного профиля — с радиусом закругления кверху. Наибольшая деформация материала достигается у основания биговочной канавки — в зонах вершин биговальных ножей. Такие биговочные канавки обладают меньшей жесткостью и большей гибкостью по

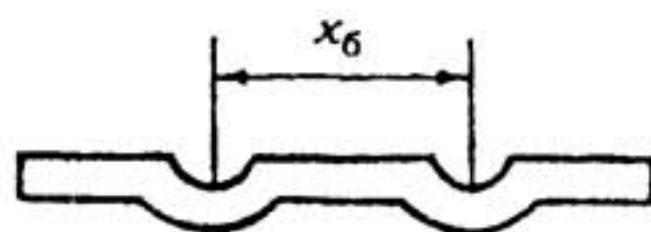


Рис. 6.34. Определение расстояния между центрами соседних биговальных канавок  $x_6$



**Основные размеры биговальных матриц  
с пластмассовыми пластинами, металлическим основанием,  
со смещенным каналом и с юстировочной направляющей**

Толщина картона $S_M$ , мм	Размеры матрицы, мм		Толщина биговального ножа $S_6$		Маркировочный цвет
	толщина пластины $h$	ширина канала $W$	п	мм	
до 0,25	0,38	1,00	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	св.-желтый
0,20-0,40	0,43	1,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	белый
0,35-0,50	0,48	1,50	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	желтый

Таблица 6.14

**Основные размеры биговальных матриц  
с пластмассовыми пластинами с двумя биговальными  
каналами и с металлическим основанием шириной 12 мм**

Толщина картона $S_M$ , мм	Размеры матрицы, мм		Расстояние между центрами каналов, мм	Толщина биговального ножа $S_6$	Маркировочный цвет
	толщина пластины $h$	ширина канала $W$			
до 0,25	0,38	1,00		0,71 и 1,05	св.-желтый
0,20-0,40	0,43	1,30	3,0	0,71 и 1,05	белый
0,20-0,40	0,43	1,30	3,5	0,71 и 1,05	белый
0,20-0,40	0,43	1,30	4,0	0,71 и 1,05	белый
0,20-0,40	0,43	1,30	5,0	0,71 и 1,05	белый
0,35-0,50	0,48	1,50		0,71 и 1,05	желтый

сравнению с традиционными, поэтому их часто используют для изготовления запорных элементов коробок, а также в местах перегибов на  $180^\circ$  (рис. 6.35). В последнем случае применяют биговку и двумя параллельными биговальными ножами с помощью специальной широкой биговальной матрицы (рис. 6.36) или матрицы с двумя параллельными каналами (см. рис. 6.32).

В зависимости от ширины биговального валика  $z$  определяют расстояние между биговальными ножами  $y_H$ :

$$y_H = z + 2S_M + K_3, \quad (6.19)$$

где  $S_M$  — толщина картона или сжатого гофрокартона;  $K_3$  — коэффициент, принимаемый равным 1,0 мм.

При этом расстояние между центрами биговальных ножей составит

$$x_H = y_H + S_6. \quad (6.20)$$

Ширина стандартных биговальных пластин с биговальным каналом по центру матрицы (см. рис. 6.30) составляет  $l_1 = l_2 = 6$  мм.

Выпускается и вариант узких биговальных пластин  $l_1 = l_2 = 3$  мм (фирменное обозначение CITO RS) и широких биговальных пластин  $l_1 = l_2 = 9$  мм (Channel XTC). Угол скоса боковых стенок биговальных пластин  $\beta = 40^\circ$  и  $\beta = 30^\circ$ . Фирма Channel разработала модификацию биговальных пластин Original с закругленным профилем боковых стенок (табл. 6.15). Традиционный материал биговальных пластин — прессованный картон (прессшпан) и прочный термопластичный полимерный материал. Каждая специализированная фирма выпускает широкий ассортимент биговальных матриц с различными значениями толщины биговальных пластин  $h$  и ширины биговального канала  $W$ . Для удобства пользования в производственных условиях биговальные матрицы каждого типоразмера окрашены в индивидуальный цвет.

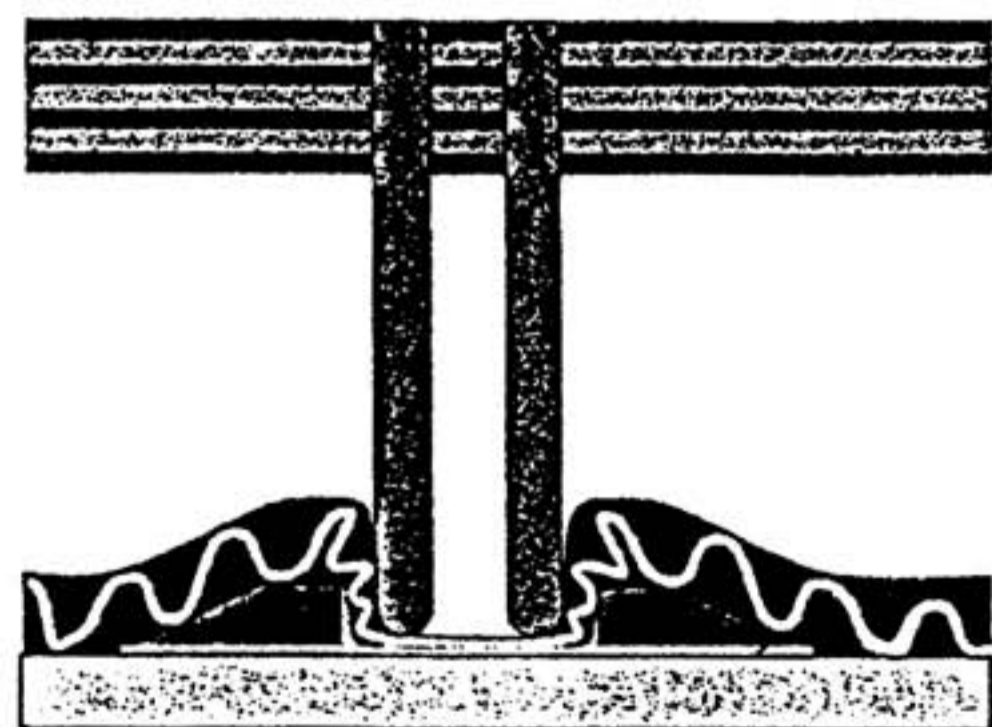


Рис. 6.36. Биговка двумя параллельными биговальными ножами с помощью специальной широкой биговальной матрицы



Рис. 6.35. Жесткий вкладыш в транспортные ящики. Места перегиба гофрокартона на  $180^\circ$  бигуются с помощью матриц с двумя параллельными каналами или с широким каналом

**Основные размеры биговальных матриц  
с пластмассовыми пластинами с закругленным профилем  
боковых стенок, металлическим основанием,  
каналом по центру и с юстировочной направляющей  
(марка Original фирмы Channel)**

Толщина картона $S_m$ , мм	Размеры матрицы, мм		Толщина биговального ножа $S_6$		Маркировочный цвет
	толщина пластины $h$	ширина канала $W$	п	мм	
до 0,25	0,38	1,00	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	св.-желтый
0,20–0,40	0,43	1,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	белый
0,35–0,50	0,48	1,50	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	желтый
0,50–0,70	0,53	1,90	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	зеленый
0,75–0,90	0,68	2,30	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	красный
0,85–1,00	0,79	2,70	2,0 и 3,0	0,71 и 1,05	синий

Традиционный материал основания биговальных матриц — стальная лента толщиной  $(0,2 \pm 0,05)$  мм. Такая толщина металлического основания значительно увеличивает общую толщину биговальных матриц, что негативно сказывается на процессе бигования тонкого картона. Поэтому последние разработки направлены на снижение толщины основания. Все большее применение в качестве основания находят металлическая фольга толщиной 0,036 мм и тонкие полимерные пленки.

#### 6.4.2. Штанцевальные формы

Комбинированную совмещенную операцию «штанцевание» осуществляют на плоских (тигельных) или ротационных высекальных машинах с помощью комбинированного рабочего инструмента — штанцевальных форм. В зависимости от вида высекальной машины различают плоские и цилиндрические штанцевальные формы.

Штанцевальная форма состоит из штампа (пуансона) и ответной части — контрштампа (матрицы)

### 6.4.2.1. Штампы

Типовой штамп состоит из основания 1 (рис. 6.37), в котором закреплен рабочий инструмент 2. В качестве рабочего инструмента используются режущие, ридовочные, перфорационные, биговальные ножи различной длины и конфигурации. Для фиксации картона при выполнении технологических операций и удаления его после штанцевания с рабочих поверхностей инструмента к основанию 1 с помощью клея или двусторонней клеящей ленты 3 крепится пружинящий (эжекторный) материал 4.

Для рабочего инструмента высотой до 12 мм в качестве **основания штампа** используют слоистые прессованные материалы на основе крезоло- или фенолоформальдегидных связующих и бумаги — гетинаксы (пертинаксы), или различных тканей — текстолиты. Основные свойства гетинаксов и текстолитов приведены в табл. 6.16 [18].

Для рабочего инструмента высотой более 12 мм применяют калиброванную, без сучков, ударопрочную фанеру толщиной 15 или 18 мм. Такую фанеру международного класса ВВ/ВВ из лущеного березового, букового, кленового или ольхового шпона, соединенного клеями на основе фенолоформальдегидных смол, выпускают для обработки лобзиком. Для лазерной обработки производят фанеру международного класса S/ВВ, соединен-

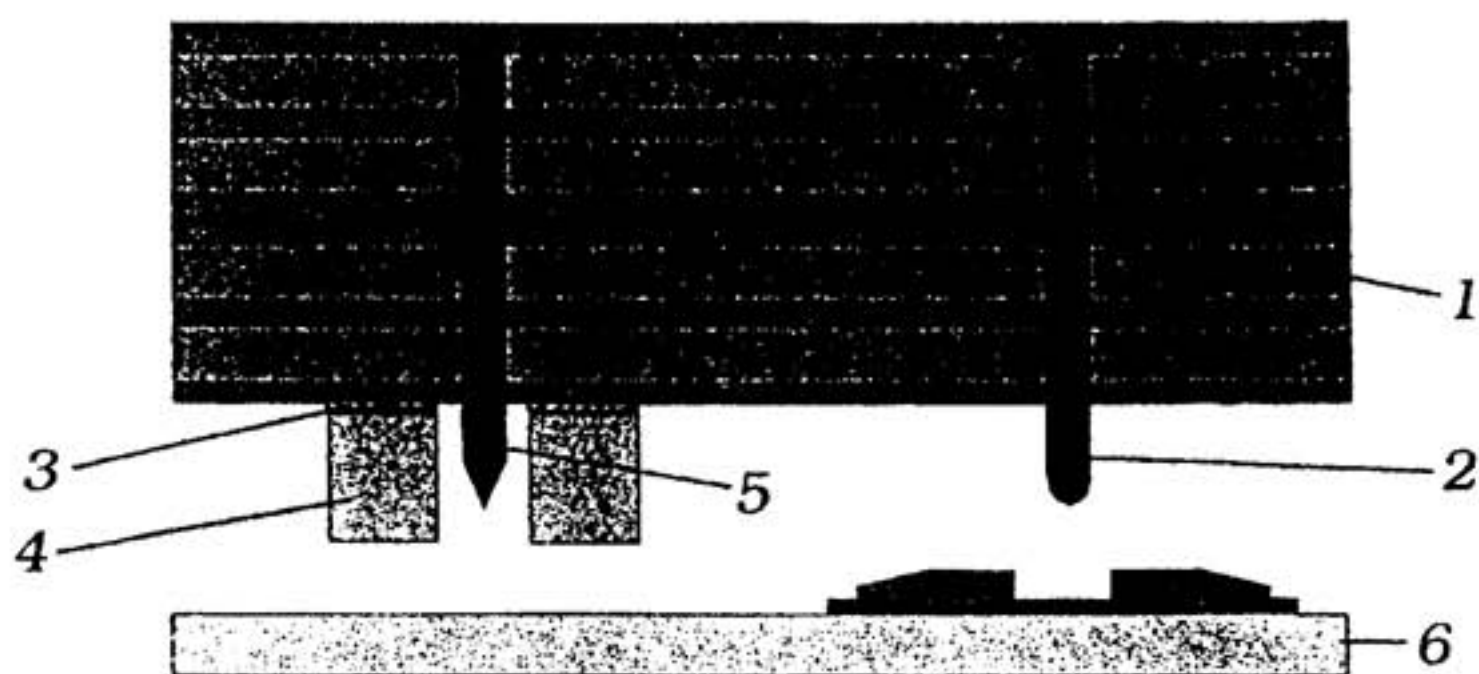


Рис. 6.37. Принципиальная схема типовой штанцевальной формы:

- 1 — основание; 2 — биговальный нож; 3 — клеевой слой или двусторонняя липкая лента; 4 — эжекторный материал;  
5 — нож для высечки; 6 — контрштамп

## Основные свойства гетинаксов и текстолитов

Параметр	Гетинакс электротехнический ТУ 16-503.165-77	Текстолит ПТК-ГР ТУ 6-05-168-77
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1250–1350	1300–1450
Рабочие температуры, °С	от –65 до +120	от –60 до +150
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа: в продольном направлении в поперечном направлении	90 60	50–130
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа: в продольном направлении в поперечном направлении	80 60	150–220
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^9$

ную клеями на основе карбонатных смол. К ротационным машинам выпускают специальные цилиндрические фанерные основания штампов, состоящие из двух скрепленных между собой полуцилиндров (рис. 6.38). Полуцилиндры изготавливают путем наклеивания отдельных слоев лущеного шпона на цилиндрическую форму требуемого диаметра, служащую матрицей. Затем заготовку прессуют между этой матрицей и ответной частью формы — пуансоном. После этого в форме под давлением осуществляют сушку в микроволновой печи.

Важнейшим требованием, предъявляемым к основаниям штанцевальной формы, является сохранение стабильности размеров. Стабильность размеров фанерных оснований штанцевальных форм зависит в первую очередь от влажности фанеры. Для изготовления качественных штанцевальных форм рекомендуется применять фанеру с влажностью не более 5%. Зарубежные заводы-производители выпускают фанеру с влажностью около 11%, влажность отечественной фанеры достигает 50% [46]. Поэтому перед использованием фанеру необходимо сушить. Естественную сушку осуществляют в сухом, хорошо проветриваемом помещении. Фанеру укладывают на выставленную по уровню в горизонтальное положение

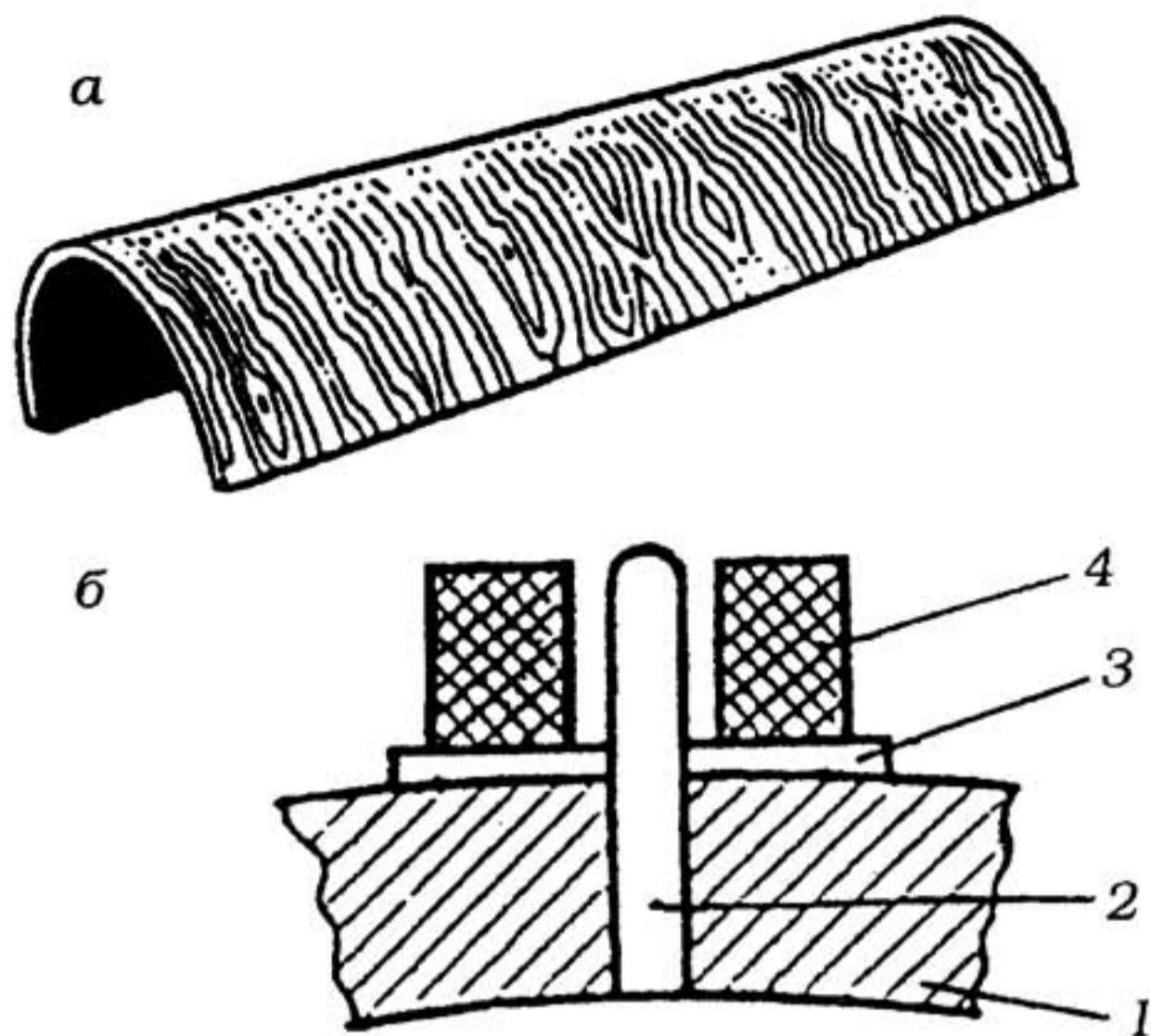


Рис. 6.38. Фанерный полуцилиндр (а) и роторная штанцевальная форма (б): 1 — основание; 2 — биговальный нож; 3 — клеевой слой или двусторонняя липкая лента; 4 — эжекторный материал

ние палету (рис. 6.39). Между листами обязательно устанавливают калиброванные прокладки. Горизонтальность палеты, тщательность подбора и схема размещения прокладок особенно важны, иначе в процессе сушки произойдет коробление фанеры, появится неплоскостность, недопустимая для штанцевальной формы. В оптимальных условиях естественной сушки влажность фанеры уменьшается примерно на 3–5% в месяц. Как правило, естественную сушку проводят не менее трех месяцев.

Крепление рабочего инструмента в основании осуществляют с помощью пазов. В настоящее время пазы в фанере выпиливают лобзиком или выжигают лазером. Выпиленные лобзиком пазы имеют шероховатые и параллельные друг другу стенки, надежно удерживающие рабочий инструмент в течение длительного срока службы. Однако этим способом затруднено изготовление пазов криволинейной конфигурации. Для



*Рис. 6.39. Схема укладки фанеры для естественной сушки:  
1 — фанера; 2 — калиброванные прокладки; 3 — палета*

пропила прямолинейного паза первоначально просверливают отверстие, в которое вставляют ножовочное полотно. Таких отверстий на штанцевальной форме много: даже на прямолинейном участке паза необходимо отверстие у каждой перемычки.

Технология лазерной резки пазов в фанерных основаниях штанцевальных форм, разработанная около 30 лет назад, позволяет изготавливать пазы практически любой конфигурации. Расфокусированный до заданных размеров луч лазера выжигает в фанере паз требуемой ширины. Этот процесс полностью автоматизирован. Изготовление пазов выполняется по программе, передаваемой от компьютера, на котором производилось проектирование разверток коробок.

Лазерный станок для обработки фанерных оснований штанцевальных форм состоит из лазера — источника излучения, координатного стола для плоских форм или вращателя для ротационных форм, системы автоматического управления столом или вращателем и лучом лазера, определяющей траекторию и режим обработки.

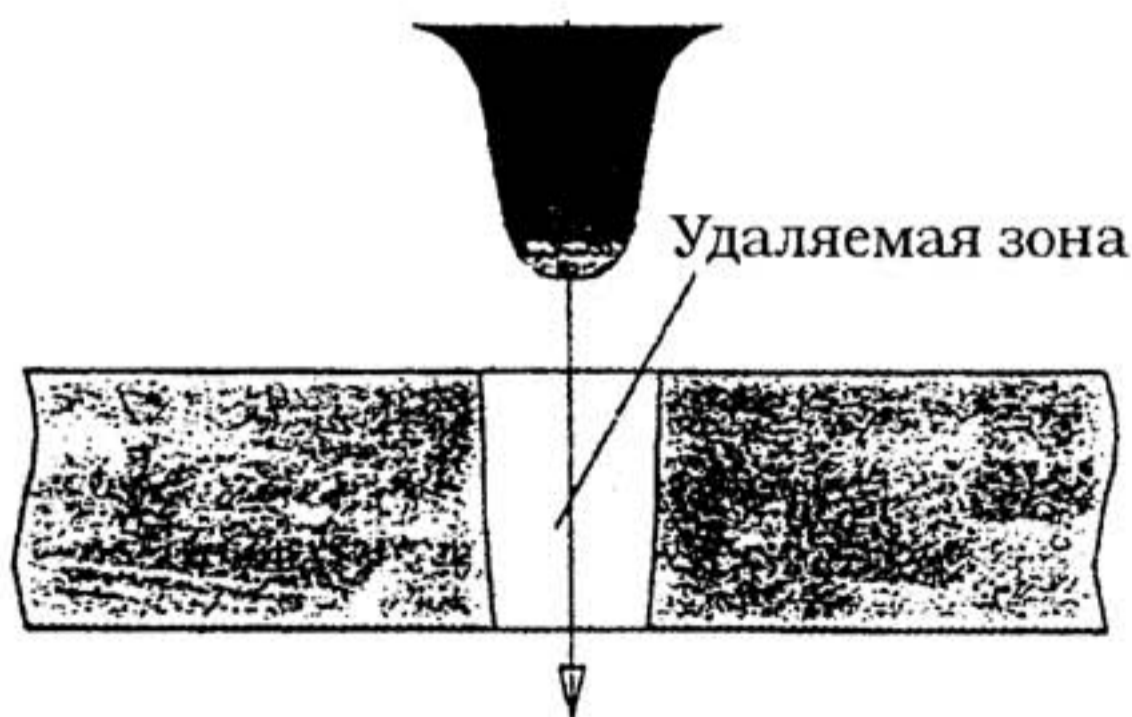
Выбор типа лазерного станка по его технологическим возможностям, производительности и другим показателям осуществляют на основе технико-экономического обоснования с учетом требований всей технологической цепочки производ-

**Основные технологические параметры станков  
для лазерной резки пазов в фанерных основаниях  
толщиной 18 мм штанцевальных форм [19]**

Мощность CO <sub>2</sub> -лазера, Вт	Скорость вырезания паза, м/мин	Диаметр фокусного пятна, мм	Тип лазера
75	0,125	0,2	отпаянный
150	0,250	0,2	отпаянный
300	0,500	0,2	отпаянный
900	1,000	0,3	прокачной

ства упаковки. Основные технологические параметры станков на базе CO<sub>2</sub>-лазеров приведены в табл. 6.17.

К недостаткам лазерной резки следует отнести бочкообразную форму паза по толщине фанеры с расширением со стороны входа лазерного луча (рис. 6.40). На стенках пазов происходят обугливание шпона фанеры, термодеструкция и спекание наплывов от клеевых швов. Отмеченные недостатки снижают прочность крепления штанцевального инструмента в фанерных основаниях. Для повышения прочности крепления увеличивают натяг между штанцевальным инструментом и пазами, в которые он вставляется. Однако при превышении критического значения натяга возможна недопустимая деформация основания.



*Рис. 6.40. Схема паза в фанерном основании при лазерной резке расфокусированным лазерным лучом*



Устраняет отмеченные недостатки новый способ прорезания пазов в фанерных основаниях штанцевальных форм оптимально сфокусированным лазерным лучом [19]. Таким лучом выполняют по периметру паза очень тонкий замкнутый прорез, в результате чего удаляемая зона из паза выпадает (рис. 6.41). Полученный паз имеет практически параллельные стенки с минимальным обугливанием. За одну настройку лазерного луча на одном фанерном основании можно прорезать пазы для ножей с разной толщиной, например для 2- и 6-пунктовых. Время прорезания пазов по такой технологии не зависит от толщины пазов. Скорость изготовления пазов сфокусированным лазерным лучом выше скорости изготовления пазов расфокусированным лазерным лучом, несмотря на вдвое большую длину траектории движения луча в первом случае.

Обычно при лазерной резке начальный участок паза получается несколько уже, поскольку скорость перемещения лазерного луча еще не установилась постоянной. В новом поколении лазерных станков этот недостаток устранен за счет системы синхронизации скорости перемещения с фокусировкой и мощностью лазерного луча. Эта система учитывает и особенности фанерного основания.

В некоторых технически и экономически обоснованных случаях в качестве оснований штанцевальных форм исполь-

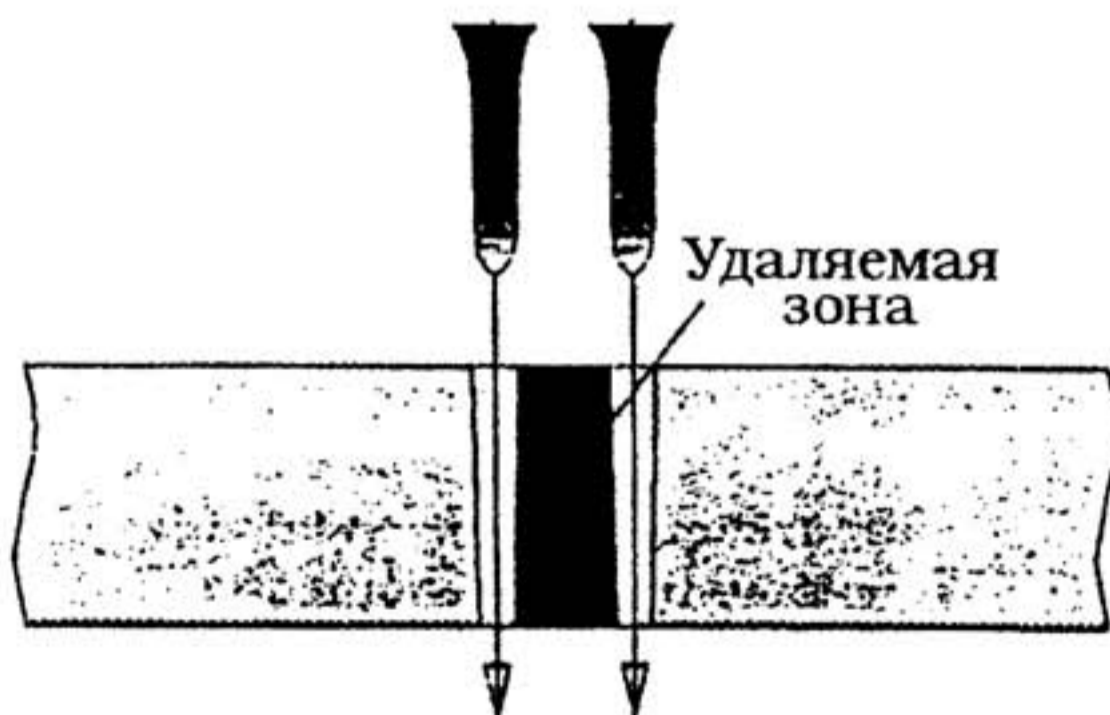


Рис. 6.41. Схема паза в фанерном основании при лазерной резке сфокусированным лазерным лучом

зуют легкоплавкие металлы. Наиболее часто встречаются алюминиевые основания. Металлические основания применяют в случаях работы штанцевальных форм с нагревом, например для штанцевания многослойных материалов, содержащих слои полимерных пленок. Металлические основания эффективны и для штанцевания стопы из многослойных листов бумаги.

В связи с тем, что в процессе штанцевания совмещено несколько технологических операций, выполняемых одновременно за один рабочий ход штампа, размеры всех рабочих инструментов и других элементов штампа взаимосвязаны.

Если принять за основу высоту режущих ножей  $H_p$ , то высота биговальных ножей  $H_b$  должна быть уменьшена на толщину обрабатываемого материала  $S_M$ :

$$H_p = H_b + S_M \quad \text{или} \quad H_b = H_p - S_M. \quad (6.21)$$

Так, если высота режущего ножа составляет  $H_p = 23,8$  мм, то при толщине картона  $S_M = 0,4$  мм высота биговального ножа должна составлять  $H_b = 23,4$  мм, при  $S_M = 0,7$  мм  $H_b = 23,1$  мм, а при  $S_M = 1,0$  мм  $H_b = 22,8$  мм (рис. 6.42).

Толщину гофрокартона  $S_M$  определяют при его полном сжатии.

Соотношения (6.21) обычно применяют для биговальных матриц с тонким основанием из металлической фольги или полимерных пленок. При использовании биговальных матриц

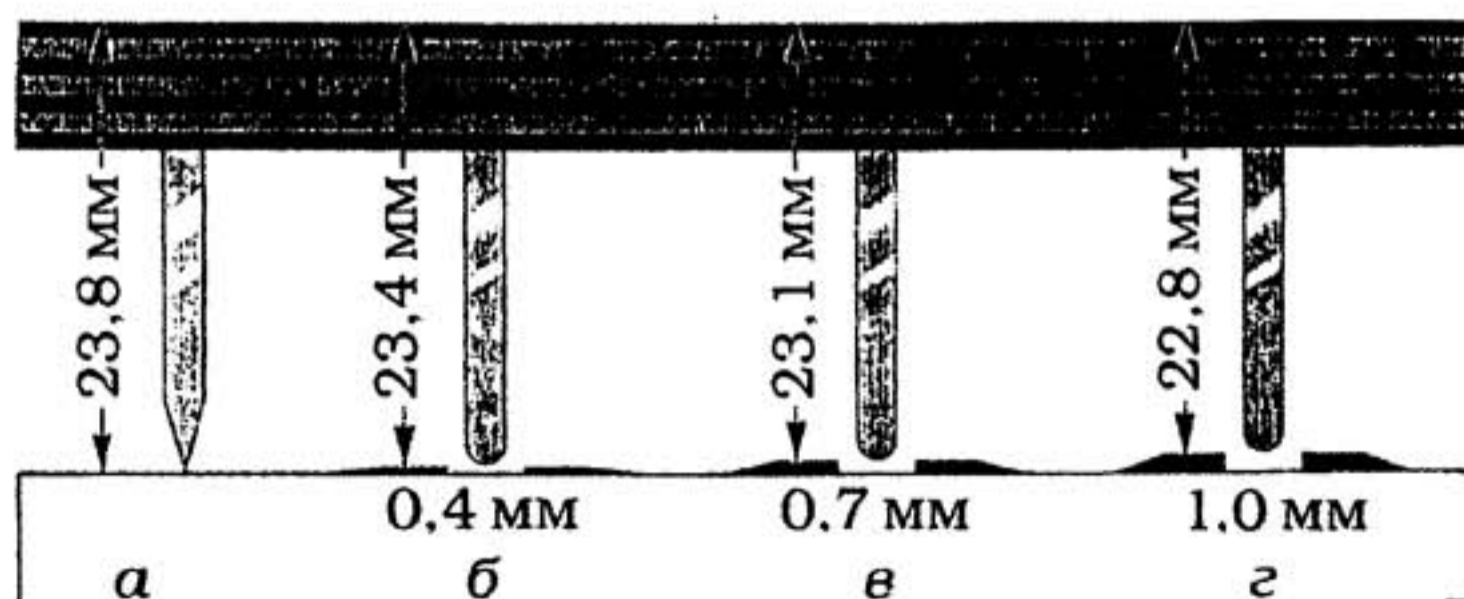


Рис. 6.42. Зависимость высоты биговальных ножей от высоты режущих ножей (а) и толщины картона — 0,4 мм (б); 0,7 мм (в) и 1,0 мм (г)

с основанием из более толстой стальной ленты необходимо учитывать толщину основания  $h_0$ :

$$H_p = H_6 + S_M + h_0 \quad \text{или} \quad H_6 = H_p - S_M - h_0. \quad (6.22)$$

Наиболее часто встречаемые на практике соотношения толщины обрабатываемого (штанцуемого) материала с высотами и толщинами режущих и биговальных ножей приведены в табл. 6.18.

При этом толщина биговальных ножей  $S_6$  выбирается не меньше толщины обрабатываемого материала:

$$S_6 \geq S_M. \quad (6.23)$$

Высоту рифовочных ножей  $H_{\text{риц}}$  можно определить из соотношения

$$H_{\text{риц}} = H_p - S_M + h_{\text{риц}}, \quad (6.24)$$

где  $h_{\text{риц}}$  — глубина рифовки.

Важную роль в конструкции и функционировании штанцевальной формы играет **пружинящий (эжекторный) материал**. С его помощью осуществляют фиксацию картона и устранение его вибрации после подачи в рабочую зону штанце-

Таблица 6.18

**Соотношения толщины штанцуемого материала и основных размеров режущих и биговальных ножей**

Штанцуемый материал		Режущие ножи, мм		Биговальные ножи, мм	
вид	толщина, мм	высота	толщина	высота	толщина
Этикетки	—	8–12	0,4	—	—
Бумага	до 0,2	23,8	0,5	23,6	0,35
Тонкий картон	0,3	23,8	0,71	23,4	0,5
Складные коробки	0,5–0,7	23,8	0,71	23,1–23,3	0,71
Картон	0,7–1,0	23,8	1,05	22,8–23,1	1,05
Серый картон	1,0–1,4	23,8	1,05	22,5–22,8	1,05
Микрогофрокартон	0,6–0,8	23,8	1,05	23,0–23,2	1,05
Гофрокартон типа В (с)	0,8–1,0	23,8	1,05	22,8–23,0	1,05
5-слойный гофрокартон В/с (с)	1,0–1,6	23,8	1,42	22,2–22,8	1,42

вальной формы. Его *пружинящие свойства* обеспечивают качественное выполнение всех операций процесса штанцевания за счет нейтрализации растягивающих усилий и деформаций картона между инструментами для высечки, биговки, перфорации, надрезки, рицовки, тиснения при прямом ходе штанцевальной формы. Его *эжекторные свойства* позволяют удалять картон и гофрокартон с режущих и формующих кромок штанцевального инструмента при обратном ходе штанцевальной формы. К вспомогательным функциям пружинящего материала можно отнести защиту ножей от образования заусенцев и использование для балансировки штанцевальной формы по давлению.

Пружинящий (эжекторный) материал приклеивается к основанию штампа вдоль рабочего инструмента. В качестве пружинящего материала наибольшее применение нашли различные сорта резины и полиуретанов. Резина используется как сплошная монолитная, так и газонаполненная с открытыми и закрытыми ячейками. Полиуретаны применяются вспененные с закрытыми микроячейками [54].

Газонаполненные полимеры характеризуются ярко выраженной физической агрегатной неоднородностью из-за наличия в полимерной матрице более или менее равномерно диспергированных газовых включений. В материалах с закрытыми ячейками, называемых пенопластами, газовые включения изолированы друг от друга полимерными стенками. В материалах с открытыми ячейками, называемых поропластами, распределение газовой среды не дискретно и ячейки взаимосвязаны друг с другом. На практике подобное разграничение весьма условно, поскольку получение ячеек определенной геометрической формы и размеров затруднено.

Соотношение газовой и твердой фаз в газонаполненных полимерах характеризуется показателем кажущейся плотности. На основе этого показателя газонаполненные материалы подразделяют на легкие, кажущаяся плотность которых составляет менее половины начальной плотности исходного полимера (как правило, не выше  $500 \text{ кг/м}^3$ ), облегченные (подвспененные) и интегральные (структурные). К последней группе относят пенопласты с четко выраженным градиентом плотности

при переходе от середины к поверхности образца, изготовленного за одну технологическую операцию. При этом возможно получение материалов, сочетающих свойства монолитного пластика у наружного слоя и типичных легких пенопластов в середине.

По степени жесткости газонаполненные пластмассы подразделяют на эластичные (мягкие), полужесткие и жесткие. Мягкие пенопласты имеют напряжение сжатия при 50%-ной деформации менее 0,1 МПа, жесткие — более 0,15 МПа, полужесткие занимают промежуточное положение [35].

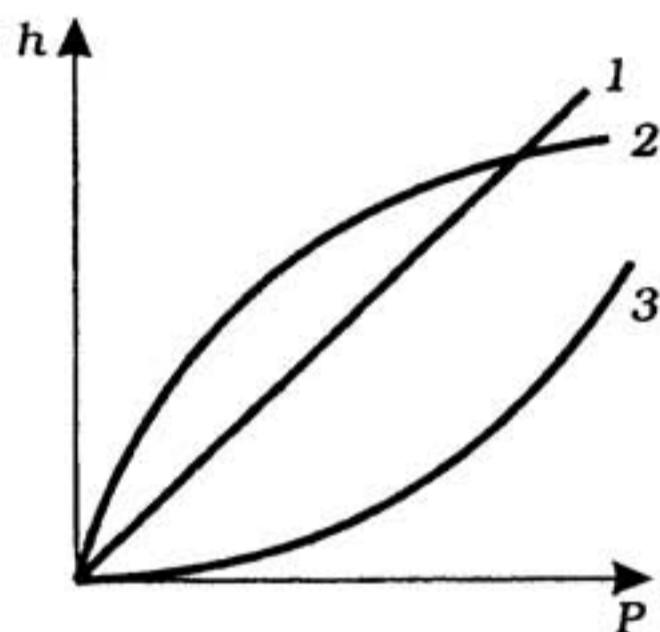


Рис. 6.43. Характеристики упругого элемента:  
1 — линейная; 2 — затухающая; 3 — возрастающая

Степень жесткости пружинящего материала определяет его упругую характеристику. Упругой характеристикой называется зависимость между перемещением  $h$  определенной точки упругого элемента и приложенной к нему нагрузкой  $P$ . Характеристика упругого элемента может быть представлена в виде уравнения, в табличной или графической форме. В зависимости от конструкции и свойств упругого элемента его характеристика может быть линейной и нелинейной: возрастающей или затухающей (рис. 6.43).

В реальных условиях пружинящие материалы и конструкции отличаются несовершенством упругих свойств. Точные измерения показывают, что даже при напряжениях, меньших предела упругости, материалы не имеют той строго линейной и однозначной зависимости между напряжениями и деформациями, которая выражается законом Гука. Кривые нагружения и разгрузки материала в пределах упругих деформаций в действительности не совпадают, образуя так называемую «петлю гистерезиса» (рис. 6.44, а). Ширина петли гистерезиса очень мала и может быть обнаружена только при весьма тщательных измерениях.

Явление гистерезиса сложно, и природа его в настоящее время еще недостаточно изучена. Известно, что с увеличением напряжений петля гистерезиса увеличивается, а с увеличени-

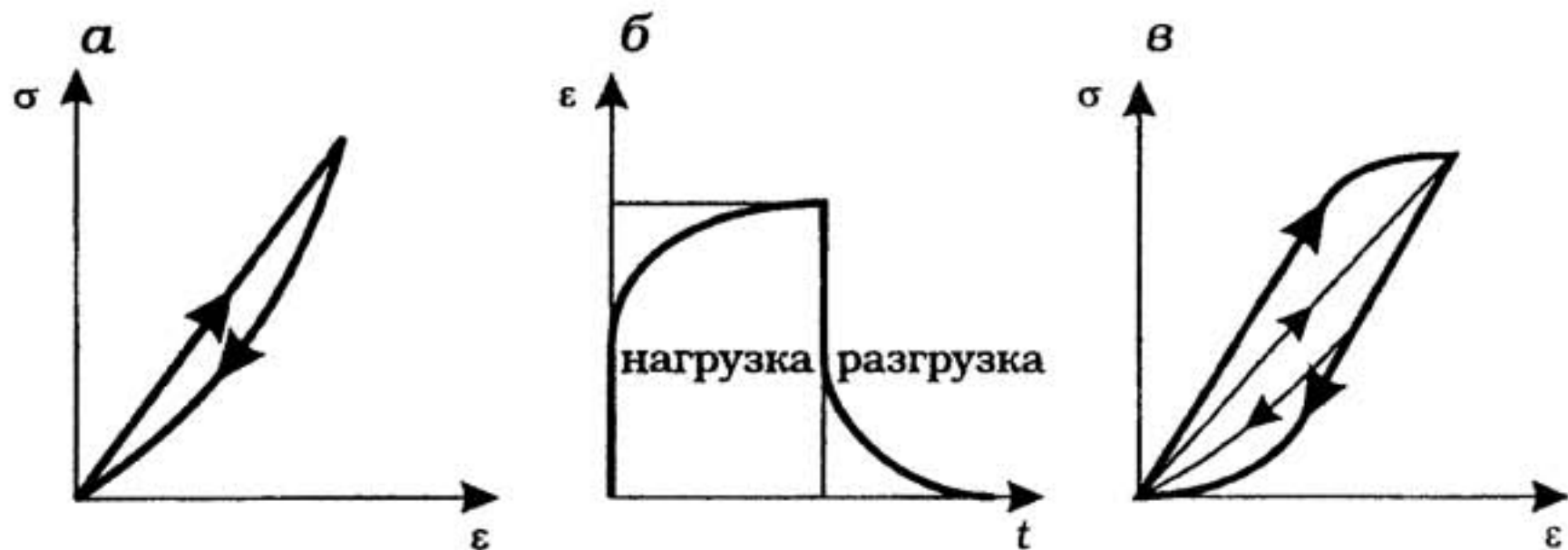


Рис. 6.44. несовершенства упругих свойств материала:  
 а — петля гистерезиса; б — изменение деформаций во времени;  
 в — гистерезис и упругое последствие

ем предела упругости, т. е. с ростом сопротивления малым пластическим деформациям [1], — уменьшается.

Отклонение от законов совершенной упругости материала выражается также в том, что при постоянной нагрузке возможно изменение деформаций во времени [48, Т. 1]. При нагружении основная часть деформаций происходит практически мгновенно, а затем деформации продолжают нарастать по резко затухающему во времени закону (рис. 6.44, б). При снятии нагрузки деформации исчезают также с некоторым запаздыванием во времени. Изменение деформаций во времени при постоянной нагрузке называется последствием. Являясь причиной отставания по фазе деформаций от напряжений при нагружении и при разгрузке пружинящего материала, последствие, складываясь с гистерезисом, увеличивает разницу в характеристике прямого и обратного ходов (рис. 6.44, в).

Важным свойством пружинящего материала является его жесткость  $k$ :

$$k = \frac{dP}{dh}, \quad (6.25)$$

Если характеристика упругого элемента линейна, то жесткость представляет собой отношение нагрузки  $P$  к соответствующему перемещению  $h$ :

$$k = \frac{P}{h}. \quad (6.26)$$

Жесткость показывает, какую нагрузку следует приложить к пружинящему материалу, чтобы вызвать перемещение, равное единице.

В конструкции штанцевального штампа несколько пружинящих элементов соединены с основанием параллельно и начинают работать с небольшой разницей во времени, определяемой их различной высотой (рис. 6.45).

Общая нагрузка  $P$  будет равна сумме усилий, воспринимаемых каждым из пружинящих элементов [23]:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (6.27)$$

При прямом ходе штампа усилие сжатия возникает в момент касания с листом картона самого высокого пружинящего элемента высотой  $h_0 = h_2$ . При дальнейшем движении штампа усилие сжатия возрастает по мере увеличения деформации сжатия  $\epsilon_{сж}$  и деформации остальных пружинящих элементов. Максимального значения усилие сжатия достигает в конце прямого хода штампа, когда все пружинящие элементы сжаты до высоты  $h_{сж}$ . При этом усилия сжатия пружинящих элементов будут различными. Для каждого элемента усилие сжатия определяется его жесткостью, величиной деформации сжатия  $\epsilon_{сж}$  и площадью горизонтального сечения  $S_{сеч}$ .

Деформация сжатия  $i$ -го пружинящего элемента определяется значениями его исходной высоты  $h_i$  и высоты сжатия  $h_{сж}$ :

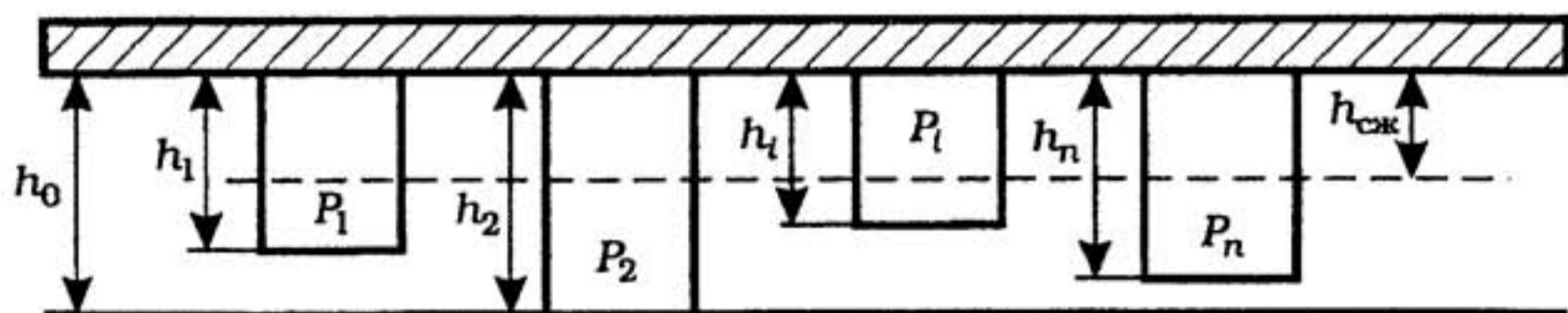


Рис. 6.45. Пружинящие элементы в конструкции штанцевального штампа

$$\varepsilon_{i \text{ сж}} = \frac{h_i - h_{\text{сж}}}{h_i} \cdot 100\%. \quad (6.28)$$

По значению  $\varepsilon_{i \text{ сж}}$  из графика типа представленного на рис. 6.44, в определяют напряжение сжатия  $\sigma_{i \text{ сж}}$  для данного типа материала, а затем вычисляют усилие сжатия пружинящего элемента:

$$P_i = \sigma_{i \text{ сж}} S_{\text{сеч}} = \sigma_{i \text{ сж}} L B, \quad (6.29)$$

где  $L$  и  $B$  — соответственно длина и ширина пружинящего элемента.

Специфика деформационных свойств резины заключается в том, что соотношение  $\sigma/\varepsilon$  является функцией режима нагружения, а также и функцией абсолютных значений  $\sigma$  или  $\varepsilon$ . Нелинейность свойств проявляется тем сильнее, чем больше  $\sigma$  или  $\varepsilon$ .

Классическая статистическая теория высокоэластичности устанавливает для резин соотношение между напряжением, рассчитанным на начальное сечение, и кратностью растяжения  $\lambda$  в виде [2]

$$\sigma = G \left( \lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right), \quad (6.30)$$

где  $G$  — модуль сдвига,  $E = 3 G$ ,

$$\lambda = \frac{l}{l_0} = \varepsilon + 1, \quad (6.31)$$

где  $l$  — длина растянутого образца;  $l_0$  — длина исходного образца.

При работе в штанцевальном штампе резина подвергается высокоскоростным гармоническим нагружениям сжатия с асимметричным циклом нагружения, когда наибольшие и наименьшие напряжения и деформации неодинаковы по числовому значению. Асимметричный цикл нагружения характеризуют средними значениями деформации  $\bar{\varepsilon}_{\text{сж}}$  и напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{сж}}$ , определяемыми алгебраической полусуммой наибольшего и наименьшего значений. В зависимости от типа



штанцевальной машины скорость нагружений может достигать 6000–14000 ч<sup>-1</sup>.

В условиях многократных циклических нагружений в резинах протекают процессы саморазогрева и усталости (утомления). Эти процессы обусловлены высоким внутренним трением резин, приводящим к переходу механической энергии деформации в теплоту. Теплообразование определяется упругоэластичными свойствами резин и зависит от режима нагружения.

Динамический модуль упругости  $E^*$  (отношение амплитуды напряжения  $\sigma_0$  к амплитуде деформации  $\varepsilon_0$  [25]) определяется по формуле

$$|E^*| = E = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}, \quad (6.32)$$

где  $E'$  и  $E''$  — соответственно действительная и мнимая составляющие  $E^*$ .

Мнимая составляющая  $E''$  определяет модуль внутреннего трения  $K$ , представляющего собой удвоенное значение удельных механических потерь за цикл деформации  $q$  при значении амплитуды деформации  $\varepsilon_0$ , равном единице:

$$K = \frac{2q}{\varepsilon_0^2} = 2\pi E''. \quad (6.33)$$

При вынужденных гармонических колебаниях в отсутствие резонанса из-за механических потерь происходит во времени сдвиг фаз между амплитудами напряжения  $\sigma_0$  и деформации  $\varepsilon_0$ . Сдвиг фаз характеризуется углом механических или гистерезисных потерь  $\varphi$ :

$$\sin \varphi = \frac{K}{2\pi E} = \frac{q}{\varepsilon_0^2 \pi E}. \quad (6.34)$$

Механические потери за цикл деформации составляют

$$q = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \varphi. \quad (6.35)$$

Они определяются площадью петли динамического гистерезиса (рис. 6.46) и поэтому называются гистерезисными потерями.

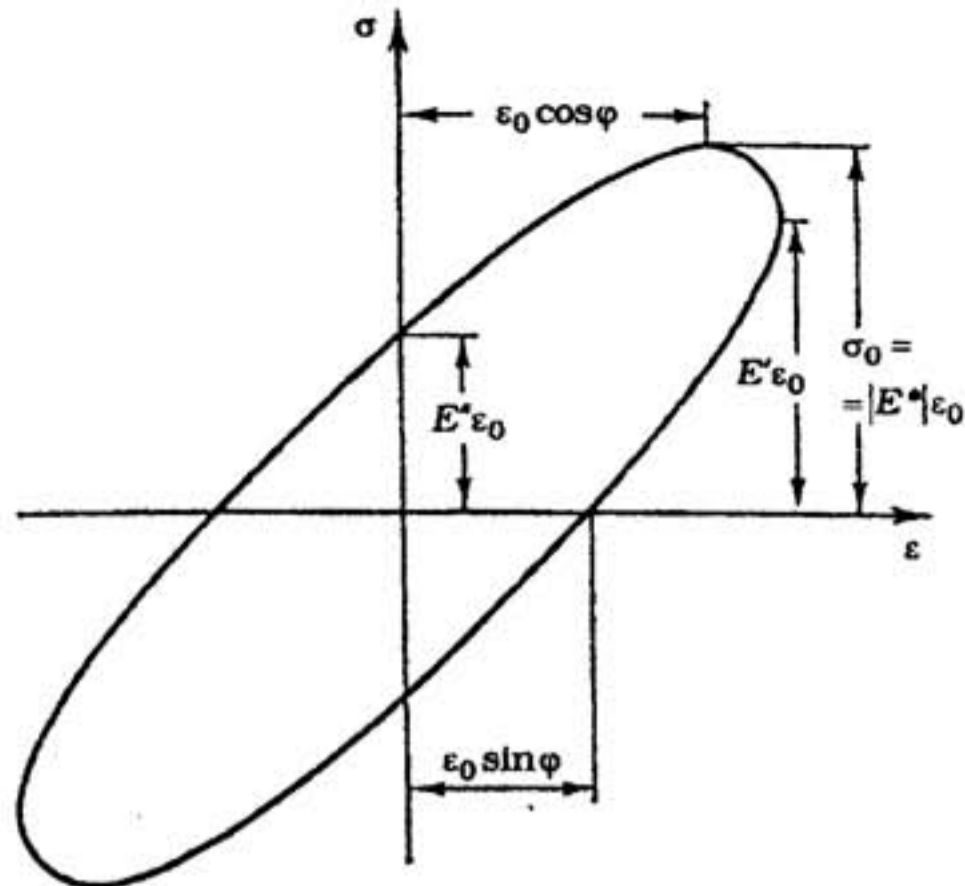


Рис. 6.46. Петля динамического гистерезиса между напряжением  $\sigma$  и деформацией  $\varepsilon$  при вынужденных гармонических нагружениях резин

Относительным гистерезисом  $\Gamma$  называют отношение механических потерь к условной энергии цикла:

$$\Gamma = \frac{2q}{E\varepsilon_0^2} = \frac{K}{E}. \quad (6.36)$$

Динамические упругогистерезисные свойства ( $E$ ,  $K$  и их производные  $q$ ,  $\varphi$  и  $\Gamma$ ) в условиях вынужденных нерезонансных колебаний определяют по ГОСТ 10828–64 на ротаторах при гармоническом симметричном знакопеременном изгибе, а также по ГОСТ 10953–64 при импульсном нагружении в режиме качения кольцевых образцов, характерном для шинных резин. В Германии и США испытания по стандартам DIN 53312 и ASTM D 2231–63Т проводят на вибраторах различных конструкций.

Саморазогрев количественно характеризуют приростом температуры:

$$\Delta T = T - T_0, \quad (6.37)$$

где  $T$  и  $T_0$  — температуры образца и окружающей среды соответственно.

Значение  $\Delta T$  определяется конкуренцией тепловыделения в материале  $Q^+(T)$  и теплоотдачи в окружающую среду  $Q^-(T)$ . Изменение температуры образца во времени определяют из уравнения теплового баланса

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c\rho} [Q^+(T) - Q^-(T)], \quad (6.38)$$

где  $c$  — теплоемкость материала;  $\rho$  — плотность материала.

В случае, когда напряжение  $\sigma$  изменяется по гармоническому закону с частотой  $\omega$ ,  $Q^+(T)$  можно определить из уравнения

$$Q^+(T) = \pi\omega\sigma_0^2 \left[ \frac{\sin\sigma}{\bar{E}'}(T) \right]. \quad (6.39)$$

На практике саморазогрев обычно исследуют экспериментально, сопоставляя взаимное расположение кривых  $Q^+(T)$  и  $Q^-(T)$  при заданных режимах нагружения и теплоотвода.

Как правило, для резин, эксплуатирующихся в высокоэластическом состоянии, саморазогрев имеет стационарный режим (рис. 6.47). При стационарном режиме прирост температуры  $\Delta T$  при некоторой сравнительно низкой температуре  $T_p$

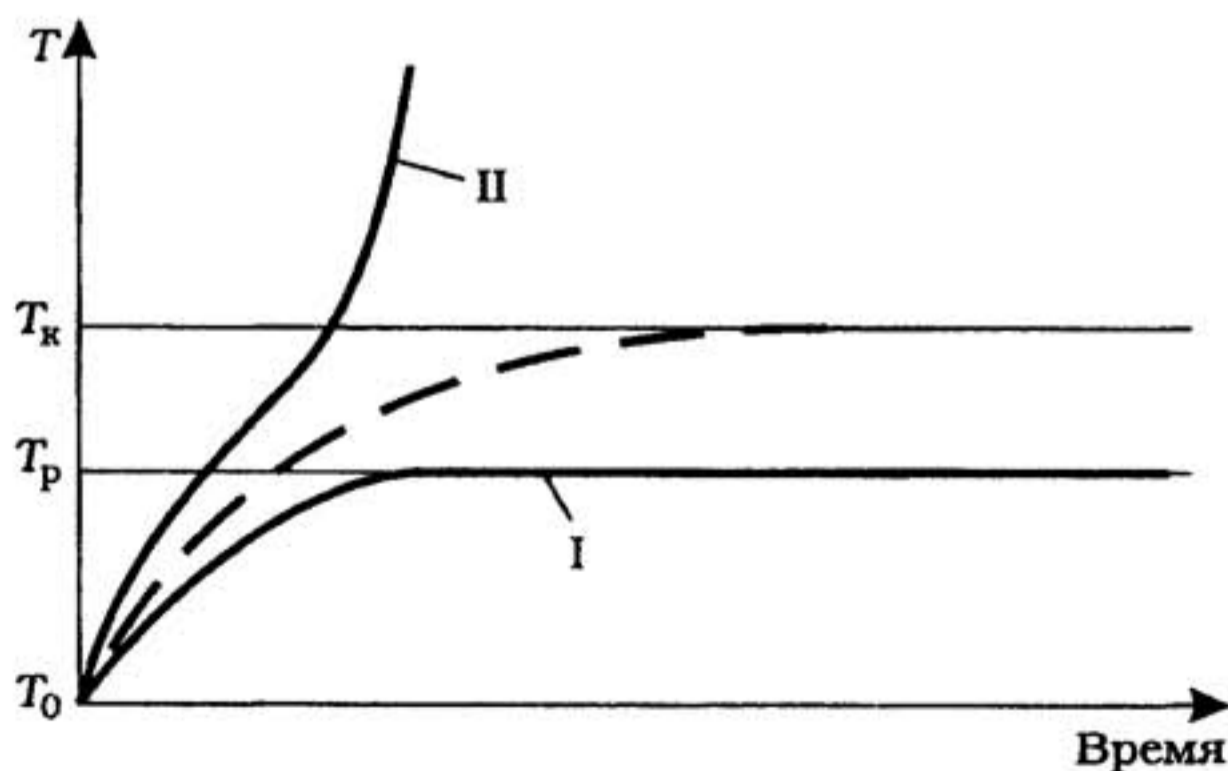


Рис. 6.47. Стационарный (I) и нестационарный (II) режимы саморазогрева:  $T_0$  — температура внешней среды;  $T_p$  — стационарного саморазогрева;  $T_k$  — критическая температура

прекращается, поскольку скорости тепловыделения и теплоотвода становятся равными. Это обусловлено уменьшением тепловыделения, потому что с ростом температуры механические потери уменьшаются. Поэтому для резин обычно саморазогрев не приводит к критической ситуации, но вызывает изменение упругих характеристик.

Многократные циклические нагружения полимерных материалов приводят к появлению усталости или утомления, выражающемуся в изменении их исходных свойств. Усталость приводит к падению жесткости, прочности, износостойкости и снижению срока службы изделий.

Усталость характеризуется выносливостью — числом циклов нагружения  $N$  до разрушения при заданном напряжении  $\sigma$ .

Напряжение  $\sigma_N$ , при котором происходит разрушение материала после заданного числа циклов нагружений, называется усталостной прочностью.

Зависимость между  $N$  и  $\sigma_N$  в режиме нагружений  $\sigma = \text{const}$  или между  $N$  и  $\epsilon_N$  в режиме  $\epsilon = \text{const}$  обычно выражают графически в виде кривых усталости. Наиболее часто для резин аналитическое выражение этих зависимостей имеет вид [48]

$$\sigma_N = \sigma_1 N^{\frac{-1}{\beta}}, \quad (6.40)$$

где  $\sigma_1$  — разрушающее напряжение при однократном нагружении (исходная прочность);  $\beta$  — эмпирический показатель выносливости.

Показатель выносливости  $\beta$  обычно достаточно стабилен в широком диапазоне изменения числа циклов нагружения  $N$ . Для резин он находится в диапазоне  $\beta = 2-10$ . Зависимость (6.40) преобразуется в линейную в координатах  $\lg \sigma_N - \lg N$ . Она справедлива и для режима нагружения при  $\epsilon = \text{const}$ .

Количественной характеристикой сопротивления усталости может служить и коэффициент усталостной прочности  $k_N$ :

$$k_N = \frac{\sigma_N}{\sigma_1} \quad \text{или} \quad k_N = \frac{\epsilon_N}{\epsilon_1}. \quad (6.41)$$

Практически любая нагрузка или деформация может привести к усталостному разрушению материала при достаточно большом значении  $N$ , поэтому  $k_N$  может принимать значения от 0 до 1.

Усталостную выносливость резин при многократном сжатии определяют по ГОСТ 266–67. Обычно при этом измеряют температуру саморазогрева образцов.

Испытание резин на сжатие в статических условиях проводят на пластометре с плоскопараллельными плитами при заданной сжимающей нагрузке  $P$  по ГОСТ 415–43. Испытаниям подвергаются образцы цилиндрической формы диаметром 16 мм и высотой  $h_0 = 10$  мм. Регламентированы и условия проведения испытаний: нагрузка  $P = 49$  Н (5 кгс), температура  $70^\circ\text{C}$ , время сжатия и восстановления 3 мин. Необратимая деформация характеризуется условным показателем пластичности  $\epsilon_{\text{п}}$ :

$$\epsilon_{\text{п}} = \frac{h_0 - h_{\text{вс}}}{h_{\text{сж}} + h_{\text{вс}}}, \quad (6.42)$$

где  $h_{\text{вс}}$  — высота восстановленного образца после снятия нагрузки.

Обратимая деформация  $h_{\text{об}}$  называется эластическим восстановлением:

$$h_{\text{об}} = h_{\text{вс}} - h_{\text{сж}}.$$

При испытании резин на сжатие на дефометре по ГОСТ 10201–62 при постоянной температуре  $80^\circ\text{C}$  определяют нагрузку  $P$  (гс), вызывающую заданную деформацию стандартного цилиндрического образца диаметром 10 мм и высотой  $h_0 = 10$  мм за время 30 с.

Стандартизованная деформация

$$\epsilon_{\text{п}} = \frac{h_0 - h_{\text{сж}}}{h_0} = 0,6.$$

Нагрузка  $P$ , определенная в таких условиях испытаний, характеризует общее сопротивление материала сжатию и по сути

оценивает жесткость резины при сжатии. Эластическое восстановление  $h_{об}$  измеряют через 30 с после снятия нагрузки.

Газонаполненные (губчатые) резины испытывают на статическое сжатие по ГОСТ 11139-65. При этом определяют так называемую твердость  $H$  как отношение нагрузки  $P$  (Н, кгс), вызывающей за 1 мин сжатие образца на 60%, к площади основания образца  $S_{сеч}$  ( $m^2$ ,  $cm^2$ ):

$$H = \frac{P}{S_{сеч}} \left[ \frac{MH}{M^2} = 10 \frac{кгс}{см^2} \right].$$

Одним из условных показателей, косвенно характеризующих поведение резин при эксплуатации, является твердость. Твердость оценивает сопротивление испытываемого образца резины вдавливанию в него наконечников (инденторов) различных форм. На показатель твердости влияют размеры и форма индентора, режимы нагружения и время воздействия, силы трения между резиной и индентором, жесткость опоры под образцом и другие факторы. Глубину вдавливания индентора измеряют не после снятия нагрузки, как при испытаниях металлов, а во время действия нагрузки. Величину и длительность воздействия нагрузок выбирают сравнительно небольшими, чтобы не развивались остаточные деформации. Существует полуэмпирическая зависимость, связывающая модуль сдвига резины при малых деформациях  $G$  ( $кгс/см^2$ ) с нагрузкой  $P$  ( $кгс$ ), вдавливающей сферический индентор радиусом  $R$  ( $см$ ) на глубину  $h$ , выражаемую в сотых долях миллиметра [25]:

$$P = 0,00051 GR^{0,65} h^{1,35}. \quad (6.43)$$

Величину  $h$  определяют при рекомендованных ИСО значениях  $P$  и  $R$ . Затем результаты измерений переводят в международные единицы твердости (рекомендация ИСО R-48, ГОСТ 13331-67), которые близки к условным единицам твердости по Шору.

Твердость по Шору определяют в процессе экспресс-испытаний, не требующих большой точности. Индентором явля-

ется затупленная игла, имеющая форму усеченного конуса. Показатель твердости определяют по условной шкале из 90 делений в зависимости от глубины проникновения иглы в материал под действием силы, создаваемой стандартной пружиной. Твердость оценивают в условиях равновесия сил вдавливания иглы пружиной и выталкивания иглы из образца испытуемой резины. Твердость 0 соответствует полной глубине погружения иглы, твердость 90 — когда игла не погружается в образец, а усилие предельно сжатой пружины составляет 8,06 Н (822 гс).

Анализ уравнений (6.43), (6.27)–(6.31) показывает, что существует взаимосвязь между условным значением твердости по Шору, модулем сдвига и усилием сжатия пружинящих элементов штанцевального штампа при определенной деформации  $\epsilon_{i\text{сж}}$ : чем выше твердость резины по Шору, тем больше ее модуль сдвига  $G$ , тем больше напряжение сжатия  $\sigma_{i\text{сж}}$ , тем больше усилие сжатия  $P_{i\text{сж}}$ .

Для газонаполненных резин такая взаимосвязь нарушается. Основной причиной нарушения этой взаимосвязи является разное поведение твердой и газовой фаз при деформировании. Твердые резины практически несжимаемы и имеют коэффициент Пуассона, близкий к 0,5. Газовая фаза сжимается, уменьшаясь в объеме. Поэтому поведение резин с различным содержанием газовой фазы, иначе говоря — с различной кажущейся плотностью, при сжатии различно.

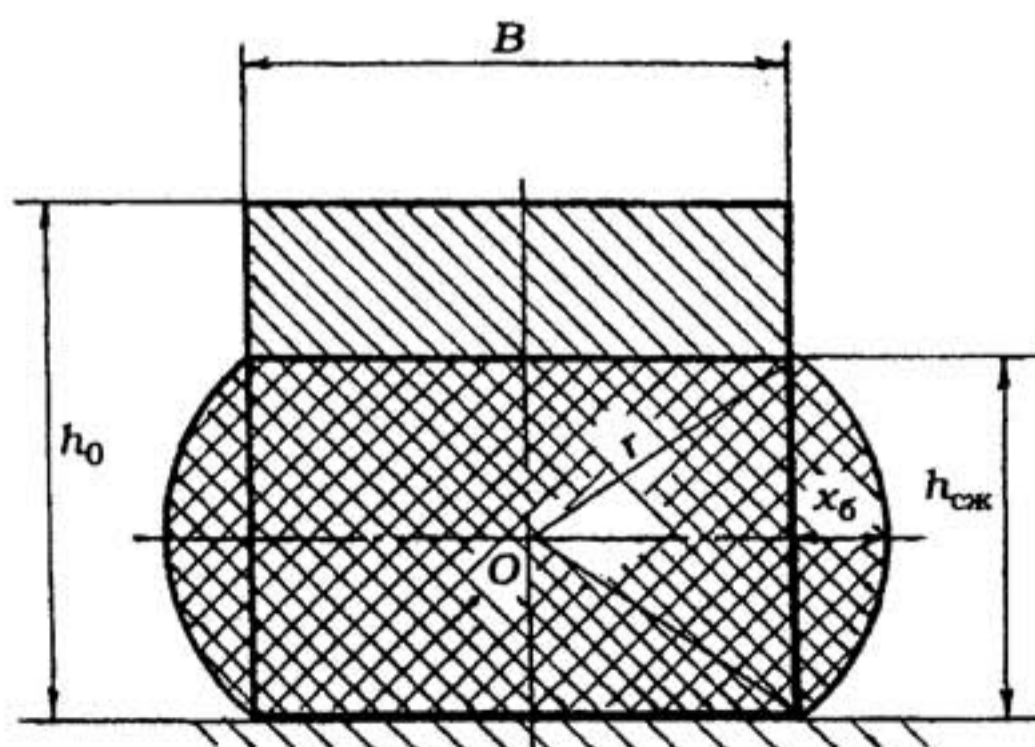


Рис. 6.48. Схема деформирования пружинящего элемента

Рассмотрим схему деформирования монолитного резинового пружинящего элемента (рис. 6.48) с исходным прямоугольным сечением площадью  $S_0$ :

$$S_0 = Bh_0. \quad (6.44)$$

В конце прямого хода штанцевального штампа пружинящий элемент сжат до высоты  $h_{сж}$ , а его сечение приобретает бочкообразную форму. Площадь деформированного сечения  $S_{сж}$  можно расчленить на площади трех фигур: прямоугольника с исходной шириной  $B$  и высотой  $h_{сж}$  и двух одинаковых сегментов площадью  $S_{сег}$ :

$$S_{сж} = Bh_{сж} + 2S_{сег}. \quad (6.45)$$

Из условия несжимаемости монолитных резин следует, что

$$S_0 = S_{сж}. \quad (6.46)$$

Отсюда

$$S_{сег} = \frac{B(h_0 - h_{сж})}{2}. \quad (6.47)$$

Деформация сжатия составляет

$$\varepsilon_{сж} = \frac{h_0 - h_{сж}}{h_0}. \quad (6.48)$$

Из (6.47) следует, что

$$h_{сж} = h_0(1 - \varepsilon_{сж}). \quad (6.49)$$

Из выражений (6.47) и (6.48) получаем

$$S_{сег} = \frac{S_0}{2} \varepsilon_{сж}. \quad (6.50)$$

Радиус сферической части деформированного элемента составляет

$$r = \frac{\sqrt{B^2 + h_{сж}^2}}{2}. \quad (6.51)$$



Боковое расширение деформированного элемента

$$X_6 = r - \frac{B}{2} = \frac{\sqrt{B^2 - h_{\text{сж}}^2} - B}{2}. \quad (6.52)$$

При деформировании газонаполненных резин величина  $X_6$  будет уменьшаться с увеличением содержания газовой фазы или с уменьшением кажущейся плотности за счет эффекта сжимаемости газовой фазы.

Величина  $X_6$  является важной конструктивной характеристикой штанцевального штампа: она определяет зазор между штанцевальным инструментом и пружинящим материалом  $s$ :

$$s \geq X_6. \quad (6.53)$$

Выполнение условия (6.53) позволяет исключать боковое давление на рабочий инструмент со стороны пружинящего материала и устранять появление в штанцуемом материале касательных напряжений, отрицательно влияющих на качество штанцевания.

На практике наиболее часто высоту пружинящего материала  $h_0$  выбирают с таким расчетом, чтобы пружинящие элементы выступали над режущими ножами примерно на 1,2 мм (рис. 6.49):

$$h_0 = H_p + 1,2 - a, \quad (6.54)$$

где  $a$  — толщина основания штанцевального штампа.

В случае, когда ширина пружинящего элемента  $B$  равна его высоте  $h_0$  ( $B = h_0$ ), оптимальными являются зазор  $s = 0,5-1,5$  мм при штанцевании картона и зазор  $s = 1,5-2,0$  мм при штанцевании гофрокартона.

Высота пружинящих элементов  $h_0$  взаимосвязана с их твердостью: чем больше  $h_0$ , тем меньше должна быть твердость. Оптимальным вариантом считается, когда высота пружинящих элементов на штанцевальном штампе одинакова. Правильный выбор высоты пружинящих элементов позволяет повысить и качество штанцевания, увеличить срок службы штампа.

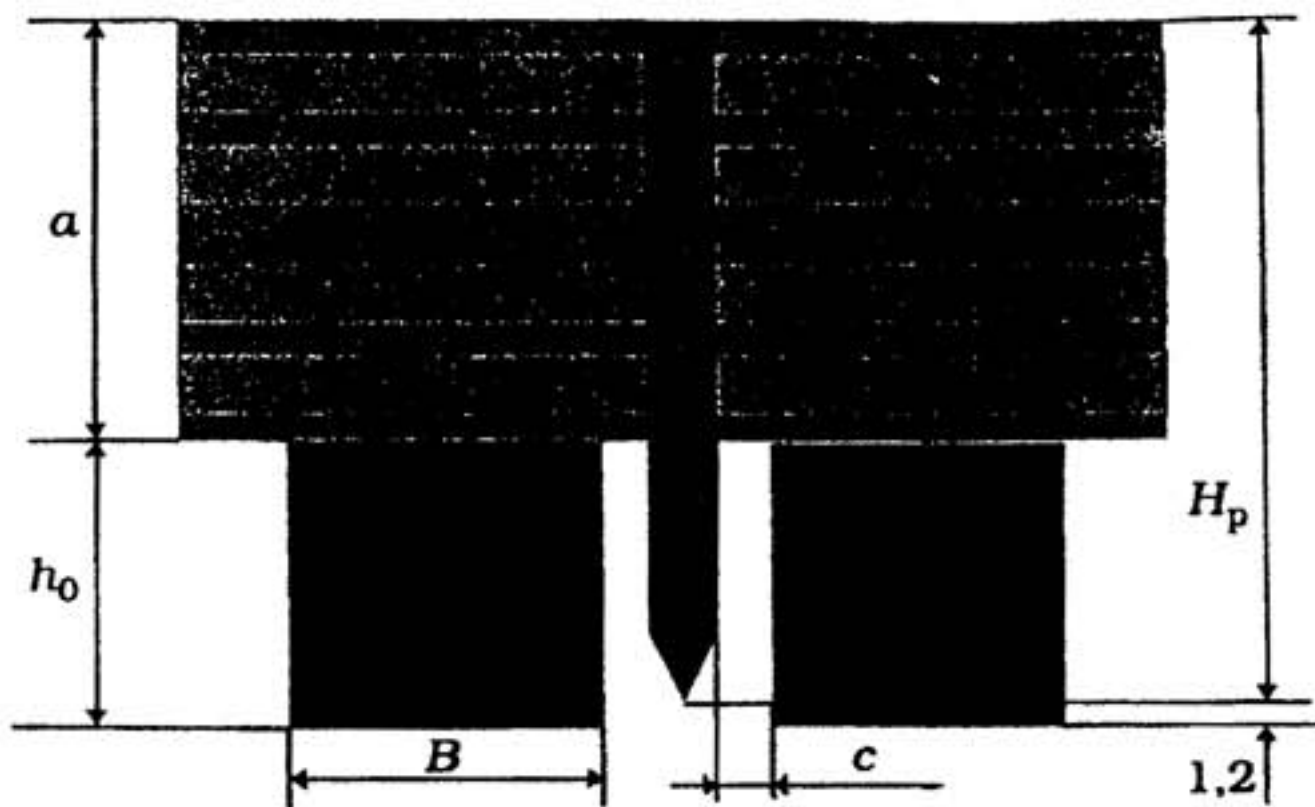


Рис. 6.49. Схема расположения пружинящего элемента и режущего ножа

Выбор необходимой твердости резины зависит от схемы расположения рабочего инструмента на штампе и от вида и свойств штампуемого материала.

Если расстояние между соседними режущими ножами меньше 8 мм, то рекомендуется использовать в качестве пружинящего материала резину твердостью от 40 до 60 ед. по Шору. Если это расстояние более 8 мм, то резина должна быть менее твердой — от 20 до 35 ед. по Шору.

**Сплошная монолитная резина** отличается высокой твердостью и жесткостью. Из нее чаще всего изготавливают пружинящие элементы различного профиля в сечении.

Пружинящий элемент с сечением в виде равнобедренной трапеции с углом у основания  $22^\circ$  (рис. 6.50) характерен тем, что при сжатии форма его сечения преобразуется в прямоугольную, а боковое расширение отсутствует. Такие пружинящие элементы применяют между близко расположенными режущими ножами.

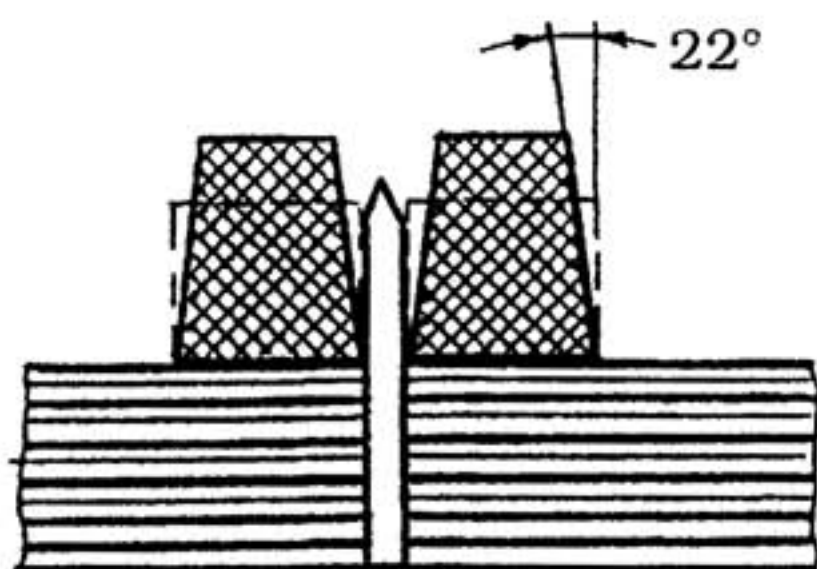


Рис. 6.50. Пружинящий элемент трапецеидального сечения

Более сложную форму имеют пружинящие элементы с клыкообразным сечением. Их используют между близко расположенными биговальными и режущими ножами. Отрицательный угол наклона профильной боковой поверхности к плоской опорной поверхности «А» (рис. 6.51, а) выполняет две основные функции. Во-первых, предохраняет картон от появления оттисков в районе краевой зоны биговальной матрицы при контакте с жестким пружинящим элементом. Во-вторых, компенсирует (рис. 6.51, б) возникающие в процессе биговки в картоне значительные растягивающие напряжения, ухудшающие качество резки. Особенно эффективно применение таких профилей в местах образования перемычек, удерживающих на листе заготовки коробки. Если расстояние  $l$  между режущим и биговальными ножами меньше 10 мм, для изготовления профилей рекомендуется применять резину твердостью от 45 до 70 ед. по Шору. При расстоянии  $l > 10$  мм для профилей используют более мягкие сорта резины твердостью от 35 до 55 ед. по Шору.

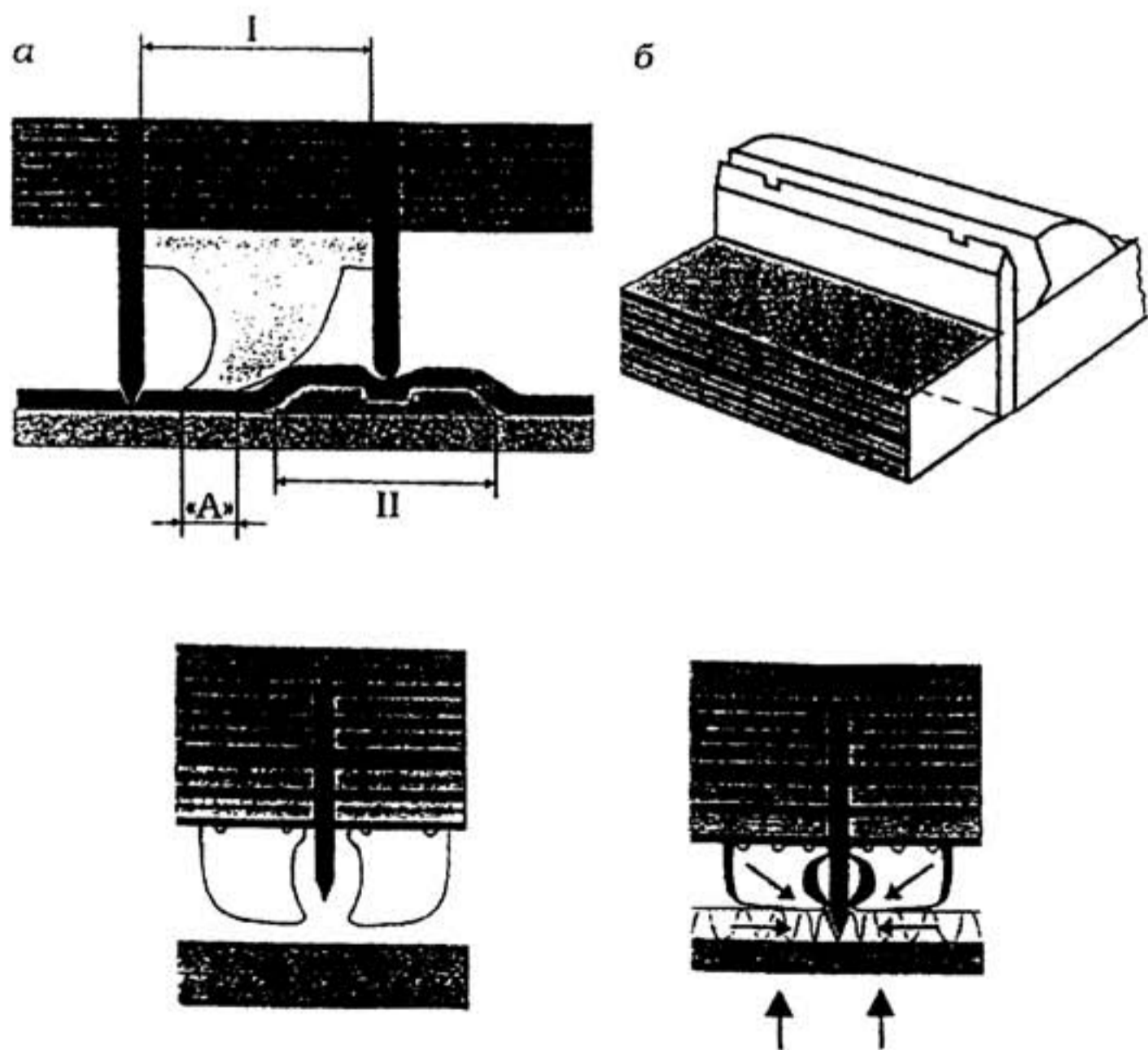


Рис. 6.51. Пружинящий элемент с сечением клыкообразной формы

**Газонаполненная резина** характеризуется меньшей твердостью и жесткостью, поэтому из нее изготавливают пружинящие элементы преимущественно прямоугольного сечения. Резина поставляется в виде листов, из которых нарезают пружинящие элементы требуемой ширины. Важным показателем качества резки является обеспечение вертикальности боковых стенок пружинящих элементов. Если одна из сторон резины имеет текстильную поверхность, часто называемую коркой, то пружинящий элемент должен быть приклеен к основанию штампа коркой вверх. В противном случае возможно прилипание картона к пружинящему элементу.

**Резина с открытыми ячейками**, иначе называемая резиной с открытыми порами, отличается наименьшим значением бокового расширения  $X_b$ . При сжатии пружинящего элемента воздух выходит из открытых пор. При восстановлении воздух входит обратно в поры. Для процесса заполнения воздухом пор при обратном ходе штампа требуется определенное время, поэтому такая резина не может применяться в высокоскоростных штанцевальных установках. Вместе с воздухом в поры попадает пыль, образующаяся в процессе штанцевания. Это приводит к постепенному увеличению жесткости резины с открытыми порами. Такую резину целесообразно использовать для штанцевания высококачественных сортов картона с наименьшим пылеобразованием. Основные свойства наиболее часто применяемых марок резин с открытыми ячейками для изготовления пружинящих элементов штанцевальных штампов приведены в табл. 6.19.

**Резина с закрытыми ячейками** по пружинящим и эжекторным свойствам занимает промежуточное положение между сплошной монолитной резиной и резиной с открытыми ячейками. Наилучшим комплексом свойств обладают резины на основе синтетического каучука. Замкнутые ячейки заполнены преимущественно воздухом, реже азотом. Усталость таких материалов при многократном циклическом нагружении проявляется в остаточной деформации и сморщивании ячеек. При превышении допустимой степени сжатия стенки ячеек могут лопнуть, разрушиться. Свойства основных марок резин с закрытыми ячейками, применяемых для изготовления пружинящих элементов штанцевальных штампов, приведены в табл. 6.20.

**Вспененные полиуретаны** имеют закрытые ячейки очень малых размеров — микроячейки, поэтому их часто называют микропористыми материалами. При сжатии они отличаются маленьким значением бокового расширения  $X_6$ , поэтому чаще всего пружинящие элементы из них используют между близко расположенными режущими ножами. Из микропористого полиуретана изготавливают бандажи для контрвалов роторных

Таблица 6.19

**Основные свойства резин с открытыми ячейками для пружинящих элементов штанцевальных штампов [31]**

Свойство	Марка резины			
	F1.20	F1.25	F1.35	F1.45
Условная твердость по Шору, ед.	20	25	35	45
Максимальная степень сжатия $\epsilon_{сж}$ , %	45	40	35	30
Скорость штанцевания, $ч^{-1}$	6000	7000	8000	9000
Выносливость $N$ , тыс. циклов	800	1000	1250	1500
Гарантийный срок хранения, лет	2	2	2	2
Штанцуемый материал*	К, ГК, МГК	К, МГК	тонкий К	К толщиной $\delta=0,35$

\* Условные обозначения: К — картон; МГК — микрогофрокартон; ГК — гофрокартон; Б — бумага.

Таблица 6.20

**Основные свойства резин с закрытыми ячейками для пружинящих элементов штанцевальных штампов [31]**

Свойство	Марка резины			
	EPDM	NR, NR/E	N 45	Neoprene
Условная твердость по Шору, ед.	12	20	25	9
Максимальная степень сжатия $\epsilon_{сж}$ , %	60	50	40	80
Скорость штанцевания, $ч^{-1}$	6000	9000	11000	13000
Выносливость $N$ , тыс. циклов	250	800	1000	3000
Гарантийный срок хранения, лет	3	2	3	6
Штанцуемый материал	Б, К, МГК, ГК	тонкий К, МГК	ГК*, удаление отходов	5-слойный ГК**

\* Штанцевальный материал для плоских и ротационных штампов;

\*\* для ротационных штампов.

штанцевальных машин. Свойства микропористых полиуретановых материалов типа Vulkollan и Vulkan (Германия), применяемых в качестве пружинящих элементов штанцевальных штампов, приведены в табл. 6.21.

В связи с тем, что штанцевание осуществляется в высокоскоростном режиме, когда скорость штанцевания достигает  $14\ 000\ \text{ч}^{-1}$ , к штанцевальным штампам предъявляются высокие требования по их весовому и силовому уравниванию, являющемуся примером статической балансировки. В основу правил весового и силового уравнивания положен принцип равенства моментов относительно осей симметрии штанцевального штампа.

*Правило весового уравнивания:* сумма моментов от веса всех рабочих инструментов и пружинящих элементов относительно осей симметрии штанцевального штампа должна быть равна нулю:

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{\text{р. п.}}(x) &= 0, \\ \sum M_{\text{р. п.}}(y) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.55)$$

Таблица 6.21

**Основные свойства микропористых полиуретанов для пружинящих элементов штанцевальных штампов [31]**

Свойство	Марка резины			
	RG 35	RG 45	RG 65	SLOT WHITE 45
Условная твердость по Шору, ед.	25	35	55	40
Максимальная степень сжатия $\epsilon_{\text{сж}}$ %	50	40	30	30
Скорость штанцевания, $\text{ч}^{-1}$	11 000	13 000	14 000	11 000
Выносливость $N$ , млн. циклов	3	5	6	3
Гарантийный срок хранения, лет	20	20	20	—
Штанцуемый материал	Все материалы	Удаление мелких отходов ГК	Удаление отходов в ротационных штампах	Удаление особо мелких отходов в ротационных штампах

Для определения момента от веса конкретного рабочего инструмента, например, режущего ножа, необходимо определить вес ножа  $P_H$  и координаты центра тяжести ножа  $(x_H, y_H)$  относительно осей симметрии штампа. Моменты от веса режущего ножа:

$$\left. \begin{aligned} M(x) &= P_H (Ox_H); \\ M(y) &= P_H (Oy_H). \end{aligned} \right\}$$

Если штанцевальный штамп оказывается неуравновешенным относительно какой-либо из осей, в конструкции штампа предусматривают установку дополнительных компенсационных ножей с требуемой суммой моментов от их веса. На рис. 6.52 показана конструкция штанцевального штампа с четырьмя компенсационными ножами относительно оси симметрии  $x$ .

*Правило силового уравновешивания:* сумма моментов от возникающих максимальных усилий сжатия пружинящих элементов относительно осей симметрии штанцевального штампа должна быть равна нулю:

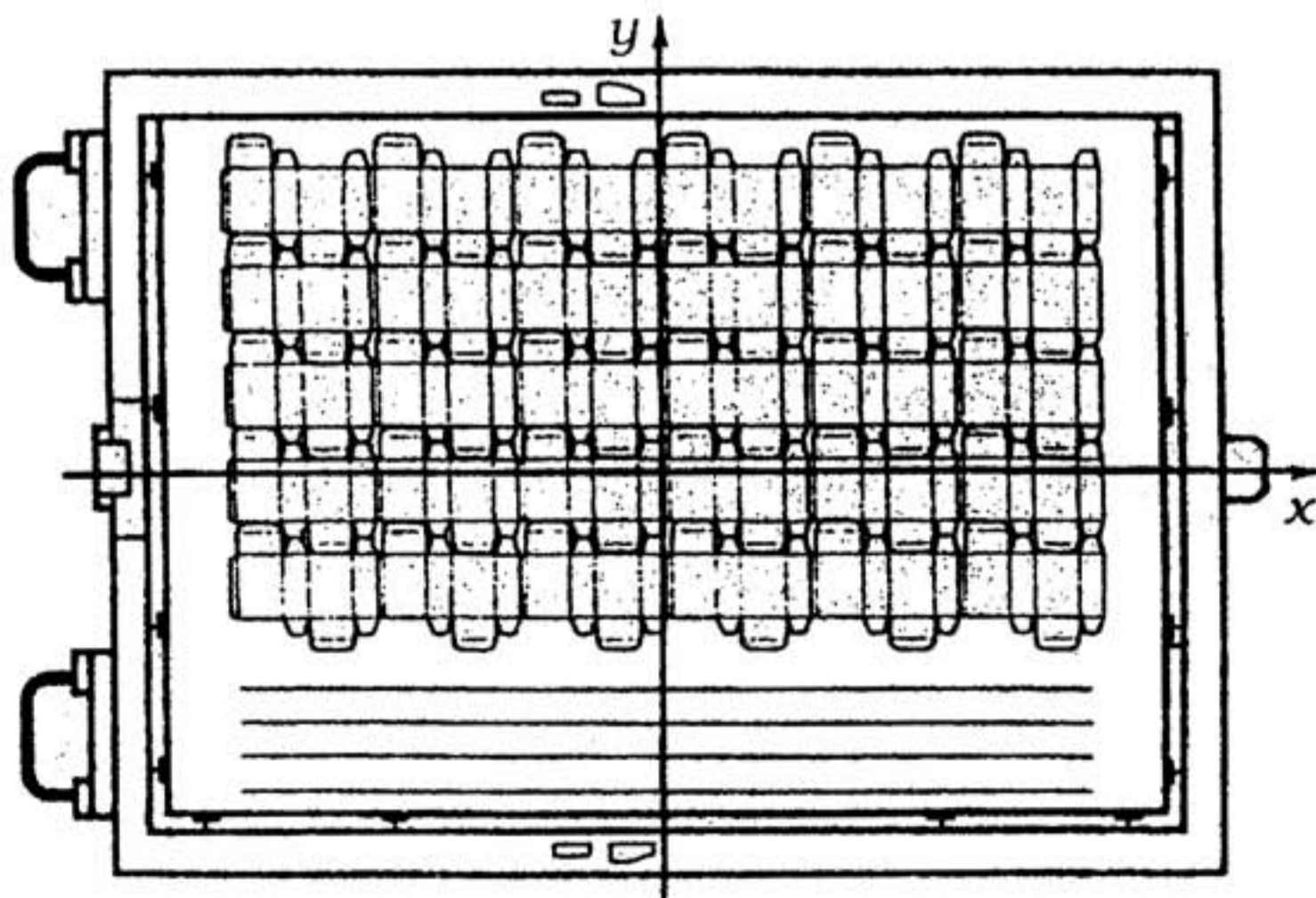


Рис. 6.52. Штанцевальный штамп с компенсационными ножами относительно оси симметрии  $x$

$$\left. \begin{aligned} \sum M P_{\text{сж}}(x) &= 0, \\ \sum M P_{\text{сж}}(y) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.56)$$

Максимальных значений усилия сжатия пружинящих элементов достигают в конце прямого хода штампа при максимальной деформации  $\epsilon_{i \text{сж}}$ . Моменты от усилий сжатия  $i$ -го пружинящего элемента равны произведению его усилия сжатия  $P_{i \text{сж}}$  на соответствующие расстояния от осей симметрии до геометрического центра проекции его площади  $(x_{i \text{п}}, y_{i \text{п}})$ :

$$M(x)_i = P_{i \text{сж}}(Ox_{i \text{п}});$$

$$M(y)_i = P_{i \text{сж}}(Oy_{i \text{п}}).$$

Существует упрощенное и менее строгое правило силового уравнивания: суммы площадей всех пружинящих элементов одинаковой высоты  $h_0$  из одинакового материала относительно осей симметрии штанцевального штампа должны быть равными.

В случае силовой неуравновешенности штампа относительно какой-либо из осей в его конструкции предусматривают дополнительные компенсационные пружинящие элементы с требуемой суммой моментов от усилия сжатия. Компенсационные пружинящие элементы чаще всего изготавливают из резиновых материалов с условной твердостью по Шору 25–30 ед.

При обратном ходе штампов за счет эжекторных свойств пружинящего материала картон удаляется с рабочего инструмента. Из эжекторных свойств наиболее важными являются усилие и время восстановления пружинящего материала. Следует стремиться к тому, чтобы усилия восстановления в различных частях штампа были одинаковыми, а время восстановления пружинящих элементов до первоначальных размеров в недеформированном состоянии не превышало времени обратного хода штампа.

Выбор оптимальной схемы расположения пружинящих элементов, их геометрических размеров и материала является чрезвычайно сложной многофакторной задачей, требующей сочетания специальных знаний и большого практического опыта. Решают такие задачи с помощью компьютерных программ, которые выбирают тип, марку требуемого материала,



профиль сечения, геометрические размеры и схему расположения пружинящих элементов на штампе. Созданы автоматизированные системы, совмещающие компьютерную программу с установкой автоматической резки пружинящих элементов тонкой струей воды. Такие системы позволяют тиражировать штанцевальные формы с практически одинаковыми техническими характеристиками.

В процессе транспортировки и хранения резина под влиянием многочисленных факторов (тепла, света, кислорода, влаги, агрессивных химических соединений и т. п.) подвержена процессу старения. Обычно при старении резин протекают реакции двух типов: деструкция и сшивание макромолекул. Старение резин приводит к значительному ухудшению их деформационных свойств как при сжатии, так при восстановлении, резкому снижению усталостной выносливости и повышению жесткости. Состаренную резину нельзя применять в качестве пружинящих элементов штанцевальных штампов, поэтому следует обращать особое внимание на правильные условия хранения резины, дату ее изготовления и гарантийный срок хранения.

Приклеивать резину к основанию следует рекомендованным клеем. Неподходящий клей может вызвать химические реакции, приводящие к ухудшению пружинящих и эжекционных свойств, снижению усталостной выносливости пружинящих элементов.

При необходимости хранить готовые штанцевальные штампы нужно в вертикальном положении, не допуская попадания на них солнечного света. В сухом помещении резина стареет быстрее, чем во влажном. Но избыточная влажность недопустима для фанерного основания штампа. Поэтому необходимо поддерживать оптимальный температурно-влажностный режим помещения.

#### *6.4.2.2. Контрштампы*

Контрштамп, являющийся ответной частью штанцевального штампа, представляет собой систему биговочных каналов, оси симметрии которых строго совпадают с осями симметрии соответствующих биговальных ножей штанцевального штампа.

По конструктивному исполнению контрштампы бывают съемными и несъемными. Съемные контрштампы монтируются на специальных съемных плитах, несъемные — непосредственно на плите (талере) штанцевального оборудования.

Биговочные каналы контрштампов могут быть выполнены из различных материалов: прессшпана (прессованного картона), пластмасс, фотополимерных пластин, слоистых прессованных материалов и металла [39].

**Из прессшпана и пластмасс биговочные каналы** формируют путем наклеивания соответствующих биговальных матриц. Если биговальные матрицы не имеют юстировочных направляющих, их наклеивают по предварительной разметке. После пробного бигования исследуют качество биговки и состояние биговальных матриц. В местах несовпадения с осями симметрии биговальных ножей биговочные каналы фрезеруют или обрабатывают вручную. Такая технология к настоящему времени устарела и применяется редко, главным образом при изготовлении контрштампов для небольших тиражей коробок — от 1000 до 5000.

**Контрштампы из пластмассовых биговальных матриц** с юстировочными направляющими изготавливают по другой технологии [39]. Отрезанные до требуемой длины биговальные матрицы монтируют на соответствующие биговальные ножи штанцевального штампа, вставляя их до упора в посадочном канале юстировочной направляющей (рис. 6.53, а). После установки штанцевального штампа в штанцевальную машину с оснований биговальных матриц удаляют защитную бумагу, обнажая клеевой слой. Затем осуществляют прямой рабочий ход штанцевальной машины, в конце которого биговальные матрицы прижимаются к опорному столу машины (талеру) или к специальной съемной стальной плите и приклеиваются (рис. 6.53, б). При обратном ходе штанцевальной машины биговальные ножи освобождаются из юстировочных направляющих приклеенных биговальных матриц (рис. 6.53, в). После удаления юстировочных направляющих (рис. 6.53, г) контрштамп готов к работе.

Такие контрштампы широко применяют при изготовлении средних партий коробок в количестве 50 000 – 100 000. Их главным недостатком является сложность точного сопряжения биговальных матриц в угловых соединениях. Полученные

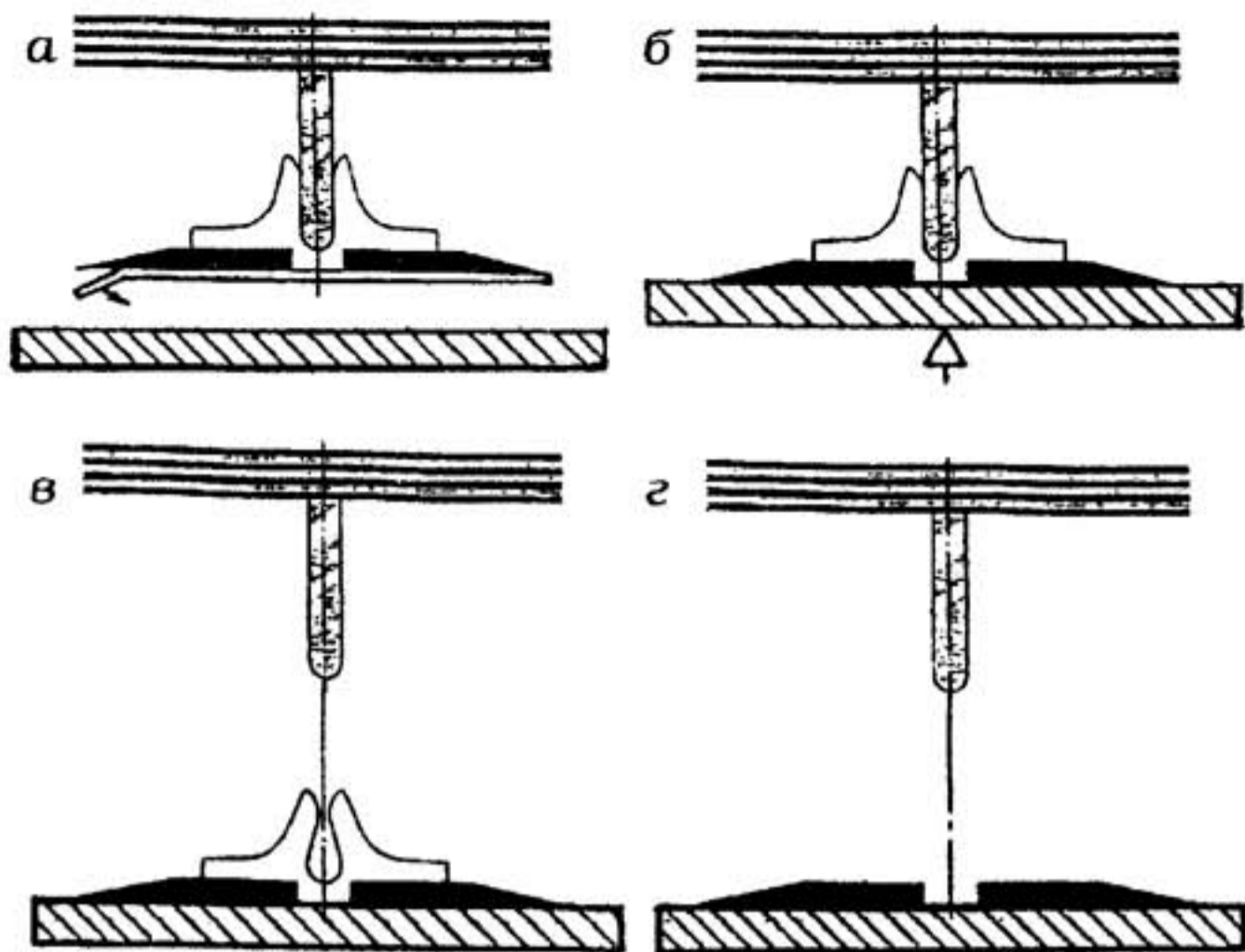


Рис. 6.53. Схема изготовления контрштампов из пластмассовых биговальных матриц с юстировочными направляющими:

- а — монтаж матриц на биговальных ножах штампа;  
 б — приклеивание матриц к опорному столу штанцевальной машины; в — обратный ход машины; г — удаление юстировочных направляющих

на таких контрштампах коробки, как правило, имеют пониженное качество в углах, поэтому их не рекомендуется использовать в установках автоматического заполнения продукцией.

**Контрштампы из фотополимерных пластин** производят по технологии, широко распространенной в полиграфии при изготовлении печатных форм. Они имеют невысокую тиражестойкость, поэтому в настоящее время используются весьма редко.

Складные коробки малых размеров с последующим автоматическим заполнением, а также больших размеров с повышенными требованиями к герметичности получают с помощью **контрштампов из слоистых прессованных материалов**. В качестве связующего в них используют крезоло- или фенолоформальдегидные, а также эпоксидные смолы. Если наполнителем является бумага, то такие прессматериалы называют гетинаксами (зарубежный аналог — пертинаксы). Если наполнителем служит стекло-

ткань — стеклотекстолитами, называемыми за рубежом ветронитами. На отечественный рынок поставляются и комбинированные импортные слоистые прессованные материалы (табл. 6.22).

Биговочные каналы на слоистых прессованных материалах выполняются методом фрезерования. Наилучшим качеством характеризуются контрштампы, фрезерованные на плоттере, управляемом от компьютерной системы, с помощью которой производилось проектирование развертки коробки и штанцевального штампа. На каждую коробку изготавливается отдельный контрштамп. Минимальная толщина пластины прессматериала в зоне биговочного канала составляет 0,1 мм.

Главным недостатком контрштампов из слоистых прессованных материалов является различный с основанием штанцевального штампа коэффициент линейного температурного расширения, что приводит к их различной температурной деформации. При значительном изменении температуры возможно несовпадение осей симметрии биговальных ножей и биговальных каналов. Для коробок небольших размеров такая вероятность значительно меньше.

Для массового производства коробок очень крупными тиражами (до 12–20 млн.) применяют **металлические контрштампы**. Их изготавливают либо фрезерованием, аналогично контрштампам из слоистых прессматериалов, либо электроэрозионной обработкой на станках, управляемых компьютерной программой проектирования разверток коробок.

Таблица 6.22

### Слоистые прессованные материалы для контрштампов

Наименование материала	Состав слоев наполнителя	Тиражестойкость контрштампа, тыс. циклов
Pertinax	4 слоя — бумага	50–100
CF2×EGS	1 слой — стеклоткань 3 слоя — бумага 1 слой — стеклоткань	500
Super PTX	—	800
PTX 2×2	2 слоя — стеклоткань 1 слой — бумага 2 слоя — стеклоткань	1000
Vetronit	5 слоев — стеклоткань	1600

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. *Андреева Л. Е.* Упругие элементы приборов. — М.: Машгиз, 1962. — 456 с.
2. *Аскадский А. А.* Деформация полимеров. — М.: Химия, 1973. — 448 с.
3. *Безкоровайный К. Г.* Сварка изделий из пластмасс. — Л.: Химия, 1979. — 120 с.
4. *Борисочкина Л. И.* Современная тара и упаковка для продукции из гидробионтов. — М.: ВНИЭХР, 1998. — 22 с.
5. *Волков С. В., Черняк Б. Я.* Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1986. — 256 с.
6. *Воробьев Д. В., Дубасов А. И., Лебедев Ю. М.* Технология брошюровочно-переплетных процессов. — М.: Книга, 1989. — 392 с.
7. *Гудимов М. М.* Деформативность, прочность и механизм разрушения полимерных материалов. // *Авиационная промышленность*. 1994. № 9–10. С. 42–47.
8. *Гудимов М. М.* Трещины серебра на органическом стекле. — М.: ЦИПКК АП, 1997. — 260 с.
9. *Гуль В. Е., Акутин М. С.* Основы переработки пластмасс. — М.: Химия, 1985. — 400 с.
10. *Гуль В. Е.* Структура и прочность полимеров. — М.: Химия, 1978. — 327 с.
11. *Гуль В. Е.* Экология производства и использования полимеров в качестве тары и упаковки пищевых продуктов. — М.: МГУПБ, 1998. — 36 с.
12. *Долматовский Т. А.* Справочник технолога по обработке металлов резанием. — М.: Машгиз, 1962. — 1236 с.

13. *Ефремов Н. Ф.* Высокотермоморозостойкие полиплексные пленочные материалы на основе поли(дифенилоксид)пиломеллитимида: Докт. дисс. — М.: НПО «Наука», 1997. — 455 с.
14. *Ефремов Н. Ф.* Исследование ползучести и восстановления полиимидной пленки ПМ в условиях одноосного напряженного состояния. // *Авиационная промышленность*. 1994. № 9–10. С. 48–51.
15. *Ефремов Н. Ф., Корнилов И. К., Цыганенко А. М.* Функциональная и конструктивная классификация этикеток. // *Пищевая промышленность*. 1999. № 4. С. 42–44.
16. *Зайцев К. И., Мацюк Л. Н.* Сварка пластмасс. — М.: Машиностроение, 1978.
17. *Каган Д. Ф., Гуль В. Е., Самарина Л. Д.* Многослойные и комбинированные пленочные материалы. — М.: Химия, 1989. — 288 с.
18. *Канцельсон М. Ю., Балаев Г. А.* Полимерные материалы: Справочник. — Л.: Химия, 1982. — 317 с.
19. *Капустин П., Копылов В.* Лазерная технология изготовления вырубных штампов // *Тара и упаковка*. 1998. № 1. С. 26–27.
20. *Корнилов И. К.* Методологические основы инженерной деятельности. — М.: Изд-во МГУП, 1999. — 207 с.
21. *Ламареаукс Роберт Д.* Штриховые коды и другие системы автоматической идентификации / Пер. с англ. Л. М. Леймонта. — М.: Изд-во МГУП, 1998.
22. *Мацюк Л. И., Вишневецкая Н. В.* Некоторые вопросы прочности сварных соединений полимерных пленок // *Сборник «Сварка полимерных материалов»*. — М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1974. — 207 с.
23. *Никулин С. Е.* Упаковка как элемент маркетинга // *Пищевая промышленность*. 1996. № 7. С. 44.
24. *Орлов Г.* О некоторых видах оборудования картонажного производства // *Тара и упаковка*. 1998. № 1. С. 28–29.
25. *Власов С. В., Калинин Э. Л., Кулезнев В. Н. и др.* Основы технологии переработки пластмасс. — М.: Химия, 1995. — 528 с.

26. Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А. Полиимиды — класс термостойких полимеров. — Л.: Наука, 1983. — 328 с.
27. Полиолефины: переработка и применение в упаковке: Материалы семинара фирмы «Еххон Chemical». — М.: Союзупак, 1998. — 294 с.
28. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. — М.: Машиностроение, 1980. — 326 с.
29. Применение полиолефинов в упаковке: Материалы семинара фирмы «Еххон Chemical». — М.: Союзупак, 1998. — 294 с.
30. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. — М. — Л.: Машиностроение, 1965. — 788 с.
31. Руководство по выбору эжекторных материалов для штампов: Проспект компании «Регул-Т». — М., 1999.
32. Самоходесов А., Чакин А., Макачев А. Моделируем упаковку//Тара и упаковка. 1999. № 2. С. 56–57.
33. Сварка полимерных материалов: Справочник/Под общ. ред. К. И. Зайцева, Л. И. Мацюк. — М.: Машиностроение, 1988. — 312 с.
34. Соломенко М. Г., Шредер В. Л., Кривошей В. Н. Тара из полимерных материалов. — М.: Химия, 1990. — 400 с.
35. Справочник по пластмассам. В двух томах/Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. — М.: Химия, 1975.
36. Стюарт Б. Упаковка как инструмент эффективного маркетинга/Пер. с англ. В. В. Грачева. — М.: Изд-во МГУП, 1998. — 142 с.
37. Сударушкин Ю. К., Никонов А. В., Шиповская А. Б. Методология создания полимерных материалов с заданными свойствами. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1998. — 58 с.
38. Термопласты конструкционного назначения/Под ред. Е. Б.Тростянской. — М.: Химия, 1975. — 240 с.
39. Филатов М., Шевцов С., Ефремов Н., Лебедев Ю. Требования к элементам прессовой пары при высечке картонных коробок//Тара и упаковка. 1999. № 3. С. 4–6.

40. Тростянская Е. Б., Комаров Г. В., Шишкин В. А. Сварка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1967. — 252 с.
41. Гуль В. Е., Любешкина Е. Г., Аксенова Т. И. и др. Упаковка продуктов питания. — М.: МГУПБ, 1996. — 84 с.
42. Упаковка. Термины и определения. ГОСТ 17527–86.
43. Федорова И. Г., Безменов Ф. В. Высокочастотная сварка пластмасс. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. — 88 с.
44. Ефремов Н. Ф., Гудимов М. М., Осипов И. И., Сытый О. В., Блинов В. О. Формование полиимидных материалов // Доклады АН СССР, 1987. Т. 294. № 2. С. 371–375.
45. Чернов М. Е. Упаковка макаронных изделий. – М.: МГУПП, 1997. — 130 с.
46. Штанцевальный процесс с достижением высокой скорости, качества и экономической эффективности. — Семинар фирмы «Arpel» (Германия). — М., МГУП, 25–26.11.99 г.
47. Эксперты в ножах для производства штанцевальных форм — компания Essmann+Schaefer: Проспект компании «Регул-Т». — М., 1998. — 9 с.
48. Энциклопедия полимеров. — В 3-х томах. — М.: Советская энциклопедия, 1972.
49. Ball R. Integrated packaging. Pira International. 1195. 139 p.
50. Berndt D. Packaging. Vulkan-Verlag. — Essen, 1190, 382 s.
51. Viking Steel rule. General information. Martin Miller GmbH. Vienna, 1998. 14 p.
52. Soroca W. Fundamentals of packaging technology. Revised UK edition Emblem A, Emblem H. IOP, Melton Mowbray, 1999, 464 p.
53. Филатов М. Практические рекомендации для правильного выбора заточки режущих линеек. М., Упаковка вчера, сегодня, завтра. 2000, №3, с. 10–11.
54. Филатов М. Обрезинивание штанцформ как один из основных факторов, влияющих на качество выпускаемой продукции. М., Упаковка вчера, сегодня, завтра. 2000, №1, с. 6–7; №2, с. 16–17.